



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

TESIS:

**"CONFORMACIÓN DE UN MODELO A MESOESCALA PARA LA
PREDICCIÓN A MEDIANO PLAZO DE LA VELOCIDAD
DEL VIENTO EN LA MATA, OAXACA"**

PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. DAMIAN CAMPUZANO MILIAN

ASESOR:

DR. ERASMO CADENAS CALDERÓN

CO-ASESOR:

DR. VICTOR LÓPEZ GARZA

MORELIA, MICHOACÁN, MAYO DEL 2025

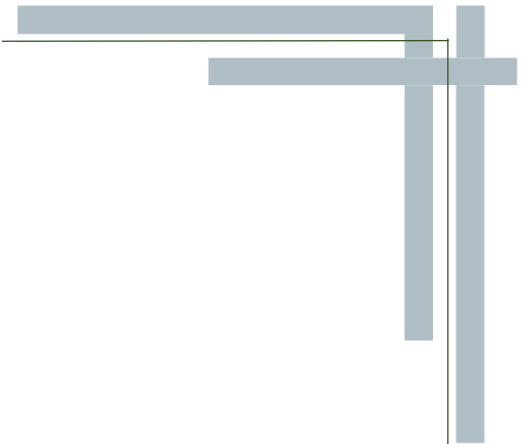
**Ciencia y
Tecnología**

Secretaría de Ciencia, Humanidades,
Tecnología e Innovación



***“La ciencia no es una forma de evitar errores,
sino una forma de aprender de ellos.”***

— Anónimo



Dedicatoria

A Dios, por darme la fortaleza, la salud y la vida para culminar esta etapa.

A mis padres, por su ejemplo de esfuerzo, por sus sacrificios silenciosos y por enseñarme que la educación es la mejor herencia.

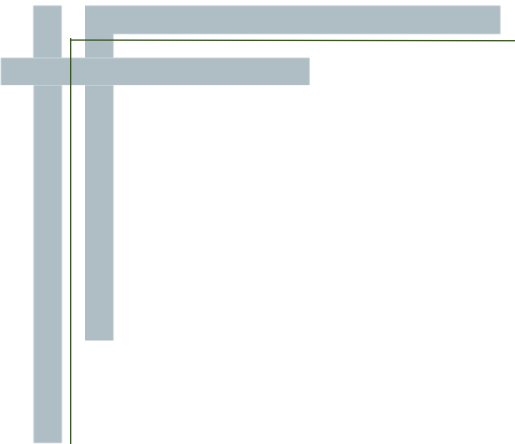
A mi prometida, por su amor incondicional, por creer en mí incluso cuando dudé, y por ser mi motor en cada paso de este camino.

A mis hermanos, por estar siempre presentes con su apoyo firme.

A mis sobrinos, cuya alegría y energía me inspiran a dar lo mejor de mí. Que este logro también sea una motivación para que sigan sus sueños.

A mis docentes, por compartir su conocimiento, por sus enseñanzas y por motivarme a seguir aprendiendo.

A cada persona que ha caminado conmigo en este proceso, gracias. Este logro no es solo mío, es de todos ustedes.



Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron a la realización de esta tesis.

A mi director de tesis, Dr. Erasmo Cadenas Calderón, por su guía, paciencia y valiosas observaciones que enriquecieron este trabajo.

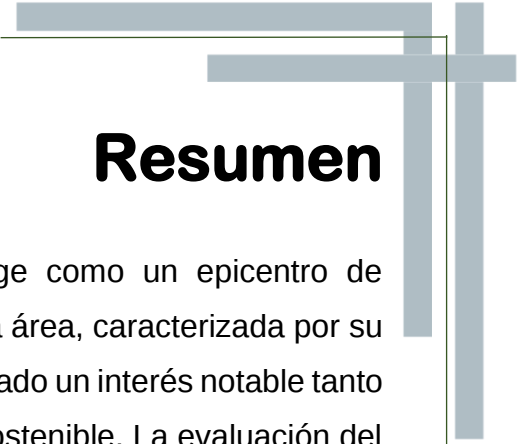
A los profesores miembros de mi comité evaluador, el Dr. Miguel Villagómez Galindo, por su apoyo en todo momento; al Dr. Gilberto González Ávalos, Dr. Rafael Campos Amezcua y Dr. Víctor López Garza por su compromiso académico, sus consejos y aportaciones para la mejora del presente trabajo de investigación.

A mi compañera Maritza Talhía Bernabé Morales, por su invaluable apoyo y disposición para compartir sus conocimientos durante mi aprendizaje.

A mis compañeros y amigos, por su apoyo, sus palabras de aliento y por acompañarme en esta travesía.

A las instituciones que facilitaron los datos, herramientas y recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto.

Finalmente, gracias a quienes creyeron en mí cuando más lo necesité. Este logro también es suyo.



Resumen

La región de La Mata en Oaxaca, México, se erige como un epicentro de investigación crucial en la generación de energía eólica. Esta área, caracterizada por su topografía que propicia vientos constantes y fuertes, ha suscitado un interés notable tanto de inversores como de científicos enfocados en la energía sostenible. La evaluación del recurso eólico ha confirmado a La Mata como una de las localidades más prometedoras en el estado de Oaxaca para la producción de energía eléctrica mediante la captación del viento.

La investigación llevada a cabo en La Mata se centra en el desarrollo de un modelo a mesoescala utilizando la herramienta Weather Research Forecast (WRF) para predecir con precisión la velocidad del viento a corto y mediano plazo. La importancia de este pronóstico radica en su papel crucial en la integración eficiente de la energía eólica en el Sistema Eléctrico Nacional. La variabilidad inherente de las fuentes de energía renovable, como la eólica, exige pronósticos certeros para garantizar una generación continua y estable de electricidad.

El modelo de pronóstico en La Mata representa un hito significativo en la búsqueda de un futuro energético más limpio y sostenible. No solo impulsa el desarrollo económico local mediante la creación de empleos y la inversión en la comunidad, sino que también contribuye directamente a la transición hacia una matriz energética más respetuosa con el medio ambiente, alineándose con los acuerdos internacionales destinados a proteger nuestro planeta.

Palabras Clava: Modelación numérica, Wheater Research Forecast, Predicción, Velocidad del Viento, Energía Eólica.



Abstract

The region of La Mata in Oaxaca, Mexico, stands as a crucial research hub for wind energy generation. This area, characterized by its topography that fosters strong and constant winds, has garnered significant interest from both investors and scientists focused on sustainable energy. Wind resource assessments have confirmed La Mata as one of the most promising locations in the state of Oaxaca for electricity generation through wind power.

The research conducted in La Mata focuses on developing a mesoscale model using the Weather Research and Forecasting (WRF) tool to accurately predict wind speed in the short and medium term. The importance of this forecast lies in its crucial role in the efficient integration of wind energy into the National Electric System. The inherent variability of renewable energy sources, such as wind power, requires accurate forecasts to ensure continuous and stable electricity generation.

The forecasting model in La Mata represents a significant milestone in the pursuit of a cleaner and more sustainable energy future. It not only drives local economic development by creating jobs and fostering investment in the community but also directly contributes to the transition toward a more environmentally friendly energy matrix, aligning with international agreements aimed at protecting our planet.

Keywords: Numerical modeling, Weather Research and Forecasting, Prediction, Wind Speed, Wind Energy.

Índice

Capítulo 1	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del Problema	4
1.3. Estado del arte	7
1.4. Hipótesis	9
1.5. Objetivos	9
1.5.1. Objetivo General	9
1.5.2. Objetivos Específicos	9
1.6. Justificación	10
Capítulo 2	12
2. Marco Teórico	12
2.1. La atmósfera	12
2.2. Viento y circulación general de la atmósfera	14
2.3. Efecto Coriolis en la circulación general de la atmósfera	16
2.4. Escalas Espaciales	18
2.5. Modelo de Mesoescala	19
2.6. Tipos de Pronóstico	22
2.7. Energía Eólica	24
2.8. Parque eólico	27
2.9. Curvas de Potencia de un Aerogenerador	29
Capítulo 3	32
3.1. Predicción numérica del tiempo	32
3.2. Tipos de modelos para pronosticar el viento	33
3.3. Modelos de Predicción Numérica del Tiempo (NWP)	34
3.4. Ecuaciones Fundamentales	36
3.5. El modelo WRF	37
3.5.1. Sistema de Preprocesamiento WRF (WPS)	40
3.5.2. Solucionador WRF-ARW	41
3.5.3. Post-Procesamiento con ARWpost y GrADS	43
Capítulo 4	46

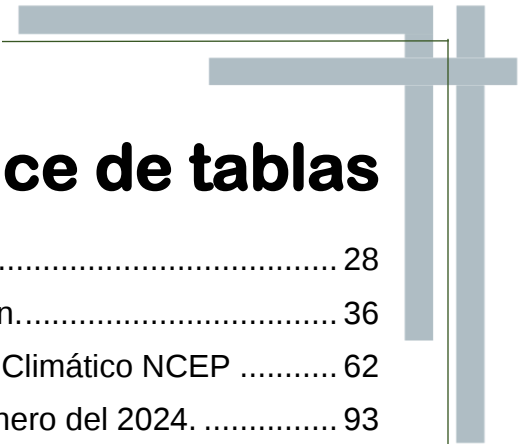
4.1. Selección del sitio de estudio: La Mata, Asunción Ixtaltepec, Oaxaca, México.....	46
4.2. Desarrollo del Pronóstico del Viento para La Mata, Oaxaca, con WRF	58
4.2.1. Software.....	58
4.2.2. Datos de reanálisis.....	60
4.2.3. Sistema de Preprocesamiento (WPS).....	64
4.2.4. Integrador Numérico WRF-ARW.....	72
4.2.5. Post Procesamiento de datos	79
Capítulo 5.....	86
5.1. Validación del modelo de pronóstico	86
5.1.1. Validación cualitativa del modelo	86
5.1.2. Validación cuantitativa del modelo	89
Conclusiones.....	100
Anexos	102
A.1. Cronograma de actividades.....	102
A.2. Diagrama de flujo de la metodología utilizada	103
A.3. Actividades de Retribución Social	104
A.4. Participación en Congresos.....	117
A.5. Publicación de Artículos	120
A.6. Estancia de Investigación	126
Bibliografía	127

Índice de figuras

Figura 1.	Capas de la Atmósfera .	13
Figura 2.	Circulación Atmosférica General .	15
Figura 3.	Desviación del aire por Efecto Coriolis .	16
Figura 4.	Molino de viento del siglo XVII .	25
Figura 5.	Turbinas eólicas .	26
Figura 6.	Funcionamiento de un parque eólico .	27
Figura 7.	Curva de potencia o diagrama P-V .	30
Figura 8.	Cubos 3D de la atmósfera usados por los modelos NWP .	35
Figura 9.	50 km de malla, representa un área de 2500km^2 .	35
Figura 10.	Diagrama de flujo del modelo WRF .	39
Figura 11.	Diagrama de flujo condensado del modelo ARW utilizado para la investigación .	40
Figura 12.	Velocidad Promedio Anual de Viento a 50m de altura .	47
Figura 13.	Velocidad del Viento a 80m de altura .	48
Figura 14.	Velocidad Promedio Anual del Viento a 120m de altura .	48
Figura 15.	Zonas de Alto Potencial de Energía Eólica a 50m .	49
Figura 16.	Zonas de Alto Potencial de Energía Eólica a 80m .	50
Figura 17.	Zonas de Alto Potencial de Energía Eólica a 120m .	50
Figura 18.	Zona de estudio.	51
Figura 19.	Interfaz GIOVANNI .	52
Figura 20.	Mapa promediado en el tiempo de la velocidad del viento cerca de la superficie mensual del 01-01-20 al 01-01-21.	53
Figura 21.	Mapa promediado en el tiempo de la velocidad del viento cerca de la superficie mensual del 01-01-21 al 01-01-22.	53
Figura 22.	Mapa promediado en el tiempo de la velocidad del viento cerca de la superficie mensual del 01-01-22 al 01-01-23.	54
Figura 23.	Mapa promediado en el tiempo de la velocidad del viento cerca de la superficie mensual del 01-01-23 al 01-01-24.	54
Figura 24.	Interfaz QGIS.	55
Figura 25.	Velocidad promedio del viento en el 2020.	56
Figura 26.	Velocidad promedio del viento en el 2021.	56

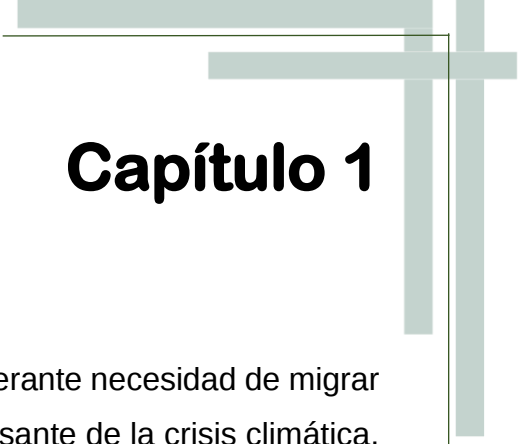
Figura 27.	Velocidad promedio del viento en el 2022.	57
Figura 28.	Velocidad promedio del viento en el 2023.	57
Figura 29.	Captura de pantalla del interfaz de la máquina virtual que contiene el WRF.	58
Figura 30.	Inicio de Sesión en PuTTY.	59
Figura 31.	WRF abierto en PuTTY.....	60
Figura 32.	Sistema de Pronóstico Climático NCEP Versión 2 (CFSv2) Productos de 6 horas.	61
Figura 33.	Selección de parámetros.	62
Figura 34.	Inicio de sesión en WinSCP.....	63
Figura 35.	Interfaz de WinSCP.	64
Figura 36.	Herramientas utilizadas.	64
Figura 37.	Archivos PRESS.....	69
Figura 38.	Archivos SURF.	70
Figura 39.	Archivos SST.	71
Figura 40.	Archivos met_em-d01.nc	72
Figura 41.	Archivos wrfbdy_d01 y wrfinput_d01.	78
Figura 42.	Archivos wrfout.	78
Figura 43.	Archivos .ctl y .dat.....	79
Figura 44.	Open GrADS.....	80
Figura 45.	Comandos en Open GrADS.	81
Figura 46.	Pronóstico de velocidad del viento.	82
Figura 47.	Terminal o consola de GrADS.	83
Figura 48.	Mapa de la velocidad del viento promedio del 01 de febrero al 03 de febrero del 2024.	84
Figura 49.	Interfaz NASA POWER.....	84
Figura 50.	Descarga de datos para validar el modelo.....	85
Figura 51.	Interfaz NASA Giovanni.	87
Figura 52.	Velocidad Promedio del viento del 01 al 03 de enero del 2024	87
Figura 53.	Velocidad Promedio del viento del 01al 03 de febrero del 2024.....	88
Figura 54.	Velocidad Promedio del viento del 01 al 03 de marzo del 2024.	89
Figura 55.	Grados de desempeño estadístico del modelo de pronóstico del viento.	91
Figura 56.	Datos de pronóstico vs datos reales del 01 al 03 de enero.	93

Figura 57.	Datos de pronóstico vs datos reales del 01 al 03 de febrero.	96
Figura 58.	Datos de pronóstico vs datos reales del 01 al 03 de marzo.....	98



Índice de tablas

Tabla 1.	Componentes principales de un parque eólico	28
Tabla 2.	Diferentes horizontes de pronóstico y su aplicación.....	36
Tabla 3.	Archivos generados por el Sistema de Pronóstico Climático NCEP	62
Tabla 4.	Velocidad del viento en La Mata del 01 al 03 de enero del 2024.	93
Tabla 5.	Métricas de error del modelo 01 al 03 de enero.	94
Tabla 6.	Velocidad del viento en La Mata del 01 al 03 de febrero del 2024.	95
Tabla 7.	Métricas de error del modelo del 01 al 03 de febrero.	96
Tabla 8.	Velocidad del viento del 01 al 03 de marzo del 2024.	98
Tabla 9.	Métricas de error del modelo del 01 al 03 de marzo.	99



Capítulo 1

1.1. Introducción

En el actual panorama global, caracterizado por la imperante necesidad de migrar hacia fuentes de energía sostenibles ante el crecimiento incesante de la crisis climática, el año 2023 se distinguió como el mejor año de la historia por la incorporación a las redes eléctricas de nueva capacidad eólica adicional de 117 GW a nivel mundial. Este aumento significativo ha elevado la capacidad total instalada a la impresionante cifra de 1021 GW, representando un crecimiento del 50% con respecto al 2022. Las estadísticas oficiales indican que China lidera de manera destacada el mercado mundial de energía eólica, seguida de cerca por Estados Unidos, Alemania y la India. Además, las proyecciones del Global Wind Energy Council (GWEC) señalan que en el periodo de 2024-2030 se estima que se tenga un crecimiento de un 10% hasta alcanzar los 1210 GW, gracias a la implementación de las políticas industriales en las principales economías del mundo [1].

Estas perspectivas optimistas se extienden en el tiempo, ya que el Consejo Mundial de Energía Eólica, por sus siglas en inglés GWEC, pronostican que para cumplir con esta meta ambiciosa, la industria eólica debe triplicar su crecimiento anual de 117 GW de nueva capacidad instalada en 2023 a por lo menos 320 GW mirando hacia el horizonte de 2030 y así poder cumplir con los objetivos establecidos en la 28ª Conferencia anual de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP28), celebrada en Dubái (Emiratos Árabes Unidos) del 30 de noviembre al 12 de diciembre de 2023 [1].

Este crecimiento sostenible a nivel global se refleja en México, que continúa desempeñando un papel destacado en la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles. En este contexto, es importante destacar que el país emerge como un actor prominente al albergar uno de los potenciales más robustos para la generación de energía eólica. Durante el transcurso del año 2023, la capacidad instalada en el país experimentó un incremento significativo que alcanzó una capacidad total de 7,413 megavatios y para 2024 se contó con 7683 megavatios [2]. La producción total de

electricidad mediante energía renovable en México es del 25%, por lo que la energía eólica representa el 6% de generación total de electricidad en México [3].

La participación activa de México en el proceso de transición hacia fuentes de energía más limpias está respaldada por el Acuerdo de París [4]. Este compromiso establece metas ambiciosas, entre las que se destaca la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 22% para el año 2030 y un impactante 51% en las emisiones de carbón negro. Este cambio significativo hacia las energías renovables ha sido impulsado por la reforma energética de 2013 en México, que abrió las puertas a la inversión privada en el sector y contribuyó de manera substancial a la reducción de los costos asociados con las tecnologías de energías renovables [5].

Ratificando nuestro país el compromiso con la acción climática global a través de su participación en la reciente COP28, donde no solo respaldó el establecimiento de un fondo para pérdidas y daños, sino que también asumió un papel activo en el primer balance global del Acuerdo de París. Este ejercicio de evaluación es crucial para identificar avances y áreas de oportunidad en la lucha contra el cambio climático. Además, al unirse al Compromiso Mundial sobre energías renovables y eficiencia energética, México se comprometió a triplicar su capacidad de generación de energías limpias para 2030, alineándose con las metas internacionales para una transición energética justa y equitativa [6].

El papel estratégico desempeñado por el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) de México como operador independiente del sistema eléctrico adquiere un valor trascendental al supervisar el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM). En este contexto, los parques eólicos asumen la responsabilidad crucial de proporcionar pronósticos precisos de la potencia generada por sus unidades de Energías Renovables Variables (ERv). Este compromiso se presenta como fundamental para salvaguardar la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico a nivel nacional [7].

Uno de los escenarios más prometedores para la generación de energía a partir del viento en México se encuentra en estados como Oaxaca, Yucatán y Tamaulipas, donde se han registrado velocidades del viento superiores a 8 m/s y factores de planta

cercanos al 45%. Esta destacada capacidad eólica posiciona a estas regiones como líderes en el potencial de generación eléctrica mediante recursos eólicos en el país. Específicamente, el estado de Oaxaca se distingue como uno de los lugares más idóneos no solo en México sino en todo el continente americano para aprovechar la energía del viento, especialmente en la conocida región del Istmo de Tehuantepec. En esta área, la velocidad promedio del viento alcanza los 8.5 m/s a una altura de 50 metros, convirtiéndola en una de las ubicaciones más propicias para la explotación de la energía eólica [8].

Estas condiciones excepcionales han impulsado la iniciativa de desarrollar un modelo de pronóstico a mesoescala en La Mata, Oaxaca, utilizando la plataforma de software de código abierto Weather Research and Forecasting (WRF). El propósito principal de este proyecto es estimar con precisión la velocidad del viento y, por ende, prever la potencia generada por un parque eólico en La Mata, Oaxaca.

Este trabajo de investigación se estructura de 5 capítulos, comenzando con esta introducción que establece los objetivos y la importancia del proyecto. Los siguientes capítulos abordarán aspectos metodológicos, revisión teórica y análisis de resultados, con el fin de contribuir al avance de la generación de energía eólica en México y la región de La Mata, Oaxaca.

1.2. Planteamiento del Problema

Desde la implementación de la reforma en 2013, el CENACE (Centro Nacional de Control de Energía) ha establecido requisitos rigurosos para los concesionarios, exigiéndoles la presentación de pronósticos de la potencia generada por cada unidad de Energía Renovable Variable (ERv). Esta exigencia ha impulsado a los concesionarios a desarrollar estrategias y modelos de pronóstico.

Según lo estipulado por la legislación, los concesionarios deben contar con dos tipos de pronósticos. En primer lugar, el denominado intermitente-horario, que tiene un horizonte temporal de siete días y se emplea para la planificación del despacho de energía a mediano plazo. En segundo lugar, el intermitente-quinceminutal, con un horizonte temporal de 2.5 horas, destinado al despacho de energía a corto plazo. Estos requisitos legales han impulsado a los actores del sector a implementar enfoques predictivos avanzados para cumplir con las normativas y optimizar la gestión de la generación de energía [9].

La generación de energía eólica se enfrenta a desafíos significativos en comparación con las fuentes de energía tradicionales. La producción de energía a partir del viento está intrínsecamente vinculada a la velocidad variable y cambiante del viento, lo que complica su regulación en tiempo y espacio. La ausencia de un método eficaz para almacenar la energía eólica implica su entrega inmediata a la red eléctrica, imponiendo a las compañías de energía eólica la obligación legal de reportar su producción para contribuir a la planificación eléctrica del Sistema Nacional.

Esta incertidumbre en los pronósticos proporcionados por las centrales generadoras ha creado inseguridad en la gestión de los sistemas de distribución de energía. Tanto los responsables de las centrales como los operadores de sistemas buscan soluciones a este problema, que van desde la mejora de los pronósticos internos hasta la contratación de servicios de pronóstico externos, incluida la posibilidad de recurrir a empresas extranjeras. Este enfoque se deriva principalmente de la falta de investigación y desarrollo en México en el ámbito de los pronósticos de Energías Renovables Variables.

La creciente importancia de la energía eólica, tanto a nivel mundial como en México, ha subrayado la necesidad urgente de contar con pronósticos más precisos y confiables para la generación de electricidad. La implementación de tecnologías renovables, como la energía eólica, exige una gestión avanzada que garantice la eficiencia y estabilidad del sistema eléctrico. En este contexto, surge la problemática central de la falta de confiabilidad en los pronósticos de Energías Renovables Variables, lo que representa un obstáculo significativo para la planificación y operación eficientes del sistema eléctrico mexicano.

El factor crítico para la generación de energía eólica es la velocidad del viento. Comprender y predecir con precisión la velocidad del viento es esencial para identificar ubicaciones óptimas para la instalación de parques eólicos y maximizar la eficiencia de los aerogeneradores.

La predicción del viento es una tarea esencial en varios campos, y una herramienta clave para llevar a cabo estas predicciones con precisión es la modelación numérica. Esta utiliza modelos matemáticos y computacionales avanzados para simular la dinámica atmosférica y prever la velocidad y dirección del viento en distintas ubicaciones y momentos. La necesidad de abordar estos desafíos resalta la importancia de una investigación y desarrollo continuos en el campo de pronósticos de energía eólica para mejorar la confiabilidad y eficiencia del sistema eléctrico mexicano.

Ante la problemática identificada previamente, se propone la iniciativa actual, que se centra en desarrollar un modelo para prever la velocidad del viento en La Mata, Oaxaca. Esta ubicación se distingue por su potencial eólico aprovechable [8], según lo revelan el histórico de mediciones obtenidas de la región, lo que sugiere la viabilidad de establecer una central eólica en esta región. Con este proyecto, se busca abordar los desafíos asociados con la generación de energía eólica al anticipar y comprender la dinámica del viento en este sitio específico.

La construcción del modelo para pronosticar la velocidad del viento se llevará a cabo mediante el uso del software de plataforma libre conocido como Weather Research and Forecasting (WRF). Este programa, diseñado para el modelado numérico de la

atmósfera, se selecciona debido a sus capacidades avanzadas, aunque se reconoce que la precisión del modelo depende en gran medida del progreso en las capacidades computacionales. Al obtener la velocidad pronosticada por el modelo, se realizará la conversión a potencia generada, empleando la curva de potencia específica del aerogenerador. Este enfoque integral garantizará una estimación más precisa y detallada de la generación de energía eólica en La Mata, Oaxaca.

1.3. Estado del arte

En la búsqueda constante por mejorar la precisión en la predicción de la velocidad del viento, se ha destacado la relevancia del modelo Weather Research and Forecasting. Este software de modelado numérico atmosférico ha sido ampliamente utilizado en investigaciones recientes, donde se exploran diversas configuraciones para prever con mayor exactitud las condiciones eólicas a nivel de mesoescala. A través de su versatilidad y capacidad para adaptarse a diferentes escenarios climáticos, el WRF ha emergido como una herramienta esencial en la investigación de la energía eólica. En este contexto, examinaremos contribuciones clave que han empleado el WRF para avanzar en la predicción de la velocidad del viento, destacando su papel fundamental en el desarrollo de modelos más precisos y eficientes [10].

En análisis recientes que exploran la predicción de la velocidad del viento a mesoescala utilizando el software WRF con diversas configuraciones, se encuentran varias contribuciones destacadas como Roque et al. [11] quien resalta la eficacia del WRF para generar pronósticos de viento altamente precisos, especialmente cuando se emplean resoluciones de 1 km. Cong [12] presenta en su estudio métodos estadísticos y modelos de predicción numérica para mejorar los pronósticos eólicos, centrándose en la evaluación de la distribución espacial y utilizando métricas de error de pronóstico. Businger [13] lleva a cabo una evaluación del WRF para aplicaciones de energía eólica en las Islas Hawaianas, subrayando su capacidad para indicar estimaciones de viento favorables. El-Samra [14] realiza un análisis que destaca la habilidad del WRF para capturar la variabilidad climática y establecer diferencias estacionales.

Le Roux [15], en su investigación, sugiere el uso de métodos estadísticos debido a la intensidad computacional del WRF. Zhenhua et al. [16] logran mejorar los pronósticos de velocidad del viento al emplear parámetros óptimos en el WRF. Fernández et al. [17] lleva a cabo una comparación entre datos del Sistema de Pronóstico Global de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP-GFS) y del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Medio Plazo (ECMWF), concluyendo que la

configuración óptima depende de la ubicación y condiciones meteorológicas del sitio de estudio.

Por otro lado, la validación de los resultados del WRF también es un componente fundamental para garantizar su precisión y utilidad en aplicaciones prácticas. Diversos estudios han empleado datos observacionales de estaciones meteorológicas y satélites; Kalnay et al. [18] emplea la base de datos de reanálisis del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) y Zhong Liu et al. [19] utiliza datos satelitales de NASA Giovanni, estas fuentes proporcionan información detallada sobre la dinámica del viento a nivel global, indispensable para evaluar la precisión de los pronósticos generados por el modelo.

Para medir esta precisión de los pronósticos del viento generados por modelos numéricos, en investigaciones previas, se han empleado diversas métricas de error. Las métricas más comunes incluyen el Error Promedio Absoluto (MAE) y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), que permiten medir la magnitud del error en las predicciones y evaluar el desempeño promedio del modelo. Según Willmott y Matsuura [20], el MAE es una medida más apropiada para describir el error promedio debido a su naturaleza no ambigua y su menor sensibilidad a valores extremos, en contraste con el RMSE, que está influenciado por la variabilidad dentro de la distribución de errores y el tamaño de la muestra. Además, métricas como el Coeficiente de Correlación de Anomalías (ACC) son ampliamente utilizadas para evaluar la capacidad de los modelos numéricos de capturar las variaciones temporales del viento.

Estas métricas cuantitativas, combinadas con análisis cualitativos mediante la visualización de datos de pronóstico y observacionales, ofrecen una evaluación integral de la capacidad de los modelos para reflejar las condiciones atmosféricas reales. Es crucial resaltar que la mayoría de estas investigaciones enfatizan la importancia de configuraciones específicas adaptadas al sitio de estudio y las condiciones climáticas, subrayando la resolución como un parámetro clave. Estas valiosas observaciones servirán como guía fundamental en el desarrollo de la presente investigación.

1.4. Hipótesis

Es posible generar un modelo numérico del sitio de la Mata, Oaxaca, utilizando el software de plataforma abierta denominado Weather Research and Forecast (WRF) para generar modelos de pronósticos de la velocidad del viento con fines de despacho de energía en la región.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Conformar un modelo a mesoescala para la predicción de la velocidad del viento a mediano plazo en la Mata Oaxaca.

1.5.2. Objetivos Específicos

1. Realizar una valoración del estado del arte y del estado actual de la energía eólica.
2. Estudiar el sitio seleccionado y obtener el histórico de mediciones de la velocidad del viento en la región.
3. Explorar el software Weather Research and Forecast (WRF) y generar un modelo numérico a mesoescala utilizando la herramienta para pronosticar la velocidad del viento en la región de La Mata, Oaxaca, con un rango de pronóstico a mediano plazo.

1.6. Justificación

La urgencia de abrazar fuentes de energía limpias en medio de la crisis climática ha catapultado a la energía eólica como un pilar crucial en la matriz energética mundial, constituyendo actualmente una parte significativa de la capacidad eléctrica mundial proveniente de fuentes renovables. La industria eólica a nivel internacional está dirigiendo su atención hacia naciones en desarrollo que cuentan con ubicaciones favorables para la implementación de parques eólicos. En este contexto, el proyecto que se propone aborda un elemento clave para el funcionamiento eficiente de la generación eólica: las velocidades de viento requeridas para activar las turbinas eólicas.

La esencia de la generación eólica radica en la capacidad de las turbinas para transformar la fuerza del viento en electricidad. Para comprender este proceso, es esencial adentrarse en las velocidades específicas que desencadenan la activación óptima de las turbinas. En términos generales, las turbinas eólicas inician su operación con velocidades de viento que oscilan entre 3 y 5 metros por segundo (m/s). No obstante, para alcanzar su eficiencia máxima, estas turbinas anhelan velocidades que varían entre 12 y 25 m/s [21].

Diversos factores influyen en las velocidades de viento necesarias, siendo el diseño de la turbina uno de los elementos más cruciales. La forma y estructura de las palas impactan directamente en el rango de velocidades óptimas. Además, el tipo de turbina juega un papel destacado; las turbinas de velocidad variable, por ejemplo, presentan requisitos distintos a las de velocidad constante [21].

Conocer estas velocidades de viento no solo es un ejercicio teórico. Más bien, se traduce en eficiencia operativa y planificación precisa de proyectos. La eficiencia operativa se maximiza al ubicar turbinas en lugares con velocidades de viento consistentes, asegurando así una generación constante de energía. En el ámbito de la planificación, entender estas velocidades permite la disposición estratégica de turbinas en parques eólicos, estimando con precisión la producción energética.

A medida que avanzamos hacia un futuro más sostenible, la tecnología eólica continúa evolucionando. Investigar y comprender las velocidades de viento necesarias

se presenta como un camino hacia la mejora constante de esta forma de generación de energía. Este proyecto se inserta en este contexto dinámico, buscando contribuir al conocimiento y desarrollo de tecnologías que aprovechen al máximo el potencial de la energía eólica en La Mata, Oaxaca. En esta región, donde la fuerza del viento es un recurso valioso, se plantea la creación de un modelo de pronóstico a mesoescala utilizando el software WRF, con el objetivo de prever con mayor precisión las velocidades del viento y, por ende, optimizar la generación de energía.

Capítulo 2

2. Marco Teórico

2.1. La atmósfera

La atmósfera es una envoltura gaseosa que rodea la Tierra, vital para la vida tal como la conocemos. Su composición heterogénea y estructura estratificada la convierten en un componente esencial para la existencia y regulación del clima.

De manera general, la atmósfera de la Tierra se segmenta en dos regiones principales: la baja, que se estudia en meteorología, y el alta, abordada por la aeronomía. Este medio gaseoso que rodea nuestro planeta exhibe una variabilidad marcada en presión y temperatura conforme ascendemos en altitud. Son precisamente estas variaciones las que permiten identificar y distinguir las diversas capas que componen la atmósfera (Figura 1).

La atmosfera terrestre se compone de las siguientes capas [22]:

- **Troposfera:** La troposfera es la capa más cercana a la superficie terrestre, extendiéndose aproximadamente hasta 8-15 kilómetros de altitud. En esta región, ocurren la mayoría de los fenómenos meteorológicos, como lluvias, tormentas y vientos. A medida que ascendemos en esta capa, la temperatura disminuye.
- **Estratosfera:** Sobre la troposfera se encuentra la estratosfera, que se extiende hasta aproximadamente 50 kilómetros de altura. En esta capa, la temperatura aumenta con la altitud debido a la absorción de radiación ultravioleta por el ozono. Aquí es donde encontramos la capa de ozono, crucial para filtrar la radiación solar dañina.
- **Mesosfera:** La mesosfera abarca desde la altitud de la estratosfera hasta aproximadamente 85 kilómetros. En esta región, la temperatura vuelve a descender a medida que ascendemos. La mesosfera es conocida por ser la

capa donde los meteoroides se desintegran al entrar en la atmósfera, creando las estrellas fugaces.

- **Termosfera:** La termosfera se extiende hasta 600 kilómetros de altitud y es caracterizada por una temperatura que aumenta significativamente con la altura debido a la absorción de radiación solar. En esta capa, los fenómenos atmosféricos como las auroras boreales y australes se hacen evidentes.
- **Exosfera:** La exosfera es la capa exterior de la atmósfera, fusionándose gradualmente con el espacio exterior. Aunque la densidad de partículas es extremadamente baja en esta región, aún contiene algunas moléculas de gas. Es aquí donde los satélites orbitan la Tierra.

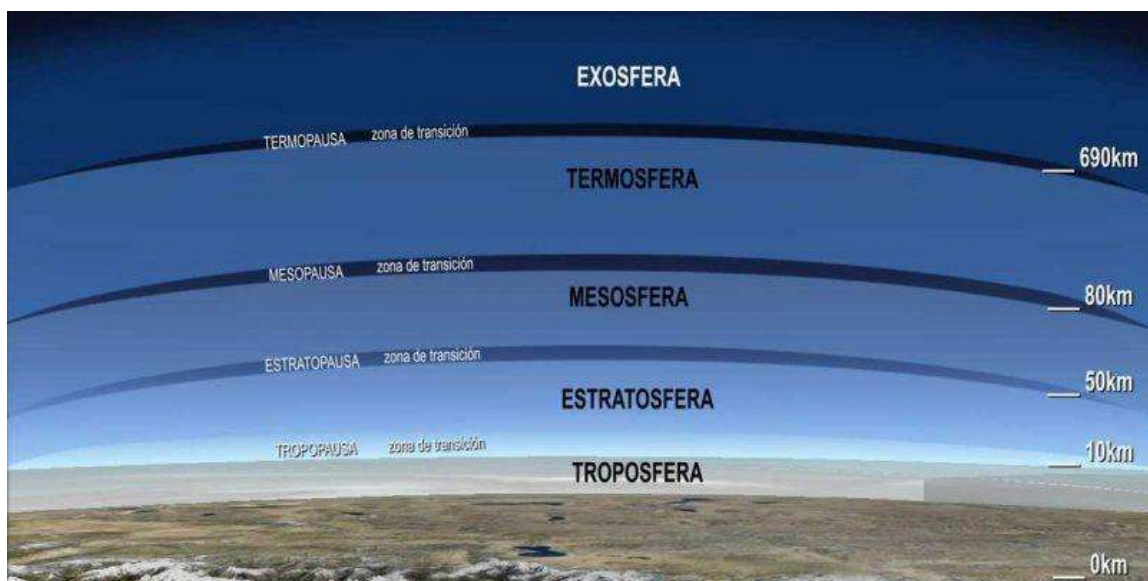


Figura 1. Capas de la Atmósfera [22].

Estas capas, distintas en sus características y funciones, colaboran en la creación de un sistema complejo y dinámico que sustenta la vida en la Tierra. La atmósfera, con sus diversas capas, no solo regula el clima, sino que también protege nuestro planeta de la radiación solar excesiva, contribuyendo así a mantener las condiciones óptimas para la existencia de vida.

2.2. Viento y circulación general de la atmósfera

La generación de viento y, por ende, la energía eólica, encuentra sus raíces en la compleja interacción de dos elementos fundamentales: las masas de aire y la presión atmosférica. Este fenómeno se desencadena por la rotación del planeta y las variaciones de temperatura entre la tierra y el mar. El viento, portador de energía cinética, se convierte en una fuente aprovechable mediante molinos de viento y aerogeneradores, que transforman este movimiento en electricidad.

Es por ello que la generación de energía eólica se encuentra intrínsecamente vinculada a la naturaleza variable del viento, un fenómeno que presenta desafíos y oportunidades fundamentales en la eficiencia operativa de los parques eólicos. La velocidad y dirección del viento, elementos esenciales para la producción de energía, experimentan fluctuaciones constantes en escalas temporales cortas y largas, planteando así demandas significativas en términos de pronóstico y optimización.

La variabilidad del viento, en su esencia, se origina en los movimientos de masa de aire a escala global, resultado de la forma irregular en que el sol calienta la atmósfera terrestre. En las regiones ecuatoriales, donde el aire se calienta de manera más pronunciada, este se vuelve menos denso y más ligero, ascendiendo hacia los polos, donde el aire es más frío cerca de la superficie. Cerca de las latitudes de 30°N y 30°S, este movimiento se detiene, dando lugar a un flujo de retorno de aire frío en las capas inferiores [23].

El calentamiento solar desigual de la tierra y el mar establece las diferencias de temperatura cruciales para la circulación atmosférica. La atmósfera responde a estas variaciones térmicas, desencadenando movimientos de convección que dan forma a los patrones del viento, como se muestra en la Figura 2.

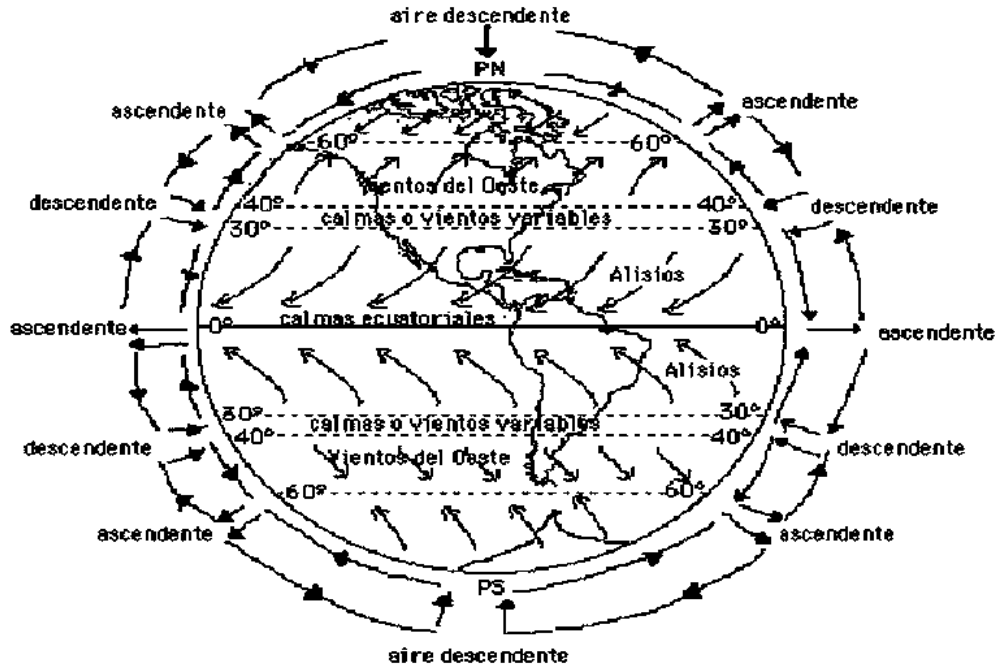


Figura 2. Circulación Atmosférica General [24].

En otras palabras, la energía solar es un factor importante en el proceso de formación del viento, ya que el aire caliente, al ser más liviano que el frío, asciende, generando un vacío que, por naturaleza, busca el equilibrio. Este movimiento, conocido como circulación convectiva, impulsa el aire de abajo hacia arriba y viceversa, creando el viento. Este fenómeno se complica en la realidad debido a la presencia de obstáculos en la superficie terrestre, como bosques, ciudades, montañas y océanos, que introducen variaciones en las trayectorias, velocidades y temperaturas del viento [23].

Las zonas donde el aire desciende generan áreas de alta presión, mientras que las zonas de ascenso crean áreas de baja presión. Este gradiente horizontal de presiones impulsa el movimiento del aire desde las áreas de alta presión hacia las de baja presión, definiendo así la velocidad y dirección del viento. Un gradiente de presión más pronunciado resulta en una mayor velocidad del viento.

La fuerza del viento, medida en nudos o kilómetros por hora a través de la escala de Beaufort, se convierte en energía eólica. La generación de viento involucra múltiples fuerzas, como la interacción con obstáculos geográficos, que provocan ascensos y descensos del aire. Por ejemplo, cuando una masa de aire encuentra una montaña, la

parte inferior tiende a elevarse, deslizándose por la pendiente y generando presión y fricción. En este proceso, el aire se calienta y pierde humedad, creando condiciones ideales para el desarrollo del viento cálido, conocido como Favonio [23].

2.3. Efecto Coriolis en la circulación general de la atmósfera

Un elemento esencial en la comprensión de la circulación atmosférica es el efecto Coriolis, una fuerza derivada de la rotación de la Tierra. Este fenómeno añade una dimensión crucial a la mecánica del viento, impactando su dirección y trayectoria a través de la atmósfera.

La rotación terrestre afecta de manera única al comportamiento del viento en cada hemisferio. Como se muestra en la Figura 3, en el hemisferio norte, el efecto Coriolis desvía el viento hacia la derecha, mientras que, en el hemisferio sur, lo desvía hacia la izquierda. Esta aparente deflexión se intensifica hacia los polos y disminuye cerca del ecuador [24].

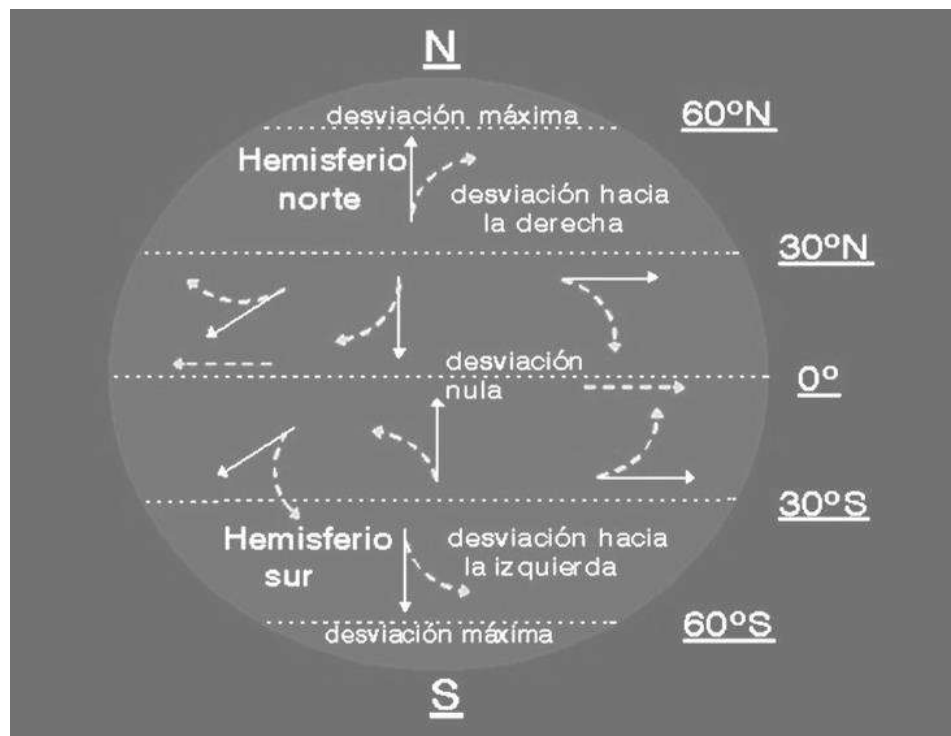


Figura 3. Desviación del aire por Efecto Coriolis [24].

La explicación fundamental de este fenómeno radica en la conservación del momento angular. Dado que la Tierra rota más rápidamente en el ecuador que en los polos, las partículas de aire cerca del ecuador se desplazan a una velocidad angular superior que las partículas cercanas a los polos. Cuando el aire se mueve desde una región de mayor velocidad angular a una de menor velocidad, se produce una desviación aparente debido a la conservación de este momento angular.

Este efecto tiene un impacto directo en la circulación atmosférica a nivel global y local. A nivel mundial, contribuye a la formación de los vientos alisios, que soplan desde áreas de alta presión hacia áreas de baja presión, desviándose gracias al efecto Coriolis. En escalas más pequeñas, influye en la formación de sistemas de baja y alta presión, modelando la dirección en la que se desarrollan las tormentas y las áreas de calma. Por lo que el efecto Coriolis añade complejidad a la circulación del viento en la atmósfera terrestre y es un componente esencial para entender los patrones climáticos y las trayectorias de los sistemas meteorológicos en nuestro planeta [24].

La formación del viento se ve influenciada tanto por la circulación local, donde el sol calienta la superficie terrestre de manera desigual, provocando zonas de alta y baja presión y generando el movimiento del aire, como por la circulación mundial, que se ve afectada por el efecto Coriolis debido a la rotación del planeta. La combinación de estos factores y las variaciones estacionales crea un sistema complejo de movimientos de aire en todo el planeta, ejerciendo un efecto estabilizador en el clima mundial. Este fenómeno, esencial para entender la naturaleza variable del viento, se integra como parte del marco teórico que respalda la generación de energía eólica y su pronóstico preciso.

En este contexto, la implementación de tecnologías avanzadas, como el software Weather Research and Forecasting (WRF), se vuelve esencial para modelar con precisión la complejidad de la variabilidad del viento. La capacidad de anticipar patrones y tendencias en la velocidad del viento a diferentes escalas temporales y geográficas se convierte en un componente clave para desarrollar estrategias efectivas de pronóstico y optimización en la generación de energía eólica.

En resumen, la comprensión de la variabilidad del viento, desde sus raíces en los movimientos atmosféricos globales hasta sus efectos locales en la generación de energía

eólica, es esencial para abordar los desafíos y aprovechar las oportunidades que este fenómeno presenta en el ámbito energético. La conjugación de conocimientos atmosféricos, tecnologías avanzadas y estrategias de modelado se convierte así en un enfoque integral para avanzar hacia una generación de energía eólica más eficiente y sostenible.

2.4. Escalas Espaciales

Las escalas espaciales en meteorología se refieren a las dimensiones físicas de los fenómenos atmosféricos y climáticos que ocurren en la atmósfera terrestre. Este espectro dimensional proporciona una base para entender los procesos atmosféricos que dan forma al clima en la Tierra. Estos procesos varían en tamaño, desde pequeñas escalas locales hasta fenómenos de escala global. Algunas de las escalas espaciales más relevantes son las siguientes [10]:

1) Microescala:

En la microescala, los fenómenos atmosféricos se manifiestan en dimensiones menores a 1 km y con duración de alrededor de una hora o menos. Aquí, la turbulencia atmosférica gobierna los movimientos del aire, dando lugar a corrientes ascendentes y descendentes que dan forma a la dinámica de la atmósfera en escalas muy locales. La formación de nubes individuales y la interacción con la topografía cercana definen este reino microscópico de la atmósfera.

2) Mesoescala:

En la mesoescala observamos fenómenos atmosféricos de mayor envergadura, que abarca dimensiones de 10 a 100 km, con duración de horas o días. Tormentas locales, sistemas de nubosidad y vientos influenciados por la topografía emergen como protagonistas. Esta escala conecta lo local con lo regional, siendo crucial para comprender la variabilidad climática en áreas geográficas específicas.

3) Macro escala o Sinóptica:

La macro escala, que se extiende de 100 a 1,000 km con duraciones de hasta años, nos sumerge en la observación de sistemas meteorológicos de gran envergadura.

Frentes atmosféricos, ciclones y anticiclones, así como patrones climáticos a gran escala, definen esta escala sinóptica. Es en este reino donde se gestan los eventos meteorológicos que influyen significativamente en las condiciones climáticas locales y regionales.

4) Escala Planetaria o Global:

A una escala superior a 5,000 km, la atmósfera revela sus secretos a nivel global. Corrientes oceánicas, patrones climáticos mundiales como El Niño y La Niña, y la circulación general de la atmósfera dan forma a la climatología a nivel planetario. Esta escala proporciona la perspectiva integral necesaria para comprender cómo los elementos atmosféricos interactúan globalmente entre sí.

5) Escala Sinóptica Global:

En la escala sinóptica global, que abarca todo el planeta, la compleja relación de la circulación atmosférica a nivel mundial se despliega. La interacción de grandes masas de aire, la formación de sistemas climáticos globales y la influencia de fenómenos a escala global definen esta perspectiva holística. Es en esta escala donde se gestan los patrones climáticos que moldean la vida en la Tierra.

Estas escalas son fundamentales para entender la complejidad de los fenómenos atmosféricos y cómo interactúan a diferentes niveles. Los meteorólogos y climatólogos utilizan modelos y observaciones a diversas escalas para realizar predicciones climáticas, estudiar eventos extremos y comprender los patrones climáticos a nivel local y global.

2.5. Modelo de Mesoescala

En la búsqueda de comprender los fenómenos atmosféricos en escalas intermedias, los modelos de mesoescala se erigen como herramientas fundamentales. Estos modelos, con su capacidad para representar detalles a niveles que se sitúan entre lo micro y lo macro, nos comparten los secretos de tormentas locales, vientos regionales y patrones climáticos específicos, por lo que estos modelos juegan un papel esencial en la meteorología moderna.

Los modelos de mesoescala son herramientas numéricas utilizadas para simular y prever fenómenos atmosféricos en una escala que abarca desde unos pocos kilómetros hasta alrededor de 100 km. Estos modelos llenan la brecha entre los modelos de microescala, que se centran en eventos locales, y los modelos de escala sinóptica, que abarcan áreas más extensas [10].

Estos modelos se utilizan para la predicción a corto plazo, es decir de 1 a 3 días y en periodos de mediano plazo que va de los 3 a los 10 días y cuentan con las siguientes características principales:

- 1. Resolución Espacial Finamente Ajustada:** La clave de la eficacia de los modelos de mesoescala radica en su capacidad para dividir la atmósfera en una malla de puntos de alta resolución espacial. Esto permite la representación detallada de características locales como montañas, cuerpos de agua y centros urbanos.
- 2. Incorporación de Características Topográficas:** La topografía local tiene un impacto significativo en los patrones atmosféricos de mesoescala. Estos modelos consideran detalladamente la influencia de montañas, valles y costas, proporcionando una visión más precisa de cómo la geografía afecta el clima en regiones específicas.
- 3. Interacción Atmosfera-Superficie:** Los modelos de mesoescala se centran en la interacción compleja entre la atmósfera y la superficie terrestre. Esto incluye la variación de la vegetación, el tipo de suelo y la distribución de la cobertura del suelo, elementos que influyen en la transferencia de energía y humedad.

Dentro de las aplicaciones prácticas de los modelos de mesoescala se destacan las siguientes tres [10]:

- 1. Pronóstico del Tiempo Local:** Estos modelos permiten pronósticos más precisos para eventos meteorológicos de corto plazo, como tormentas locales, nevadas y fenómenos extremos.

2. Estudios de Calidad del Aire: La capacidad de modelar detalladamente la dispersión de contaminantes a nivel local hace que estos modelos sean cruciales para evaluar la calidad del aire en áreas urbanas.

3. Planificación de Energía Renovable: Al considerar la variabilidad local del viento y la radiación solar, los modelos de mesoescala son herramientas esenciales para la planificación eficiente de proyectos de energía renovable.

A pesar de su utilidad, los modelos de mesoescala enfrentan desafíos, como la necesidad de datos de entrada precisos y la complejidad computacional. Sin embargo, con avances tecnológicos y mejores datos observacionales, estos modelos continúan evolucionando para ofrecer pronósticos más certeros y contribuir a una comprensión más profunda de los procesos atmosféricos en escalas intermedias.

Existen varios tipos de modelos de mesoescala, cada uno diseñado para abordar aspectos específicos de la dinámica atmosférica en estas escalas; algunos de los tipos más comunes son los siguientes [10]:

1) Modelos Meteorológicos Regionales (MMR):

Cuando el objetivo es comprender los fenómenos atmosféricos a nivel regional con una resolución espacial fina, los Modelos Meteorológicos Regionales son muy importantes. Estos modelos, diseñados para áreas geográficas específicas, capturan con detalle las interacciones entre la atmósfera y la topografía local. Desde la predicción del tiempo en una ciudad hasta la evaluación de eventos meteorológicos extremos, los MMR nos brindan un pronóstico del tiempo a corto y mediano plazo de las regiones específicas.

2) Modelos de Flujo de Aire en Terreno Complejo (CFD):

En entornos urbanos o áreas montañosas, donde la topografía es compleja, los Modelos de Flujo de Aire en Terreno Complejo son los recomendados. Estos modelos de mesoescala se enfocan en analizar minuciosamente la interacción entre la atmósfera y estructuras terrestres complejas. Su alta resolución espacial permite estudiar la dispersión de contaminantes y entender cómo la topografía influye en los patrones del viento.

3) Modelos de Contaminación Atmosférica:

Cuando la preocupación se centra en la calidad del aire, los Modelos de Contaminación Atmosférica se convierten en aliados cruciales. Especializados en simular la dispersión de contaminantes, estos modelos de mesoescala integran datos detallados de calidad del aire y condiciones meteorológicas. Su aplicación abarca desde evaluar la calidad atmosférica en áreas urbanas hasta realizar estudios de impacto ambiental.

4) Modelos de Microescala Atmosférica:

Descendiendo a niveles aún más detallados, los Modelos de Microescala Atmosférica se concentran en fenómenos a pequeña escala, como los vientos locales y las condiciones micro climáticas. Con una resolución extremadamente alta, estos modelos de mesoescala son fundamentales para comprender la variabilidad del viento en entornos urbanos y para estudios de dispersión de olores.

5) Modelos Acoplados:

En la búsqueda de una comprensión holística, los Modelos Acoplados se destacan al integrar diferentes modelos atmosféricos. Al acoplar modelos de mesoescala con modelos de microescala, ofrecen una visión más completa de la dinámica atmosférica en diversas escalas, desde procesos regionales hasta fenómenos locales.

Cada tipo de modelo de mesoescala tiene sus propias fortalezas y limitaciones, y la elección del modelo dependerá de los objetivos específicos de la simulación o investigación.

2.6. Tipos de Pronóstico

Los pronósticos meteorológicos se clasifican en diferentes tipos según el horizonte temporal, el enfoque y la escala espacial. Aquí te presento una descripción general de los principales tipos de pronósticos [10]:

a) Pronóstico a Corto Plazo

- **Horizonte temporal:** Hasta 12 a 72 horas.

- **Características:** Se centra en eventos meteorológicos inmediatos y cambios atmosféricos a corto plazo. Utiliza datos actuales y observaciones para prever condiciones climáticas próximas.

b) Pronóstico a Mediano Plazo

- **Horizonte temporal:** De 3 días a 10 días.
- **Características:** Se proyecta más allá del corto plazo, considerando patrones atmosféricos más amplios. Utiliza modelos meteorológicos para anticipar condiciones climáticas en el medio plazo.

c) Pronóstico a Largo Plazo

- **Horizonte temporal:** Más de 10 días hasta aproximadamente 1 año.
- **Características:** Implica proyecciones a largo plazo basadas en tendencias climáticas históricas y modelos climáticos. Aunque menos precisos que los pronósticos a corto plazo, proporcionan una visión general del clima futuro.

d) Pronóstico Estacional

- **Horizonte temporal:** De meses a estaciones.
- **Características:** Se enfoca en prever patrones climáticos a lo largo de una temporada específica. Utiliza anomalías climáticas, como El Niño o La Niña, para hacer predicciones estacionales.

e) Pronóstico Climático

- **Horizonte temporal:** Años o décadas.
- **Características:** Examina tendencias climáticas a largo plazo basadas en datos históricos. Se utiliza para comprender patrones climáticos a largo plazo y evaluar el cambio climático.

f) Pronóstico Nowcasting

- **Horizonte temporal:** De dos o tres hasta 12 horas.

- **Características:** Se centra en predicciones muy cercanas al tiempo actual, utilizando tecnologías avanzadas para rastrear y prever eventos meteorológicos extremos, como tormentas intensas.

g) Pronóstico de Impacto

- **Horizonte temporal:** Variable.
- **Características:** Evalúa cómo las condiciones climáticas afectarán a sectores específicos, como la agricultura, la energía, el transporte, etc. Se utiliza para tomar decisiones informadas y mitigar riesgos.

h) Pronóstico Probabilístico

- **Características:** En lugar de prever un resultado específico, proporciona probabilidades de ocurrencia de diferentes condiciones climáticas. Útil para situaciones inciertas.

Estos tipos de pronósticos son esenciales para planificación, toma de decisiones y comprensión de los patrones climáticos en diferentes escalas temporales.

2.7. Energía Eólica

La energía eólica, una fuerza ancestral que ha sido moldeada por la humanidad a lo largo de los siglos, se ha convertido en una pieza clave en la transición hacia un futuro energético sostenible. Esta forma de energía se nutre de la capacidad ingeniosa de convertir la potencia cinética contenida en los vientos en electricidad, destacándose como una de las fuentes renovables más prometedoras.



Figura 4. Molino de viento del siglo XVII [25].

El uso de la energía eólica tiene raíces profundas en la historia de la humanidad. Desde los molinos de viento medievales que molían granos hasta las velas de barcos que exploraron mares desconocidos, los vientos han sido aliados incansables (Figura 4). Sin embargo, la transformación de la energía eólica en electricidad moderna se materializa con la invención de las turbinas eólicas.

Las turbinas eólicas, verdaderos gigantes tecnológicos, son la encarnación moderna de la captura de la energía eólica. Compuestas por majestuosas hélices que giran con el viento, estas estructuras transforman la energía cinética del viento en electricidad. Las dos formas principales de turbinas eólicas son las de eje horizontal y las de eje vertical, cada una con sus propias características y aplicaciones específicas (Figura 5).



Figura 5. Turbinas eólicas [26].

El principio fundamental de operación de una turbina eólica se basa en la captura de la energía cinética del viento. Las hélices, también conocidas como palas, giran al recibir la fuerza del viento, activando un rotor conectado a un generador eléctrico. Este proceso convierte la energía mecánica en electricidad, que luego se integra a la red eléctrica para abastecer hogares, industrias y comunidades [21].

La energía eólica presenta una serie de ventajas que la posicionan como una alternativa atractiva en la matriz energética; es una fuente abundante y renovable, sin emisiones directas de gases de efecto invernadero durante la generación de electricidad. Sin embargo, enfrenta desafíos, como la variabilidad de la velocidad del viento y la necesidad de ubicaciones estratégicas para garantizar un rendimiento eficaz.

La energía eólica, en su interacción constante con el viento, representa una respuesta crucial a la necesidad imperante de reducir las emisiones de carbono y

avanzar hacia un futuro más sostenible. La investigación y desarrollo en este campo, incluido el modelado preciso de las condiciones atmosféricas, son esenciales para desbloquear todo el potencial de esta fuente de energía limpia y renovable.

2.8. Parque eólico

Los parques eólicos son instalaciones estratégicamente ubicadas que aprovechan la fuerza del viento para generar energía eléctrica de manera sostenible; estos, pueden extenderse tanto en tierra (onshore) como en el mar (offshore). Este método innovador de generación de energía ha ganado protagonismo en la transición hacia fuentes renovables, contribuyendo significativamente a la diversificación de la matriz energética [27].

La localización es crucial para el buen funcionamiento del parque, ya que se requiere un viento constante y fuerte con lo que garantizará un mayor rendimiento en la generación de electricidad. La velocidad mínima del viento requerida para que un aerogenerador comience a girar suele estar entre 3-4 m/s y para proyectos eólicos más amplios, la velocidad media anual del viento debe situarse como mínimo en 5 m/s.



Figura 6. Funcionamiento de un parque eólico [27].

En la Figura 6, se observa el funcionamiento de un parque eólico, donde las aspas de la turbina impulsadas por el viento, activan un generador que produce electricidad y esta es transformada y distribuida a la red eléctrica. La generación de electricidad en un parque eólico con varios generadores se resume en los siguientes 3 pasos [27]:

- 1. Captación del viento:** las aspas de la turbina (las turbinas son las estrellas del parque eólico), con sus altas estructuras y palas giratorias, capturan la energía cinética del viento. Están diseñadas aerodinámicamente para ser eficientes a diversas velocidades de viento. La mayoría de las turbinas cuentan con sistema de control que ajusta automáticamente su orientación para enfrentar el viento de manera óptima, es decir, ajusta automáticamente el ángulo de las palas para optimizar la producción de energía en respuesta a las variaciones del viento.
- 2. Conversión de energía:** las palas en movimiento accionan un rotor conectado a un generador, este proceso transforma la energía mecánica en energía eléctrica, inicialmente en corriente alterna (CA). Posteriormente el multiplicador aumenta la velocidad de rotación del eje lento de las aspas al eje rápido necesario para el generador.
- 3. Transformación y Transmisión:** un transformador eleva el voltaje para facilitar la transmisión eficiente a través de líneas de transmisión y finalmente la electricidad se inyecta en la red eléctrica para su distribución y consumo.

Los elementos principales de una instalación eólica son las turbinas, subestaciones, sistemas de control y la infraestructura de conexión a la red eléctrica (Tabla 1).

Elemento parque eólico	Función
Turbinas	Conversión de energía del viento en eléctrica
Subestaciones	Transformación y distribución de energía
Sistema de control	Monitoreo y operación del parque
Infraestructura de conexión	Conexión con la red eléctrica

Tabla 1. Componentes principales de un parque eólico [27].

Se implementan también sistemas de monitoreo avanzados que desempeñan un papel fundamental en la supervisión constante de su rendimiento. Estos sistemas están diseñados meticulosamente para evaluar diversos parámetros, desde la velocidad del viento hasta la producción eléctrica. La recopilación y análisis de estos datos permiten identificar posibles anomalías y tendencias que podrían afectar el rendimiento a lo largo del tiempo.

Los parques eólicos, con su formación de turbinas, no solo son testimonios visuales de la innovación tecnológica, sino también son catalizadores de un futuro energético más limpio y sostenible, desempeñando un papel crucial en la transición hacia una matriz energética más sostenible, proporcionando una fuente de energía renovable y contribuyendo a la mitigación del cambio climático, ya que la energía eólica es una fuente limpia y renovable, que ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuye la dependencia de combustibles fósiles.

2.9. Curvas de Potencia de un Aerogenerador

Las curvas de potencia de un aerogenerador representan la relación entre la velocidad del viento y la potencia eléctrica que puede generar el aerogenerador en condiciones específicas. Estas curvas se obtienen mediante pruebas realizadas por los fabricantes y son esenciales para prever la producción de energía en función del recurso eólico disponible [28].

En una curva de potencia típica, se pueden identificar tres etapas. La primera es la velocidad de arranque, que es el punto mínimo donde el aerogenerador comienza a generar energía, generalmente entre 3 y 5 m/s. A medida que la velocidad del viento aumenta, la potencia generada incrementa hasta alcanzar la potencia nominal, que es el máximo rendimiento del aerogenerador, a una velocidad nominal definida. Si el viento supera la velocidad de desconexión (usualmente entre 25 y 30 m/s), el aerogenerador se apaga para evitar daños estructurales.

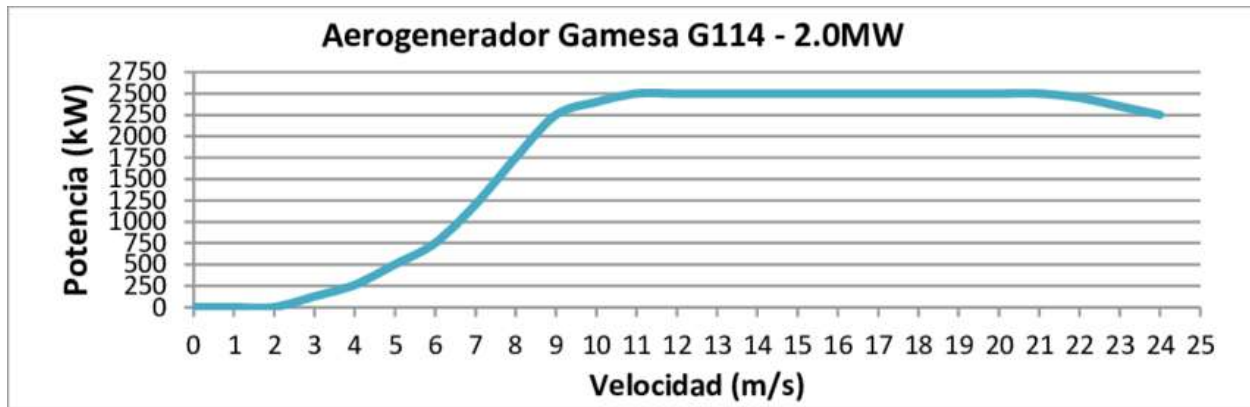


Figura 7. Curva de potencia o diagrama P-V [28].

Como podemos observar en la Figura 7, la curva de potencia de un aerogenerador es una representación gráfica que muestra cómo varía la producción de energía en función de la velocidad del viento. Este gráfico permite visualizar cuánta potencia puede generar el aerogenerador a diferentes velocidades, proporcionando una estimación clara del rendimiento energético. El eje horizontal refleja la velocidad del viento, generalmente medida en metros por segundo o millas por hora, mientras que el eje vertical indica la potencia de salida en vatios. La superficie bajo la curva simboliza la energía total producida, lo que la convierte en una herramienta esencial para evaluar la eficiencia y el aprovechamiento del recurso eólico en cualquier proyecto.

Estas curvas son fundamentales para evaluar el rendimiento energético de un parque eólico, permitiendo determinar cuánta energía puede producirse bajo diferentes condiciones de viento. Son útiles para planificar la selección de aerogeneradores según el potencial eólico del sitio y para optimizar el diseño del parque.

En el contexto de La Mata, Oaxaca, un área con altos recursos eólicos según el Atlas de Recursos Eólicos del Estado [29], las curvas de potencia permiten calcular la producción esperada de energía con base en la distribución de la velocidad del viento. Esto es clave para estimar el potencial energético total y justificar la instalación de aerogeneradores, seleccionando aquellos que mejor se adapten a las condiciones del viento predominante.

El análisis de las curvas de potencia complementa la comprensión del aprovechamiento energético en función del recurso disponible. De esta manera, las curvas de potencia permiten maximizar la eficiencia operativa y apoyar la toma de decisiones estratégicas para el desarrollo sostenible de proyectos eólicos.

Capítulo 3

3.1. Predicción numérica del tiempo

La predicción numérica del tiempo es una disciplina crucial en la meteorología moderna que emplea modelos matemáticos y computacionales para prever las condiciones atmosféricas futuras. Este enfoque se basa en la resolución numérica de las ecuaciones fundamentales que describen los procesos físicos que ocurren en la atmósfera. La importancia de este aspecto se ha incrementado, especialmente con el aumento en la producción de energía a través de fuentes renovables, en un contexto de condiciones climáticas que experimentan cambios atribuidos al fenómeno del cambio climático.

El proceso de predicción numérica del tiempo comienza con la recopilación de datos meteorológicos actuales de todo el mundo, incluyendo mediciones de temperatura, presión atmosférica, velocidad del viento, humedad, y otras variables relevantes. Estos datos sirven como puntos de partida para alimentar los modelos meteorológicos.

Los modelos meteorológicos numéricos son conjuntos complejos de ecuaciones matemáticas que simulan el comportamiento de la atmósfera. Estas ecuaciones representan procesos físicos como la transferencia de calor, la radiación solar, la condensación del vapor de agua y otros fenómenos atmosféricos. La resolución de estas ecuaciones se realiza mediante poderosos superordenadores, que realizan cálculos intensivos para proyectar la evolución del sistema atmosférico en el tiempo.

Es importante señalar que, aunque la predicción numérica del tiempo ha avanzado significativamente y proporciona pronósticos útiles y precisos a corto y mediano plazo, la predicción a largo plazo sigue siendo un desafío debido a la sensibilidad del sistema atmosférico a condiciones iniciales y pequeñas variaciones.

La predicción numérica del tiempo desempeña un papel crucial en la toma de decisiones en diversos campos, desde la planificación agrícola, la gestión del agua, prever la producción eléctrica en parque eólicos, hasta la preparación para eventos

meteorológicos extremos. A medida que la tecnología y la comprensión científica continúan avanzando, se espera que la precisión de la predicción numérica del tiempo mejore, contribuyendo así a una mejor gestión de los recursos y la seguridad pública.

3.2. Tipos de modelos para pronosticar el viento

Existen diversos modelos utilizados para pronosticar la velocidad del viento, los cuales se basan en diferentes enfoques y técnicas. Algunos de los modelos más comunes son los siguientes:

- **Modelos meteorológicos numéricos:** Estos modelos, como el Weather Research and Forecasting (WRF), el Global Forecast System (GFS) y el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), utilizan ecuaciones matemáticas complejas para simular la dinámica atmosférica y otros procesos físicos. Estos modelos integran datos iniciales y condiciones límite para generar pronósticos de velocidad del viento a diferentes escalas espaciales y temporales [30].
- **Modelos estadísticos:** Estos modelos se basan en análisis históricos de datos de velocidad del viento para identificar patrones y tendencias. Utilizan técnicas estadísticas como el análisis de regresión y el análisis de series temporales para hacer pronósticos. Estos modelos son útiles cuando se dispone de una gran cantidad de datos históricos y se busca identificar patrones estacionales o cíclicos en la velocidad del viento.
- **Modelos basados en aprendizaje automático:** Estos modelos utilizan algoritmos de aprendizaje automático, como las redes neuronales y los bosques aleatorios, para analizar datos históricos de velocidad del viento y generar pronósticos. Estos modelos tienen la capacidad de aprender patrones complejos y no lineales a partir de los datos de entrenamiento, lo que los hace útiles para pronósticos a corto plazo y en situaciones donde existen múltiples variables influyentes.

- **Modelos de reglas empíricas:** Estos modelos se basan en reglas empíricas derivadas de observaciones y experiencias pasadas. Por ejemplo, el método de clasificación de Beaufort utiliza una escala de referencia que relaciona la velocidad del viento con observaciones visuales de su efecto en el entorno, como el aspecto del mar o la agitación de los árboles.

Es importante tener en cuenta que la elección del modelo depende del propósito del pronóstico, la disponibilidad de datos y la escala espacial y temporal requerida. Además, la precisión de los pronósticos de velocidad del viento puede verse afectada por la complejidad del terreno, la variabilidad atmosférica y otros factores locales.

3.3. Modelos de Predicción Numérica del Tiempo (NWP)

Los modelos de Predicción Numérica del Tiempo (NWP, por sus siglas en inglés) son sofisticados programas de computadora diseñados para resolver las ecuaciones que describen los procesos atmosféricos y su evolución temporal. La idea de tratar la predicción climática como un problema de valor inicial fue propuesta por Vihelm Bjerknes en 1904. Según este enfoque, si se conocen las condiciones iniciales de la atmósfera, es posible resolver las ecuaciones correspondientes a cada variable atmosférica mediante la aplicación de las fuerzas físicas actuantes, obteniendo así los valores futuros de dichas variables. Debido a la complejidad y no linealidad de estas ecuaciones, una solución numérica es preferida sobre una analítica.

Para modelar la atmósfera, los modelos NWP dividen el espacio en una malla tridimensional de celdas, donde cada punto de la malla representa el centro de una celda (Figura 8). La distancia entre puntos adyacentes en la malla se conoce como resolución (Figura 9); una mayor resolución proporciona predicciones más precisas, aunque a un costo computacional significativamente mayor.

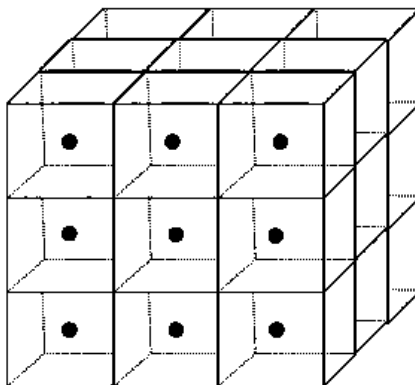


Figura 8. Cubos 3D de la atmósfera usados por los modelos NWP [31].

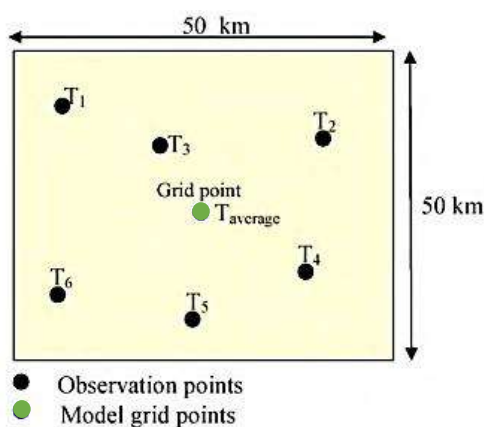


Figura 9. 50 km de malla, representa un área de 2500km^2 [31].

Existen dos tipos principales de modelos NWP: los globales y los regionales (o de mesoescala). Los modelos globales abarcan toda la atmósfera terrestre y, debido a restricciones computacionales, suelen operar con resoluciones más bajas. En contraste, los modelos regionales están limitados a áreas específicas, lo que les permite funcionar con resoluciones más altas y menor requerimiento de recursos computacionales. Estos modelos regionales son particularmente útiles para la predicción de fenómenos meteorológicos a mesoescala. Sin embargo, debido a su alcance limitado, dependen de las condiciones de frontera proporcionadas por los modelos globales.

Los modelos NWP son herramientas esenciales en la meteorología moderna, permitiendo una comprensión detallada y una predicción precisa de los procesos atmosféricos en diversas escalas espaciales y temporales. Existen diferentes horizontes de pronóstico y cada uno tiene una aplicación, como se muestra en la Tabla 2.

Horizonte	Aplicación
Segundos o minutos	Control y mantenimiento de las unidades de los parques eólicos.
1 – 6 horas	Operación de pequeños sistemas eléctricos
1 – 72 horas	Operación de Sistemas Eléctricos Interconectados. Despacho y Selección de unidades. Comercio de electricidad.
3 – 7 días	Planificación del mantenimiento de los parques eólicos, planificación del mantenimiento de la red y las operaciones de almacenamiento de energía.

Tabla 2. Diferentes horizontes de pronóstico y su aplicación.

3.4. Ecuaciones Fundamentales

La base teórica de los modelos de predicción numérica del tiempo se construye sobre la suposición de que la atmósfera terrestre se comporta como un sistema conservativo. Esto significa que, bajo determinadas condiciones, se conserva la masa, el momento lineal y la energía del sistema. Estas propiedades se describen mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que representan los principios físicos fundamentales del movimiento atmosférico. A continuación, se presentan las principales ecuaciones que rigen la dinámica de la atmósfera: Estas ecuaciones fundamentales son las siguientes:

- Ecuación de estado

$$p = \rho R_d T_v \quad [\text{Ec.3.1}]$$

Esta relación vincula la presión atmosférica p con la densidad del aire ρ , la constante específica del aire seco R_d y la temperatura del aire T_v . Es una forma modificada de la ecuación de los gases ideales adaptada para la atmósfera.

- Ecuación de conservación de la energía

$$\delta c = \delta W_T + \delta u_e = \frac{Sc}{\rho} dt \quad [\text{Ec.3.2}]$$

En esta expresión, δc representa el intercambio de calor por unidad de masa, δW_T el trabajo realizado por el sistema y δu_e el cambio de energía interna. S_c es un término que incluye las fuentes y sumideros de energía por unidad de volumen y tiempo.

- Ecuación de conservación del momento

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_j u_i = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] + \rho g_i - 2\rho \epsilon_{ijk} \Omega_j u_k \quad [\text{Ec.3.3}]$$

Esta ecuación expresa el cambio en la cantidad de movimiento de un fluido debido a fuerzas externas e internas, incluyendo la presión, la viscosidad, la gravedad g_i y los efectos de la rotación terrestre mediante la velocidad angular Ω .

- Ecuación de continuidad (conservación de la masa)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = - \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \quad [\text{Ec.3.4}]$$

Esta relación garantiza que no se pierde ni se crea masa dentro del sistema. Aquí, u_i representa las componentes del viento, x_i las coordenadas espaciales, t el tiempo, y ρ la densidad del aire.

Estas ecuaciones, conocidas como "ecuaciones primitivas", constituyen el núcleo de los modelos atmosféricos modernos, y su resolución numérica permite predecir el comportamiento futuro del sistema climático a distintas escalas espaciales y temporales.

3.5. El modelo WRF

El modelo de predicción meteorológica Weather Research and Forecasting (WRF, por sus siglas en inglés) es una técnica ampliamente utilizada para predecir la velocidad del viento. El WRF utiliza un enfoque de modelado numérico que integra observaciones y datos atmosféricos en tiempo real para generar pronósticos precisos.

El modelo WRF se basa en ecuaciones matemáticas complejas que describen la dinámica atmosférica y otros procesos físicos relevantes, como la radiación solar y la transferencia de calor. Estas ecuaciones se resuelven mediante algoritmos avanzados y se ejecutan en computadoras de alto rendimiento para simular el comportamiento de la atmósfera.

El WRF se distingue por su arquitectura flexible y su capacidad de adaptación a diferentes necesidades de investigación y pronóstico meteorológico. Desarrollado a partir de una colaboración entre el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, el Laboratorio de Investigación Naval y la Universidad de Oklahoma, el modelo WRF ha evolucionado desde finales de la década de 1990 para convertirse en un recurso de vanguardia en la comunidad científica.

Para predecir la velocidad del viento, el modelo WRF utiliza datos iniciales, como la presión atmosférica, la temperatura, la humedad y la dirección del viento, obtenidos de observaciones y análisis meteorológicos. Estos datos se combinan con información sobre la topografía y la vegetación de la zona objetivo para generar un pronóstico detallado. Con el modelo WRF se puede proporcionar pronósticos de velocidad de viento a diferentes escalas espaciales y temporales, desde áreas pequeñas hasta regiones extensas y desde pronósticos a corto plazo hasta proyecciones a largo plazo. Estas predicciones son útiles en diversas aplicaciones, como la planificación de parques eólicos, la gestión de la energía renovable y la predicción del clima para actividades como la aviación y la navegación marítima.

Como se muestra en la Figura 10, el sistema WRF cuenta con dos núcleos dinámicos, el núcleo ARW (Advanced Research WRF) y el núcleo NMM (Non-hydrostatic Mesoscale Model), ambos diseñados para abordar distintos aspectos de la dinámica atmosférica. Además, incorpora un sistema de asimilación de datos que permite la integración de observaciones reales para mejorar la precisión de las simulaciones.

WRF Modeling System Flow Chart

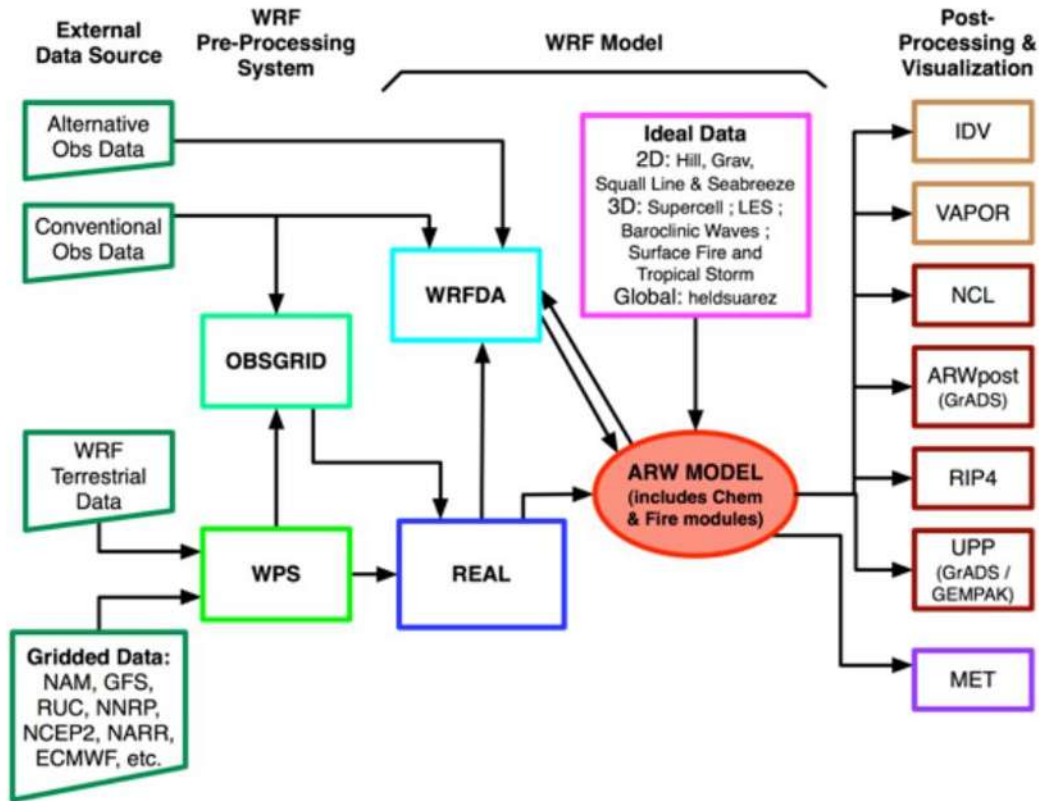


Figura 10. Diagrama de flujo del modelo WRF [32].

En una manera más detallada, el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 11, nos describe el sistema de modelado de WRF, el cual consta de tres programas principales para simulaciones reales. En primera etapa el Sistema de procesamiento WRF (WPS), seguido del Solucionador WRF-ARW y por último las herramientas de posprocesamiento y visualización.

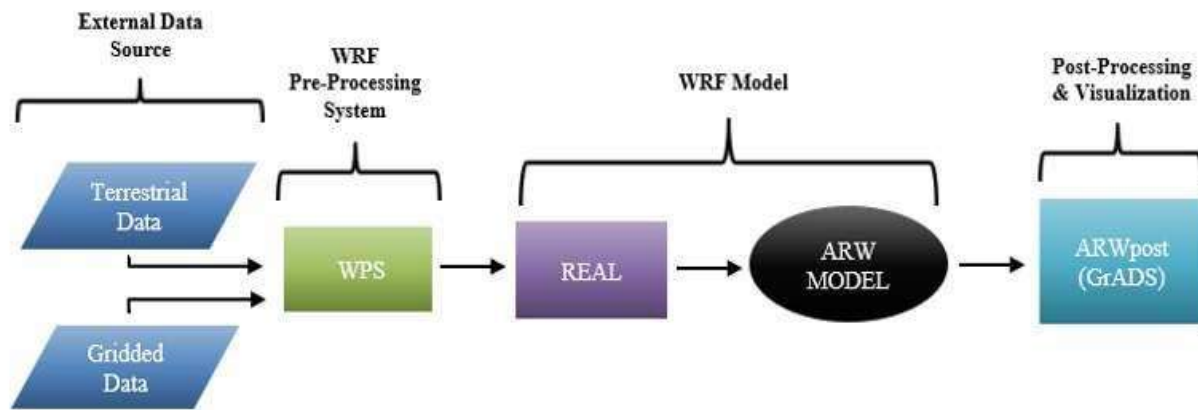


Figura 11. Diagrama de flujo condensado del modelo ARW utilizado para la investigación [32].

3.5.1. Sistema de Preprocesamiento WRF (WPS)

El Sistema de Preprocesamiento WRF (WPS) es una herramienta esencial para la preparación de datos de entrada en simulaciones de datos reales. Compuesto por tres programas principales: geogrid, ungrib y metgrid, WPS facilita los preparativos necesarios para la ejecución del programa real.exe, que es crucial para las simulaciones del modelo WRF.

1. **geogrid:** Este programa define el dominio de simulación, estableciendo la extensión territorial y la ubicación geográfica de la zona de estudio. Utiliza datos topográficos y geográficos proporcionados por WRF en dos versiones: una de menor resolución y tamaño, y otra con mayor resolución y tamaño. La definición del dominio y la proyección cartográfica más adecuada, como Lambert para latitudes medias, Mercator para latitudes bajas, Estereográfica Polar para latitudes altas y Cilíndrica Equidistante para modelos globales, se realiza editando el archivo namelits.wps.
2. **ungrib:** Este programa se encarga de leer archivos GRIB, también conocidos como datos de reanálisis, que contienen datos meteorológicos globales. Ungrib extrae la información necesaria de estos archivos y la reescribe en un formato

intermedio más manejable, designado en el archivo `namelits.wps`. Esta transformación es necesaria porque los archivos GRIB contienen más información de la que el modelo WRF necesita. Ungrib utiliza tablas de conversión para identificar y extraer las variables meteorológicas pertinentes.

3. **metgrid**: El último componente del WPS, metgrid, interpola horizontalmente la información meteorológica de los archivos intermedios generados por ungrib y la ajusta al dominio definido por geogrid. Los rangos de datos interpolados se establecen en el archivo `namelits.wps`. Los archivos de salida generados por metgrid, conocidos como archivos MET, están listos para ser utilizados por el modelo ARW en la etapa de procesamiento.

WPS es utilizado principalmente para simulaciones basadas en datos reales y su preparación es fundamental para el éxito de las predicciones meteorológicas. Aunque WRF generalmente se maneja a través de líneas de comando, existe una interfaz gráfica llamada WRF Domain Wizard que facilita la visualización y diseño del dominio de simulación. Sin embargo, problemas recientes con actualizaciones de Java han afectado su conectividad y funcionalidad. Por lo que, WPS es una herramienta integral que asegura la correcta preparación de los datos geográficos y meteorológicos necesarios para la ejecución eficaz del modelo WRF, contribuyendo significativamente a la precisión y validez de las simulaciones atmosféricas.

3.5.2. Solucionador WRF-ARW

El modelo WRF-ARW (Weather Research and Forecasting - Advanced Research WRF) es el componente esencial del sistema de modelado WRF, ya que es en esta fase donde se lleva a cabo la simulación utilizando técnicas de integración numérica. Este modelo se distingue por sus características avanzadas y su capacidad para abordar una amplia gama de fenómenos atmosféricos. Entre sus principales características se incluyen:

- **Ecuaciones no hidrostáticas completamente comprimibles con opción hidrostática**: Estas ecuaciones permiten simular movimientos atmosféricos

complejos, incluyendo fenómenos a mesoescala que no pueden ser abordados por modelos hidrostáticos.

- **Aplicaciones regionales:** El modelo está diseñado para ser aplicado a diferentes regiones geográficas, permitiendo una gran flexibilidad en los estudios meteorológicos.
- **Términos completos de Coriolis y curvatura:** Incorpora los efectos de la rotación de la Tierra y la curvatura de su superficie, lo cual es crucial para una simulación precisa.
- **Anidación bidireccional con múltiples nidos y niveles de nidos:** Esta característica permite simular detalles a diferentes escalas espaciales, mejorando la resolución en áreas de interés.
- **Espaciado de la cuadrícula vertical variable con la altura:** Facilita una mejor representación de los procesos atmosféricos a distintas altitudes.
- **Factores de escala de mapa para varias proyecciones:** Incluye proyecciones estereográficas polar, Lambert, Mercator y de latitud y longitud, adaptándose a diferentes necesidades geográficas.
- **Sistema de cuadrícula de Arakawa C:** Este sistema de malla es efectivo para resolver ecuaciones de dinámica de fluidos.
- **Opciones físicas completas:** Integra modelos detallados para la superficie terrestre, la capa límite planetaria, la radiación atmosférica y superficial, la microfísica y la convección de cúmulos.
- **Pasos de tiempo adaptables:** Permite ajustar el intervalo de tiempo de las simulaciones para optimizar el balance entre precisión y eficiencia computacional.

Detalles del Modelo No Hidrostático

El modelo WRF es no hidrostático, lo que significa que no asume un equilibrio hidrostático en sus ecuaciones, a diferencia de los modelos hidrostáticos que consideran que la presión vertical y la gravedad están en equilibrio. Esta no linealidad es crucial para la simulación precisa de fenómenos de mesoescala, donde los efectos del empuje hidrostático y la topografía deben ser considerados con detalle.

Esquemas de Integración Numérica

El WRF utiliza esquemas de integración numérica Runge-Kutta de segundo y tercer orden. El proceso de simulación en WRF-ARW se lleva a cabo mediante dos programas principales:

- **real.exe:** Este programa inicializa la simulación, configurando las condiciones iniciales y de frontera.
- **wrf.exe:** Es el núcleo del modelo, donde se realiza la integración numérica de las ecuaciones en la malla tridimensional de la atmósfera. Debido a su complejidad, este programa requiere una cantidad significativa de recursos computacionales.

Configuración y Salida del Modelo

El archivo editable `namelist.input` permite definir diversas opciones de configuración, compartiendo algunas con `namelist.wps` de WPS, como el tamaño del dominio, la resolución y la temporalidad del pronóstico. Además, este archivo especifica las opciones físicas y dinámicas del modelo, cruciales para obtener un pronóstico preciso.

Al finalizar los procesos de inicialización y simulación, se generan los archivos `WRFOUT`, que contienen el pronóstico meteorológico deseado, listos para ser analizados y utilizados en diversas aplicaciones meteorológicas.

3.5.3. Post-Procesamiento con ARWpost y GrADS

Una vez generado el pronóstico mediante el modelo WRF-ARW, es necesario realizar un post-procesamiento para obtener datos que faciliten la interpretación y visualización de los resultados. Para esto, se utiliza la herramienta ARWpost, que produce las salidas necesarias para ser interpretadas por el sistema de visualización GrADS.

ARWpost

ARWpost es una herramienta crucial en el proceso de post-procesamiento. Su función principal es convertir los archivos de salida del WRF-ARW en un formato que

pueda ser interpretado por GrADS. Este proceso permite que los datos sean presentados de manera visualmente accesible, facilitando así el análisis y la comprensión del pronóstico meteorológico.

GrADS

GrADS (Grid Analysis and Display System) es un software de visualización ampliamente utilizado en las ciencias de la tierra. Este programa es capaz de manejar los archivos generados por ARWpost, permitiendo la visualización de los resultados de las simulaciones en un entorno de cuatro dimensiones convencionales: longitud, latitud, nivel vertical y tiempo. GrADS proporciona varias técnicas gráficas como cuadrículas sombreadas y vectores de viento, lo que facilita un análisis detallado y visualmente intuitivo de los datos meteorológicos. Además, es una herramienta gratuita y de fácil acceso a través de internet, lo cual es una ventaja significativa para la comunidad de investigadores.

Existen diversas herramientas adicionales para el post-procesamiento de datos obtenidos después de la compilación del modelo de pronóstico. Algunas de las más relevantes incluyen:

- **Ncview:** Esta interfaz gráfica permite la rápida visualización de archivos netCDF, incluyendo variables como geo_em, met_em, wrfinput, wrfout y wrfst. Sin embargo, su uso está limitado a sistemas operativos Linux.
- **RIP (Read Interpolate Plot):** Es una herramienta de post-procesamiento que genera gráficos a partir de los datos de modelos numéricos de mesoescala. Requiere de las librerías gráficas de NCAR.
- **VAPOR (Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers):** Desarrollado por NCAR, VAPOR proporciona una visualización interactiva en 3D y cálculo de variables, siendo una herramienta muy potente para el análisis de datos atmosféricos, oceánicos y solares.

La elección de la herramienta de post-procesamiento adecuada depende de la finalidad específica de los datos obtenidos del modelo de pronóstico y del sistema

operativo en uso. Para usuarios de Linux, Ncview es una opción excelente debido a su capacidad de manejo de múltiples variables y tipos de archivos. Por otro lado, para usuarios de Windows, GrADS se presenta como una alternativa más viable debido a su compatibilidad y amplia gama de funcionalidades de visualización.

Capítulo 4

4.1. Selección del sitio de estudio: La Mata, Asunción Ixtaltepec, Oaxaca, México

La elección de La Mata en Oaxaca para el estudio y desarrollo de energía eólica se fundamenta en varios factores clave relacionados con la orografía, la velocidad y dirección del viento, y el contexto energético actual de México.

En términos generales, el aprovechamiento eficiente de la energía eólica depende en gran medida de las características del terreno y de la dinámica del viento. La Mata, ubicada en Oaxaca, presenta una posición geográfica favorable que facilita la canalización y el incremento de la velocidad del viento, lo cual es esencial para maximizar la eficiencia de los aerogeneradores.

Uno de los requisitos fundamentales para establecer parques eólicos en una ubicación específica es realizar una evaluación exhaustiva del terreno y llevar a cabo mediciones precisas del viento. Estos estudios son esenciales para asegurar que el lugar seleccionado pueda proporcionar un flujo constante y potente de viento, necesario para la generación continua de energía. En este aspecto, La Mata cumple con creces, ya que Oaxaca es reconocido por sus condiciones óptimas para la generación eólica.

Actualmente, México cuenta con 66 centrales eólicas distribuidas por todo el país, acumulando una capacidad instalada total de 6.921 MW. En 2022, la generación eoloelectrica representó un 6.03% de la generación total de energía eléctrica, lo que equivale a una participación de 20,528.75 GWh. Oaxaca destaca significativamente en esta área, con varios parques eólicos importantes como La Venta, Eurús y Fuerza y Energía Bii Hioxo. Este liderazgo en el sector eólico mexicano subraya la idoneidad de Oaxaca para nuevos estudios y desarrollos en energía eólica [33].

El Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) ha señalado que México posee un gran potencial eólico, concentrado principalmente en estados como Oaxaca, Chiapas, Veracruz, Tabasco, Coahuila, Tamaulipas, Nuevo León y Baja California. Estos estados tienen amplias áreas donde el viento alcanza velocidades óptimas para la

generación de energía eólica (como se muestra en la Figura 12, Figura 13 y Figura 14). En particular, Oaxaca se destaca por sus extensas áreas con condiciones de viento excepcionales, lo que la convierte en una ubicación ideal para estudios e instalaciones eólicas.



Figura 12. Velocidad Promedio Anual de Viento a 50m de altura [33].

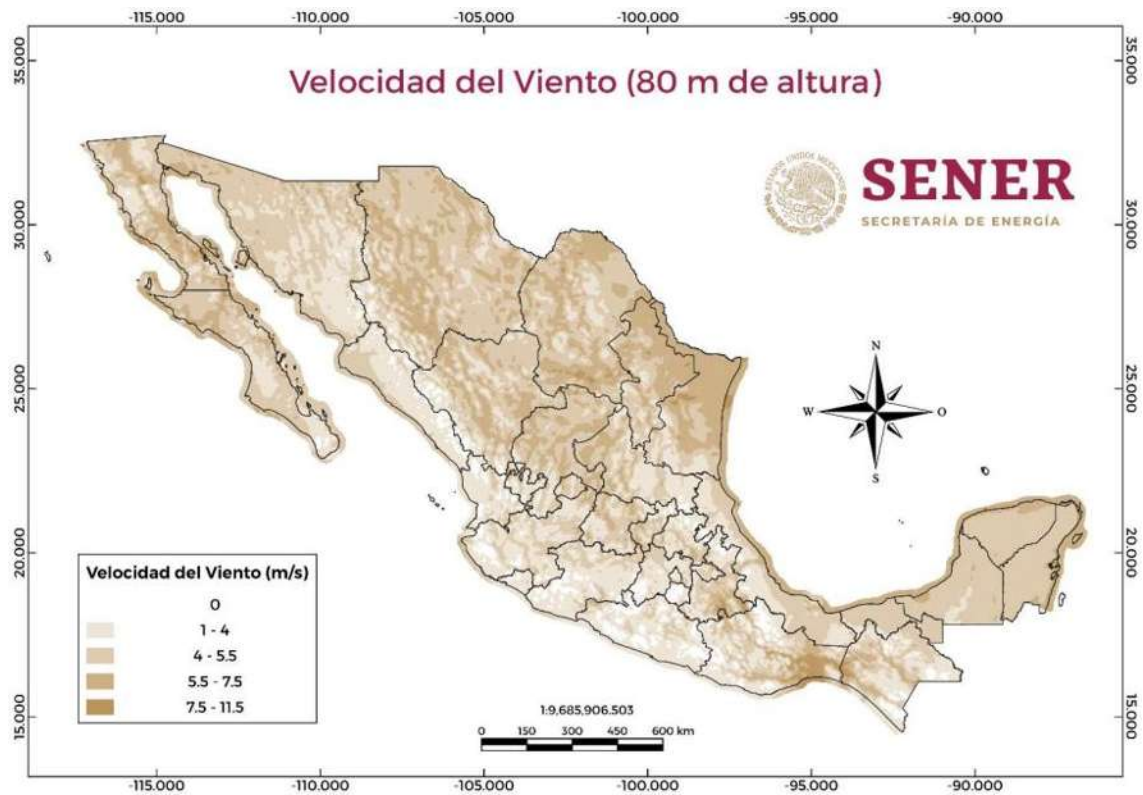


Figura 13. Velocidad del Viento a 80m de altura [33].



Figura 14. Velocidad Promedio Anual del Viento a 120m de altura [33].

La elección de La Mata en Oaxaca para llevar a cabo estudios sobre energía eólica se justifica plenamente por su orografía favorable, la consistencia y potencia de sus vientos, y el historial exitoso de generación eólica en el estado. Además, su inclusión en el grupo de estados con mayor potencial eólico según el NREL refuerza la viabilidad de futuros desarrollos en esta región (como se muestra en la Figura 15, Figura 16 y Figura 17), contribuyendo significativamente al aumento de la generación de energía limpia y sostenible en México.



Figura 15. Zonas de Alto Potencial de Energía Eólica a 50m [33].



Figura 16. Zonas de Alto Potencial de Energía Eólica a 80m [33].



Figura 17. Zonas de Alto Potencial de Energía Eólica a 120m [33].

La topografía de La Mata, ubicada en el Istmo de Tehuantepec (Figura 18), es altamente favorable para la generación de energía eólica. La región se caracteriza por terrenos relativamente planos con pendientes suaves, lo cual facilita la instalación de infraestructura eólica. Además, su proximidad a la costa permite un acceso constante a corrientes de viento provenientes del Golfo de Tehuantepec, un fenómeno que incrementa significativamente el potencial eólico de la zona.

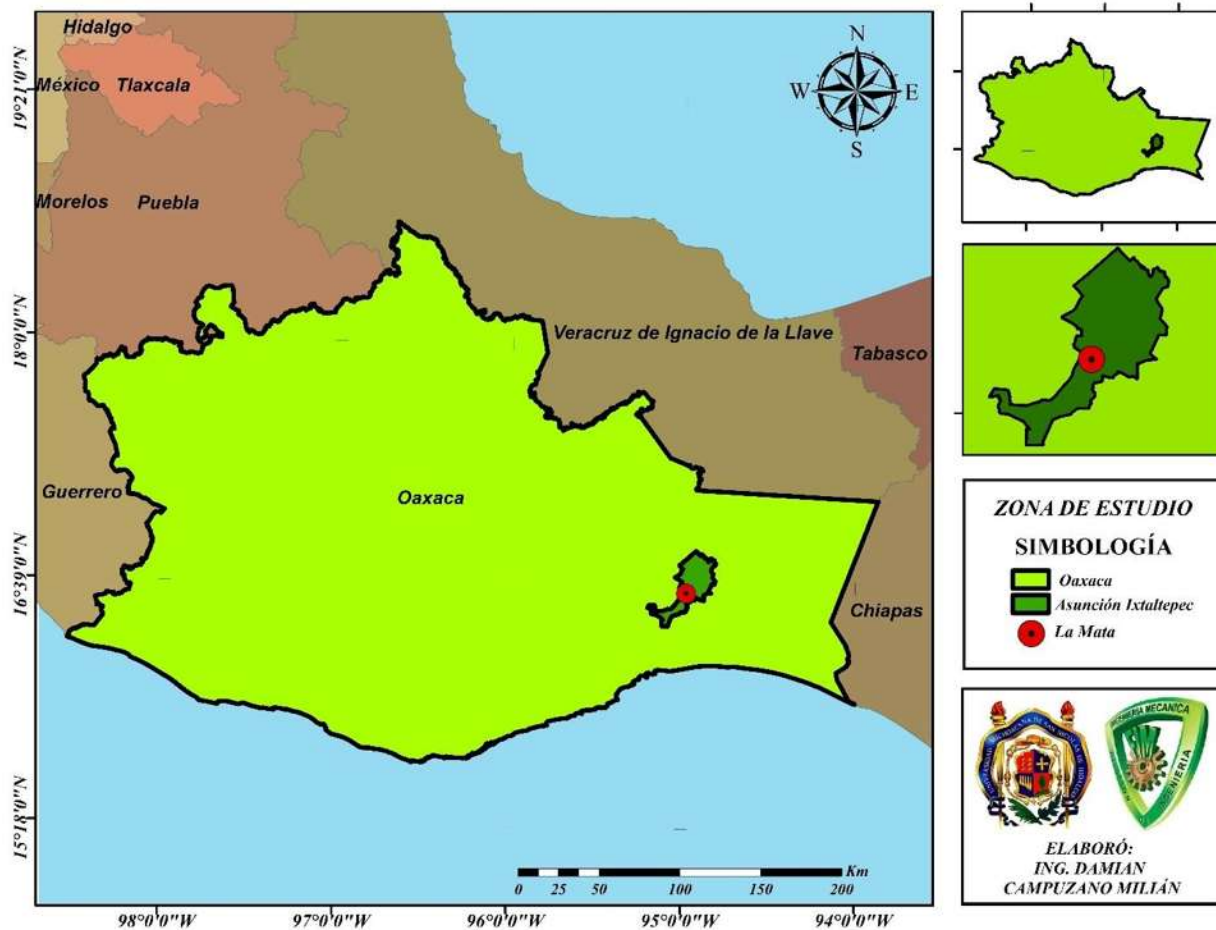


Figura 18. Zona de estudio.

Para verificar las condiciones óptimas de la zona de estudio, se utilizarán archivos ráster con extensión .nc obtenidos de la plataforma Geospatial Interactive Online Visualization And Analysis Infrastructure (GIOVANNI) del Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) de la NASA (Figura 19). Estos archivos, que contienen datos de velocidades del viento promedio anual para los años 2020 a 2023, serán procesados y analizados con el software QGIS. La creación de mapas

detallados permitirá una comparación precisa de la velocidad del viento en diferentes zonas de Oaxaca, confirmando la viabilidad de La Mata como sitio de generación eólica.

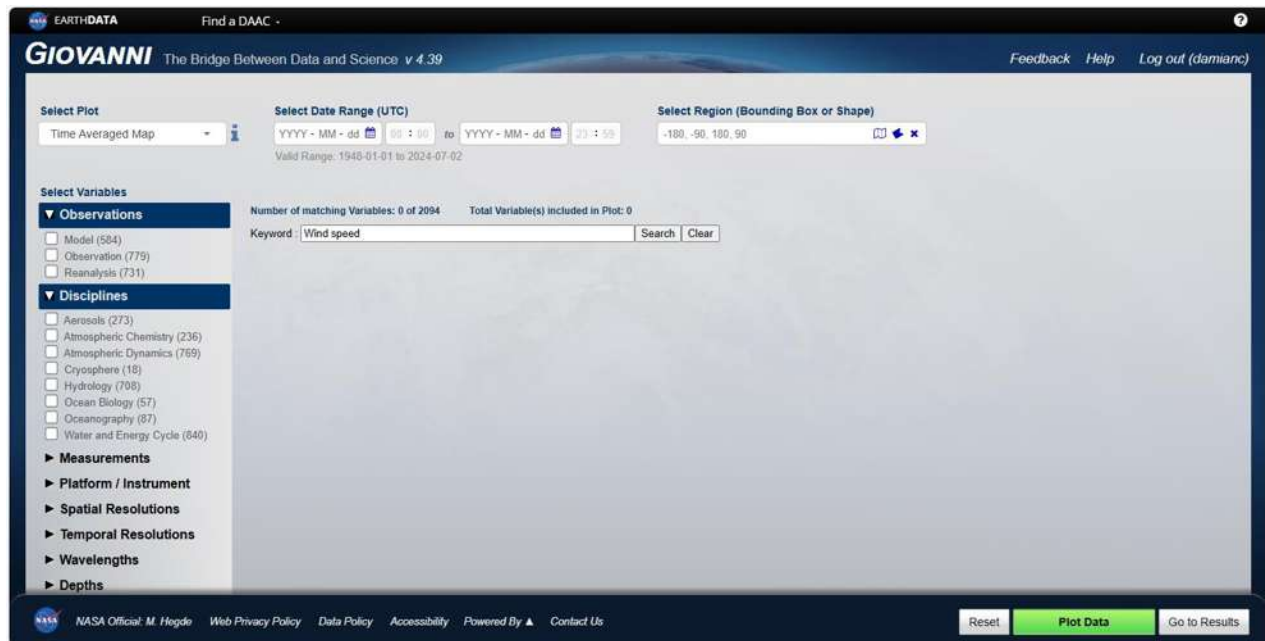


Figura 19. Interfaz GIOVANNI

La región para analizar fue delimitada por las coordenadas -98.8,15.4,-93.8,18.7 la cual contiene justo todo el estado de Oaxaca, obteniendo una vista previa de los resultados en GIOVANNI, los cuales nos los muestra en el mapa promediado en el tiempo de la velocidad del viento cerca de la superficie mensual a 0.25 grados, aproximadamente 28 kilómetros, [GLDAS Modelo GLDAS_NOAH025_M v2.1] en m/s para el 2020, 2021, 2022 y 2023, como podemos ver en la Figura 20, Figura 21, Figura 22 y Figura 23.

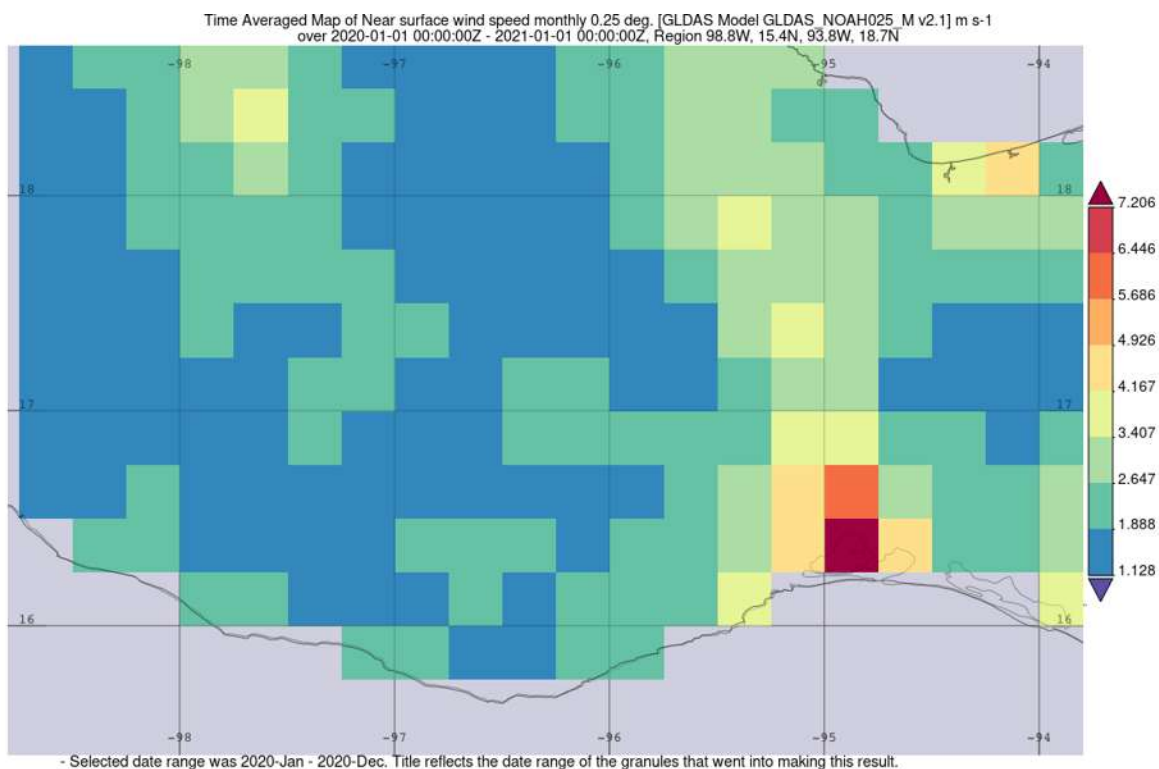


Figura 20. Mapa promediado en el tiempo de la velocidad del viento cerca de la superficie mensual del 01-01-20 al 01-01-21.

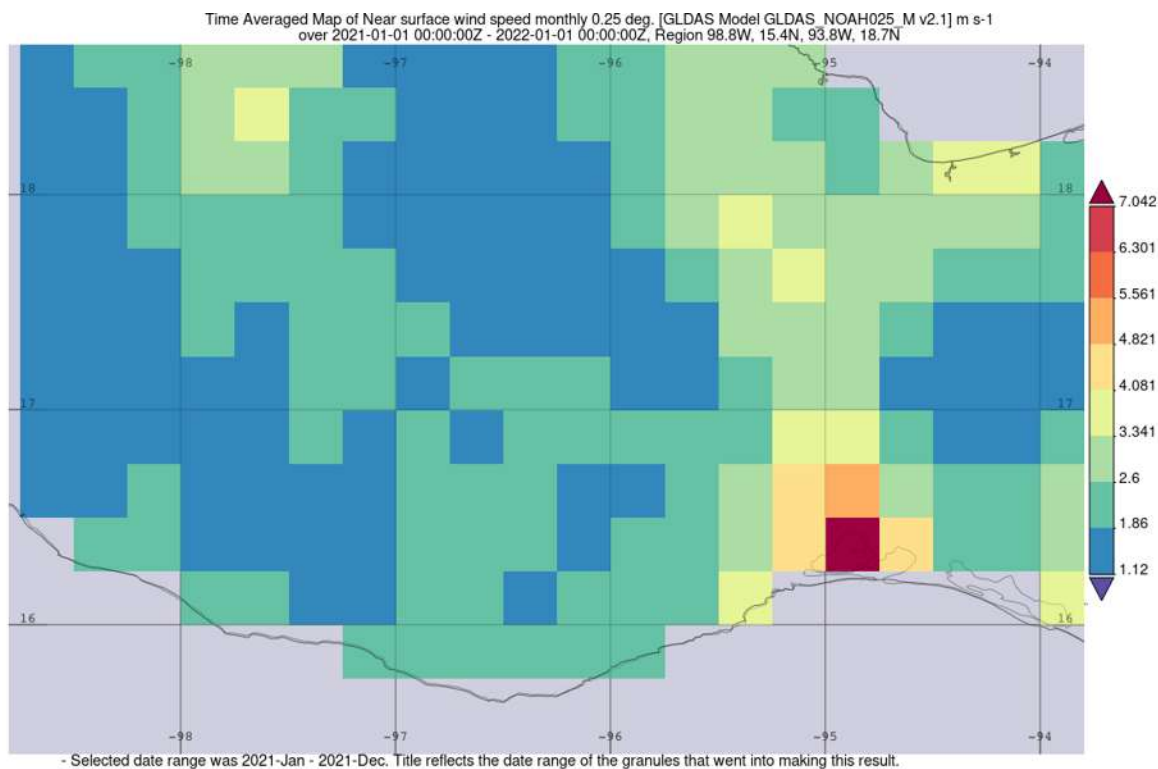


Figura 21. Mapa promediado en el tiempo de la velocidad del viento cerca de la superficie mensual del 01-01-21 al 01-01-22.

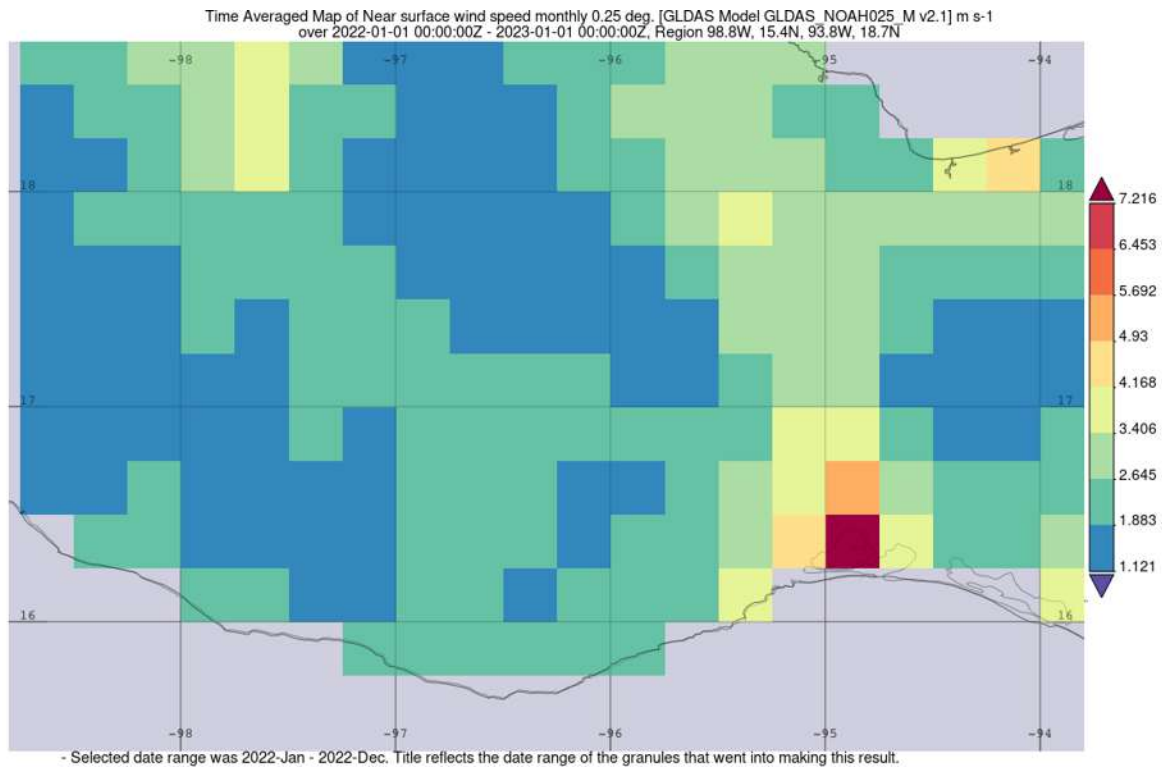


Figura 22. Mapa promediado en el tiempo de la velocidad del viento cerca de la superficie mensual del 01-01-22 al 01-01-23.

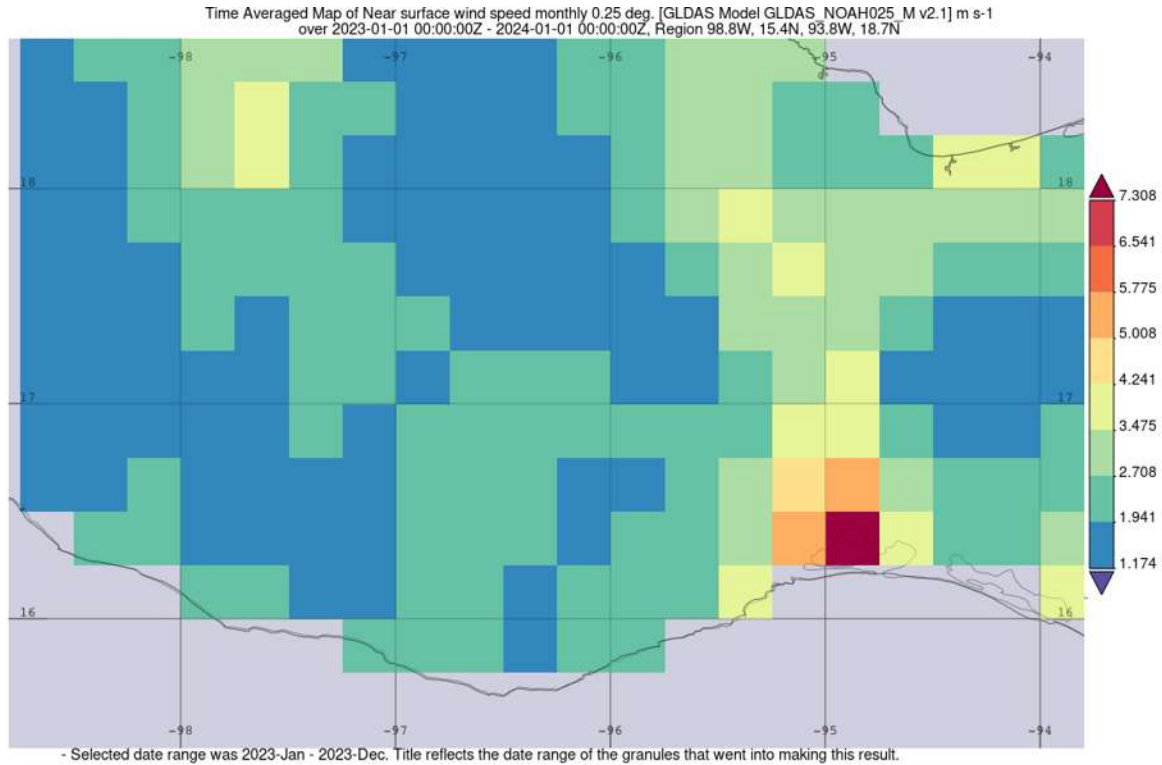


Figura 23. Mapa promediado en el tiempo de la velocidad del viento cerca de la superficie mensual del 01-01-23 al 01-01-24.

El Software QGIS (Figura 24), es un Sistema de Información Geográfica profesional de código abierto, el cual nos permite crear, visualizar, analizar, editar y publicar información geoespacial; con el cual procedimos a editar los archivos ráster obtenidos de GIOVANNI, agregando la división política de los estados y municipios del estado de Oaxaca, así como la creación de los mapas anuales de viento del 2020 al 2023.

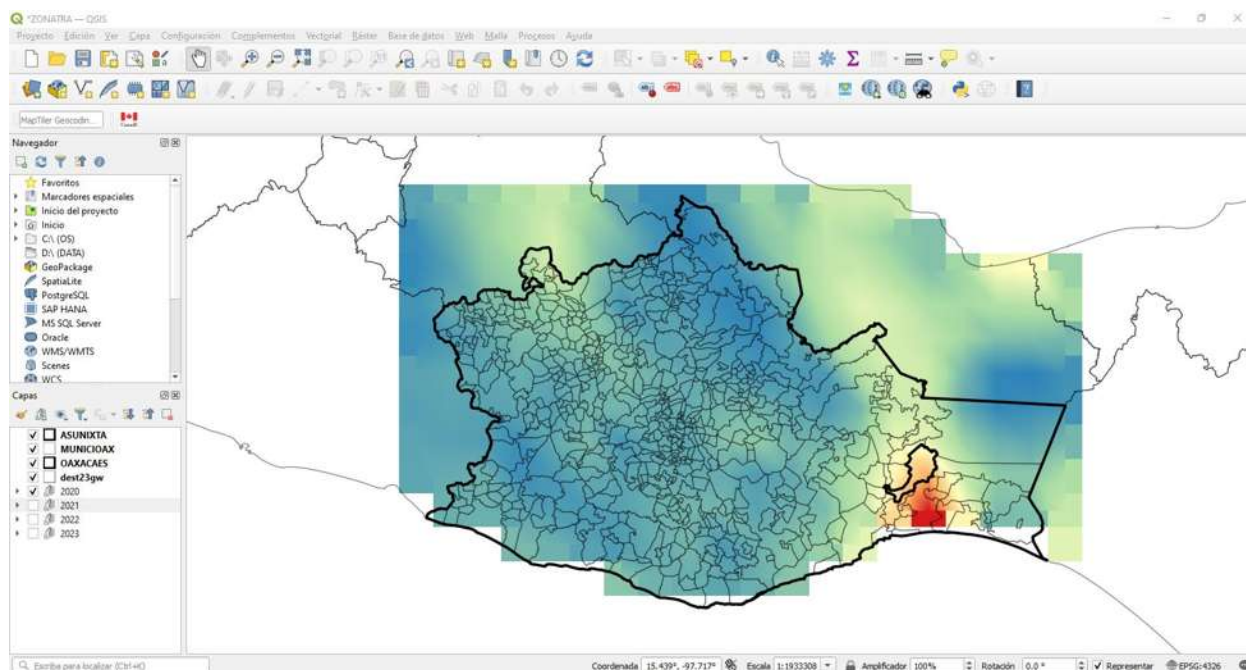


Figura 24. Interfaz QGIS.

El elaborar estos mapas en QGIS tiene como objetivo el identificar de manera visual la velocidad del viento en las diferentes regiones del estado de Oaxaca y de acuerdo a la información proporcionada por GIOVANNI se puede observar que la región de La Mata, ubicada en el municipio de Asunción Ixtaltepec, se encuentra en una zona con alto potencial eólico (como se puede ver en la Figura 25, Figura 26, Figura 27 y Figura 28), motivo por el cual seleccionamos la zona para hacer el modelo de pronóstico.

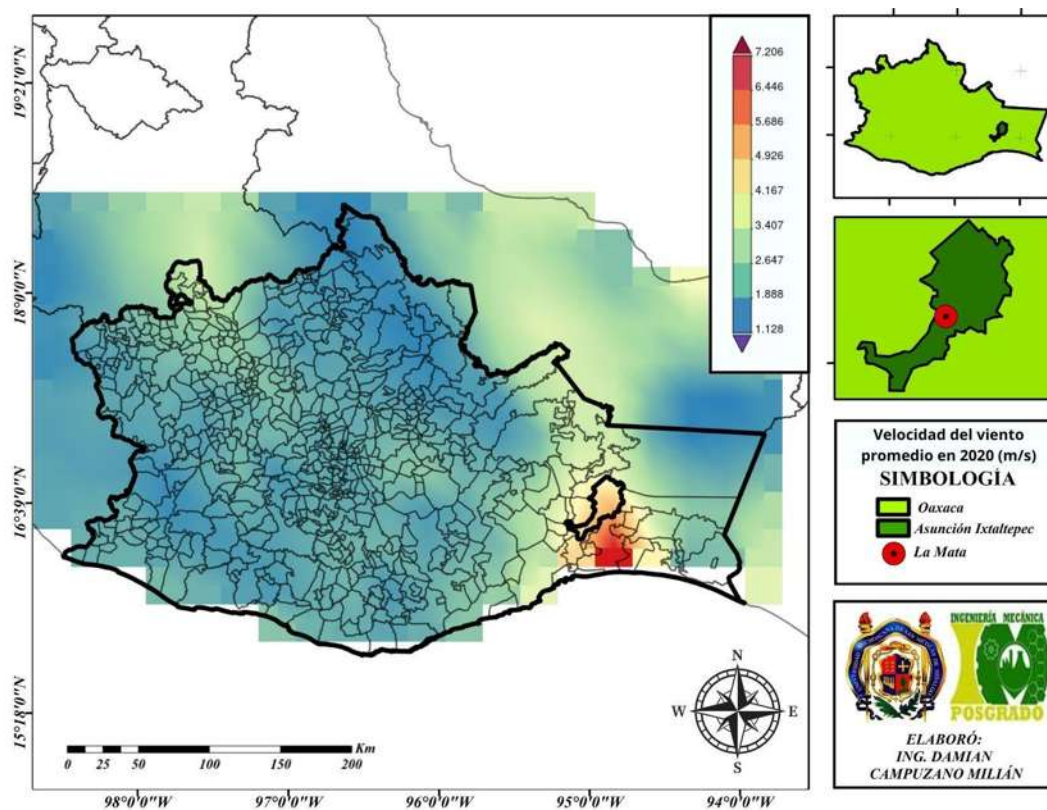


Figura 25. Velocidad promedio del viento en el 2020.

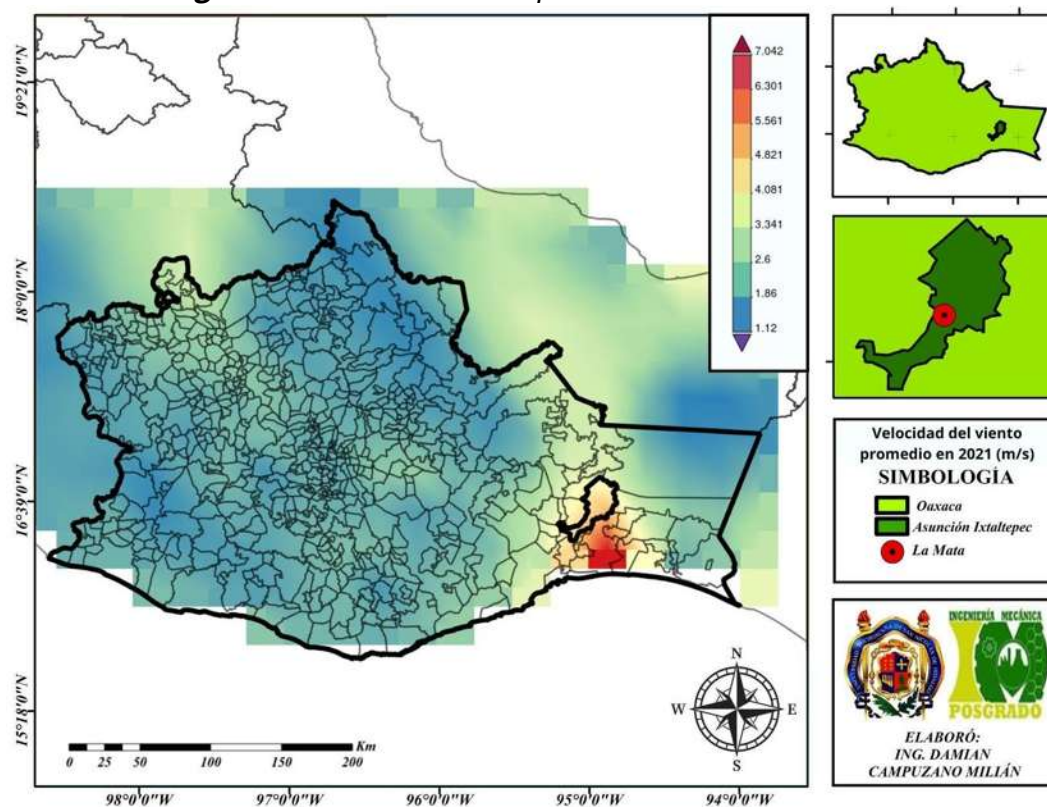


Figura 26. Velocidad promedio del viento en el 2021.

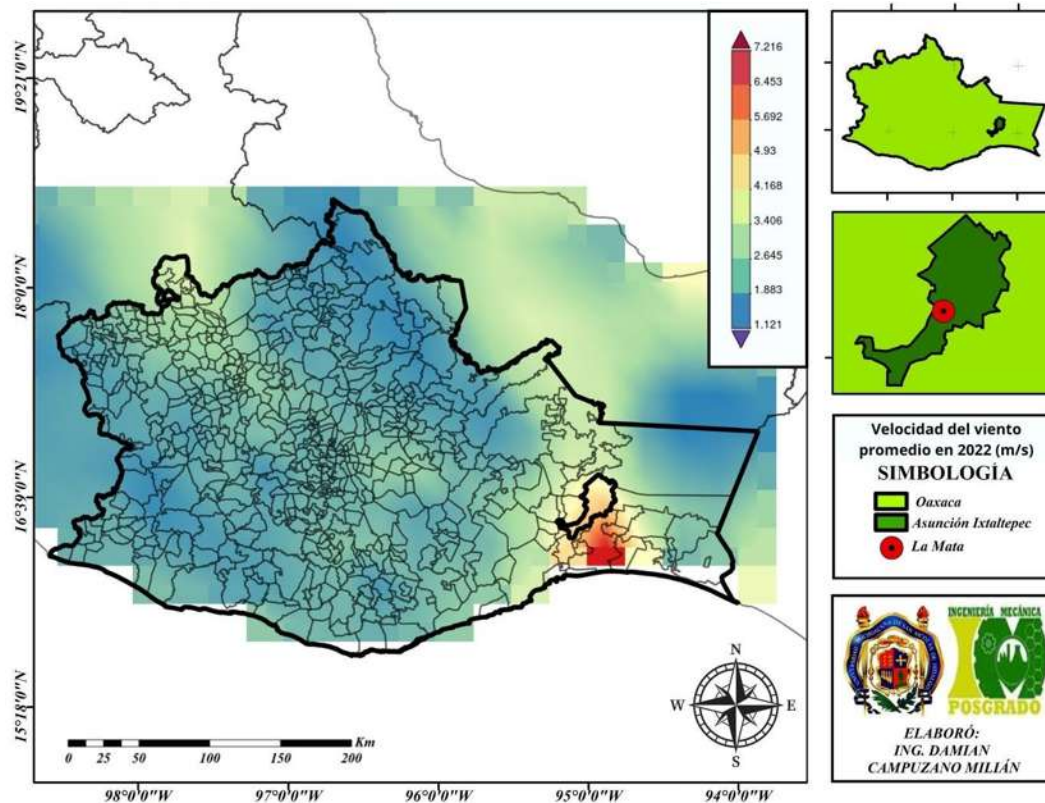


Figura 27. Velocidad promedio del viento en el 2022.

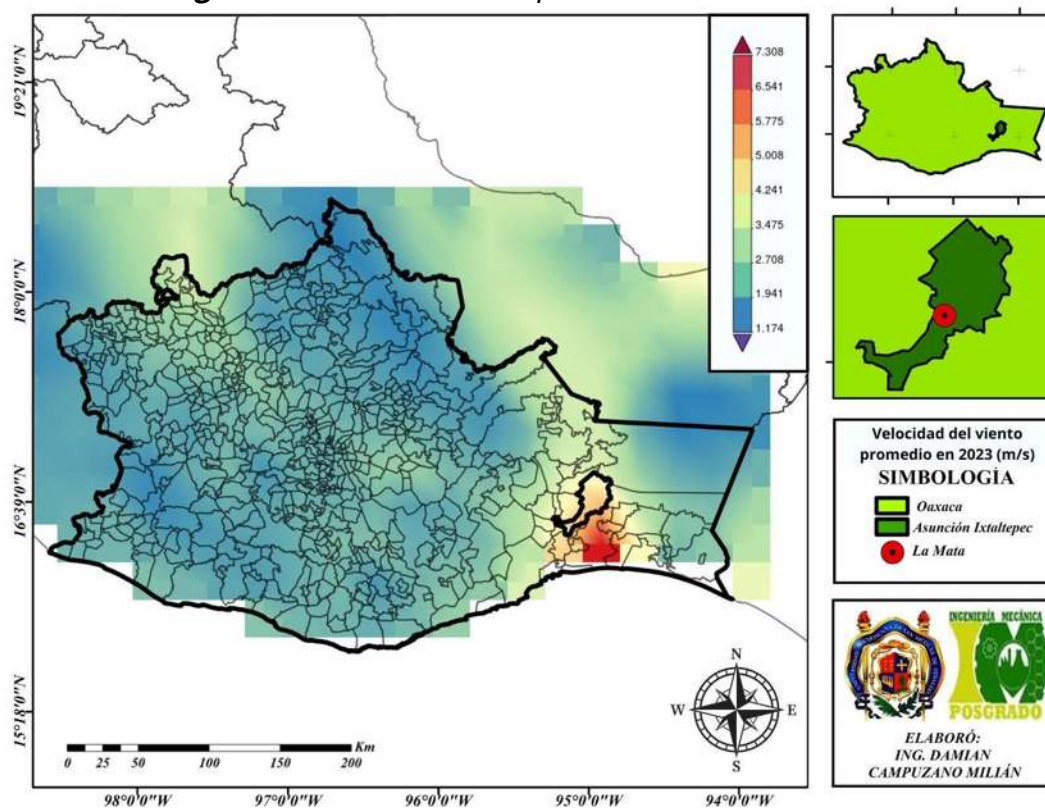


Figura 28. Velocidad promedio del viento en el 2023.

4.2. Desarrollo del Pronóstico del Viento para La Mata, Oaxaca, con WRF

4.2.1. Software

En la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, contamos con un servidor dedicado exclusivamente a la herramienta WRF para la creación del modelo de pronóstico y podemos acceder físicamente al servidor, sin embargo, para el desarrollo del modelo de pronóstico en nuestra investigación optamos por mantener el método de trabajo remoto, ya que la infraestructura que se tiene hasta el momento nos limita en cuestiones de conexión y capacidad de almacenamiento.

Para evitar interrupciones en la conexión al servidor debido a las limitaciones del tráfico de datos fuera de la red universitaria, utilizamos una máquina virtual a través de Oracle VirtualBox. Esta máquina virtual (Figura 29) contenía una réplica del contenido del servidor y la herramienta WRF, permitiendo trabajar de manera remota sin depender de una conexión directa constante al servidor.

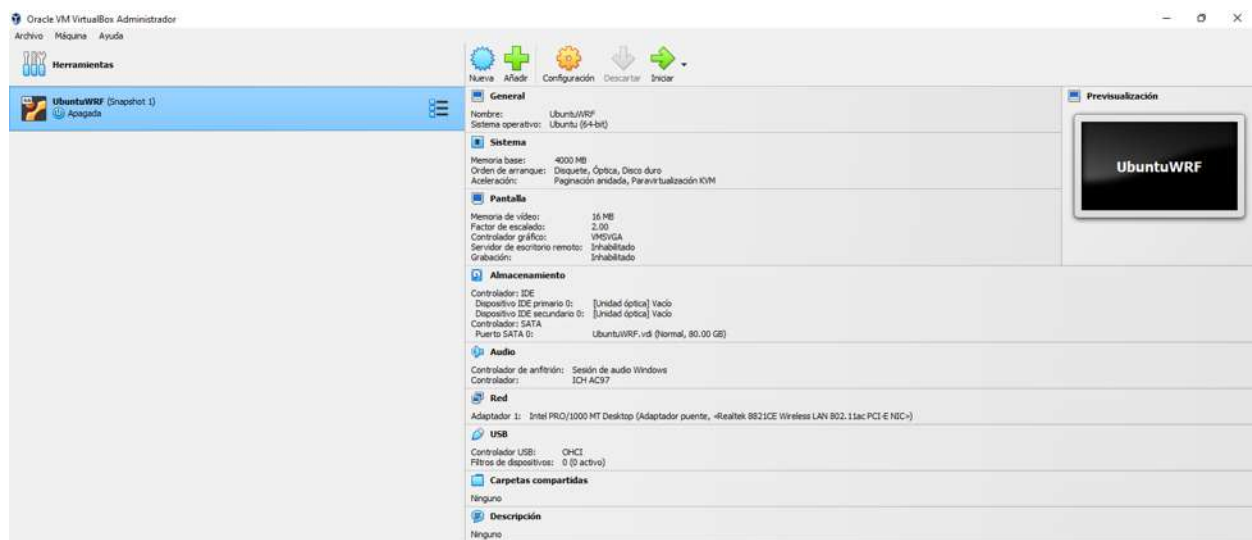


Figura 29. Captura de pantalla del interfaz de la máquina virtual que contiene el WRF.

El principal inconveniente que se tiene es la dependencia de la capacidad y rendimiento de la computadora que alberga la máquina virtual. Por lo tanto, es recomendable utilizar una computadora con al menos 16 GB de memoria RAM para asegurar un funcionamiento óptimo.

Por comodidad del interfaz se utilizó el software PuTTY, el cual nos sirve para conectarnos a la máquina virtual con su dirección IP (Figura 30), permitiéndonos el iniciar sesión y ejecutar el WRF (Figura 31), esto con la finalidad de no tener problemas con los comandos del teclado, ya que en PuTTY si coincidían los caracteres del teclado con los de la computadora física que alberga la máquina virtual.

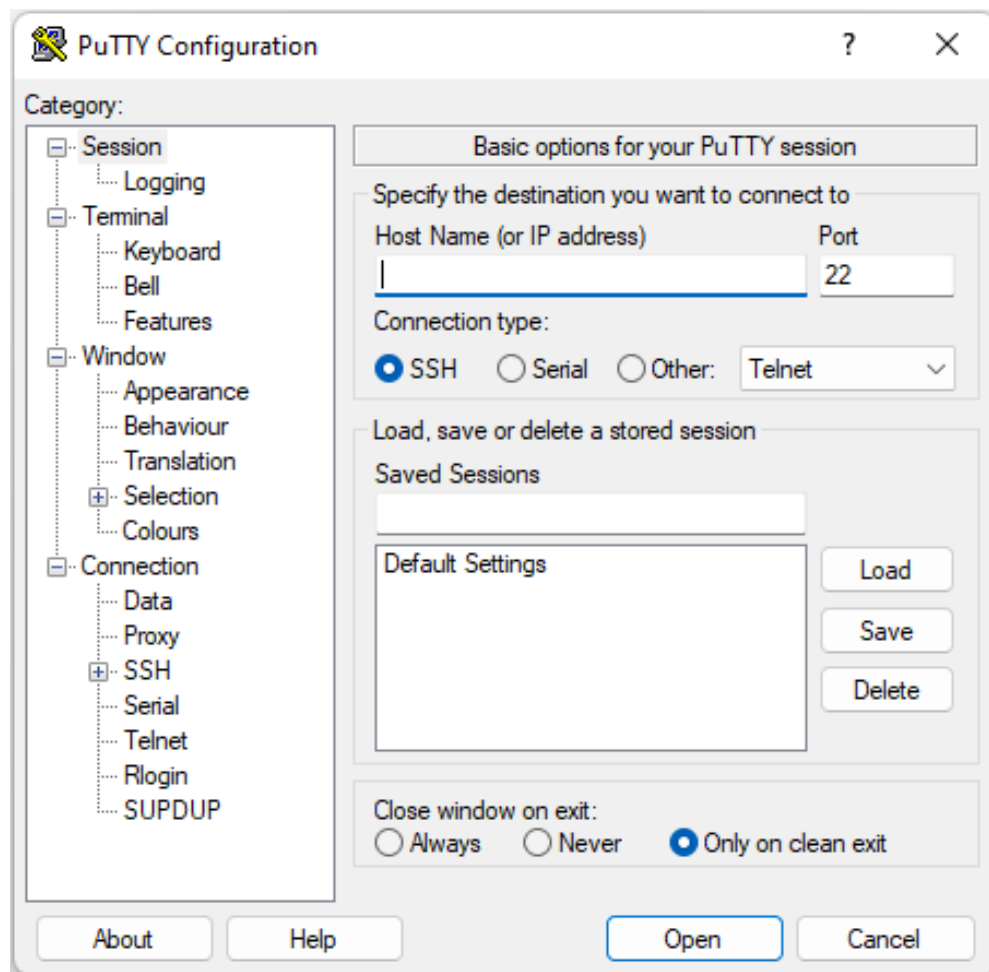
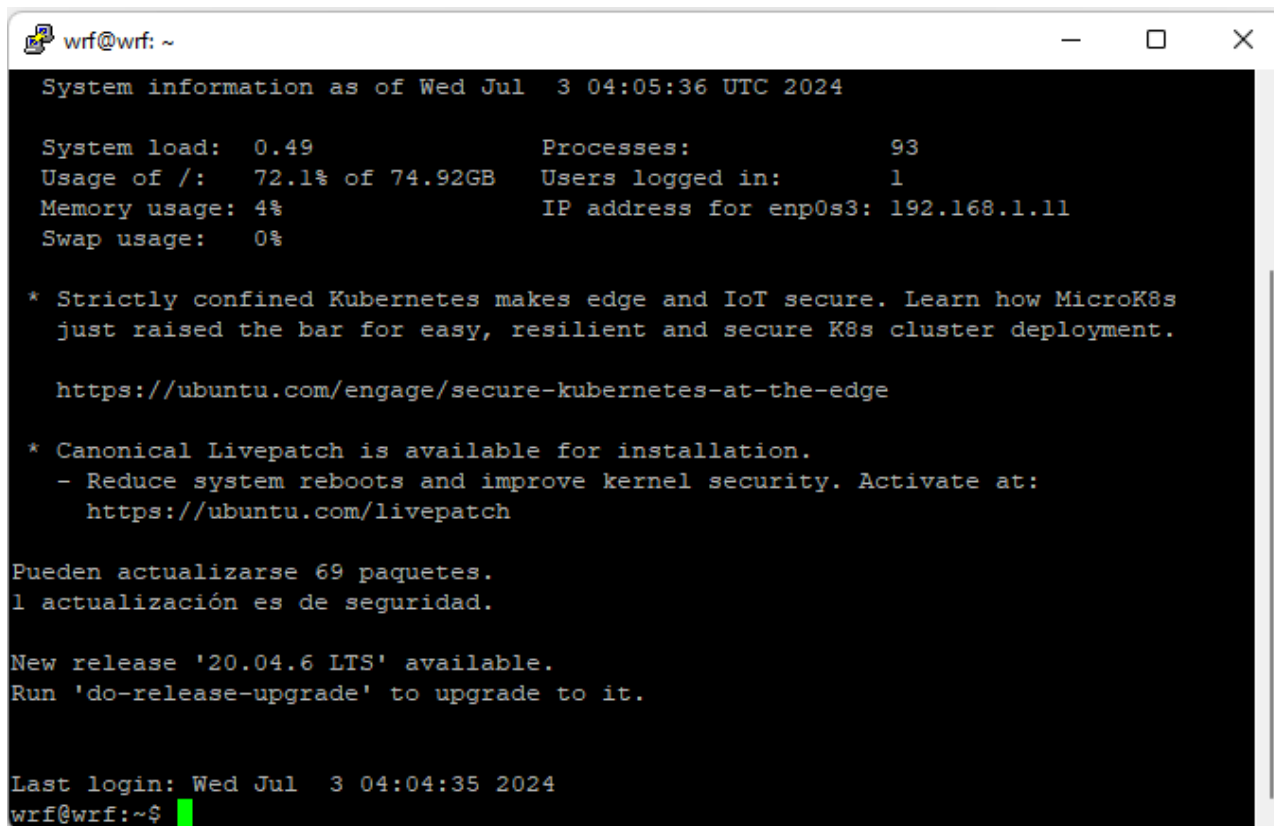


Figura 30. Inicio de Sesión en PuTTY.

A screenshot of a terminal window titled 'wrf@wrf: ~'. The terminal displays system information as of Wednesday, July 3, 2024, at 04:05:36 UTC. It shows system load (0.49), usage of / (72.1% of 74.92GB), memory usage (4%), swap usage (0%), processes (93), users logged in (1), and IP address for enp0s3 (192.168.1.11). There are two promotional messages: one for MicroK8s and another for Canonical Livepatch. Below these, it states that 69 packages can be updated, including one security update. It also mentions a new release '20.04.6 LTS' is available. At the bottom, it shows the last login time and the current prompt 'wrf@wrf:~\$' with a green cursor.

```
wrf@wrf: ~  
System information as of Wed Jul  3 04:05:36 UTC 2024  
  
System load:  0.49          Processes:           93  
Usage of /:   72.1% of 74.92GB Users logged in:       1  
Memory usage: 4%          IP address for enp0s3: 192.168.1.11  
Swap usage:   0%  
  
* Strictly confined Kubernetes makes edge and IoT secure. Learn how MicroK8s  
just raised the bar for easy, resilient and secure K8s cluster deployment.  
  
https://ubuntu.com/engage/secure-kubernetes-at-the-edge  
  
* Canonical Livepatch is available for installation.  
- Reduce system reboots and improve kernel security. Activate at:  
https://ubuntu.com/livepatch  
  
Pueden actualizarse 69 paquetes.  
1 actualización es de seguridad.  
  
New release '20.04.6 LTS' available.  
Run 'do-release-upgrade' to upgrade to it.  
  
Last login: Wed Jul  3 04:04:35 2024  
wrf@wrf:~$
```

Figura 31. WRF abierto en PuTTY.

4.2.2. Datos de reanálisis

Para la predicción climática, es crucial contar con datos iniciales precisos y confiables, es por eso que se optó por utilizar la base de datos del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR). El Archivo de Datos de Investigación (RDA, por sus siglas en inglés) de NSF NCAR alberga una vasta y variada colección de observaciones meteorológicas, datos sobre la composición atmosférica y oceanográfica, así como resultados de modelos operativos y de reanálisis. Estos datos están integrados con los recursos de computación de alto rendimiento de NSF NCAR, lo que respalda significativamente la investigación en ciencias atmosféricas y geocientíficas [34].

La RDA es gestionada por la Sección de Ingeniería y Curación de Datos (DECS) del Laboratorio de Sistemas Computacionales y de Información (CISL) del NCAR. Para acceder a esta base de datos, es necesario registrarse en su sitio web y esperar la aprobación correspondiente, cabe mencionar que se requiere de un iD ORCID para

iniciar sesión. La base de datos que se utilizó para la elaboración del modelo fue la “NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products” (Figura 32).

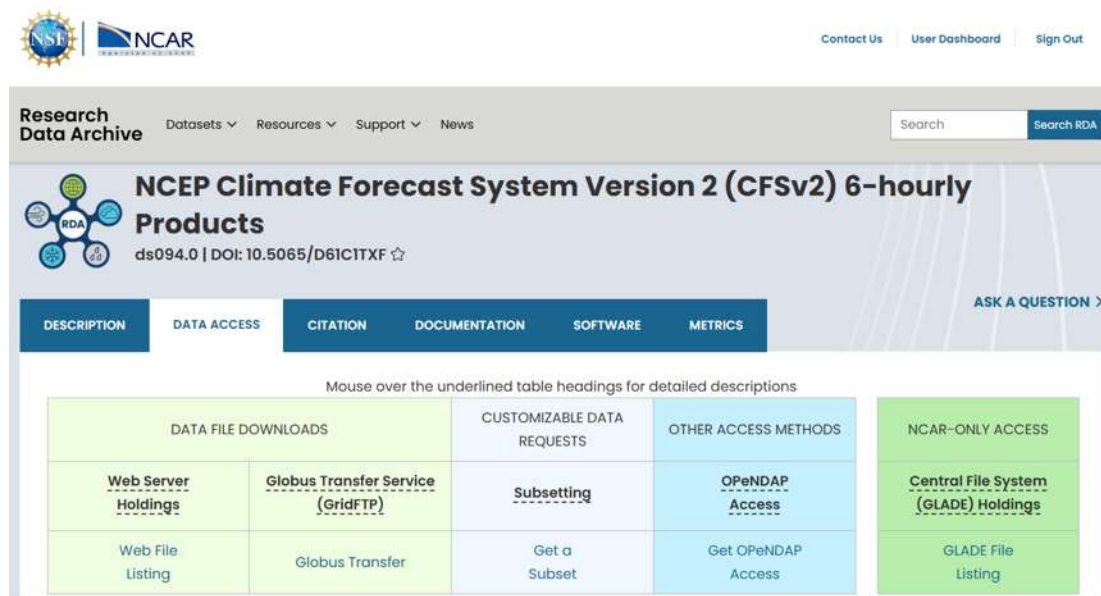


Figura 32. Sistema de Pronóstico Climático NCEP Versión 2 (CFSv2) Productos de 6 horas.

Para la obtención de los datos de reanálisis se tienen que descargar tres diferentes tipos de datos para la misma hora de estudio (Figura 33):

- WRF Model Input: Vtable.SST
- WRF Model Input: Vtable.CFSR – Surface
- WRF Model Input: Vtable.CFSR – Pressure levels

Figura 33. Selección de parámetros.

El Sistema de Pronóstico Climático NCEP Versión 2 (CFSv2), nos genera productos de cada 6 horas, es decir, la base de datos que elegimos para obtener nuestros datos de reanálisis nos generará 1 archivo por cada 6 horas, si analizamos un día, este nos arrojará 4 archivos. Sin embargo, recordaremos que se descargan 3 tipos de datos, por lo que en total se descargarán por cada 6 horas un archivo Pressure levels, dos archivos Surface (ya que estos se descargan doble) y un archivo SST, dando en total 4 archivos por cada 6 horas. Si descargamos datos para un día de pronóstico obtendríamos entonces un total de 20 archivos como se muestra en la Tabla 3.

WRF Model Input	Número de archivos por 24 horas
Pressure levels	5
Surface	10
SST	5

Tabla 3. Archivos generados por el Sistema de Pronóstico Climático NCEP

A pesar de que la cantidad de archivos que se descarga parecieran ser excesivos, una ventaja que se tiene es que el tamaño de los archivos no es mucho, algunos de estos pesan megabytes, algo que no pasa con otras bases de datos, ya que hay algunos de

estos archivos que en otras bases de datos pueden llegar a pesar inclusive hasta medio Gigabyte.

El procedimiento a seguir para la descarga de los archivos de reanálisis es meramente de manera manual, ya que, si es importante verificar la conexión a la red para evitar que se interrumpa la descarga y se descarguen archivos dañados, es decir, incompletos o vacíos. Algo que también se debe de tener en cuenta es el orden de los archivos descargados, por lo que se debe de cuidar que no se revuelvan, tratando de guardar cada tipo de archivo en diferente carpeta (PRESS, SURF y SST), además, esto nos ayudará en procedimientos futuros.

Una vez que tenemos todos los archivos de reanálisis utilizamos la aplicación WinSCP (Figura 34), una herramienta libre y de código abierto que nos permite efectuar operaciones básicas como lo es la descarga o subida de archivos entre la computadora física y la máquina virtual (Figura 35); por lo que, nuestros archivos de reanálisis los subimos a nuestra máquina virtual a través de ella.

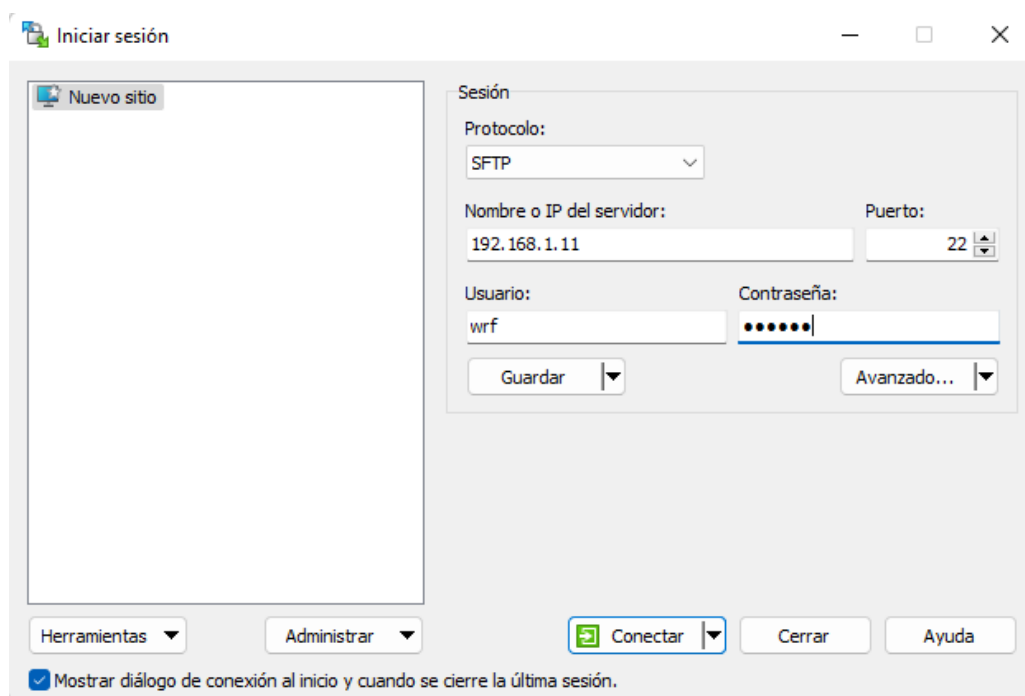


Figura 34. Inicio de sesión en WinSCP.

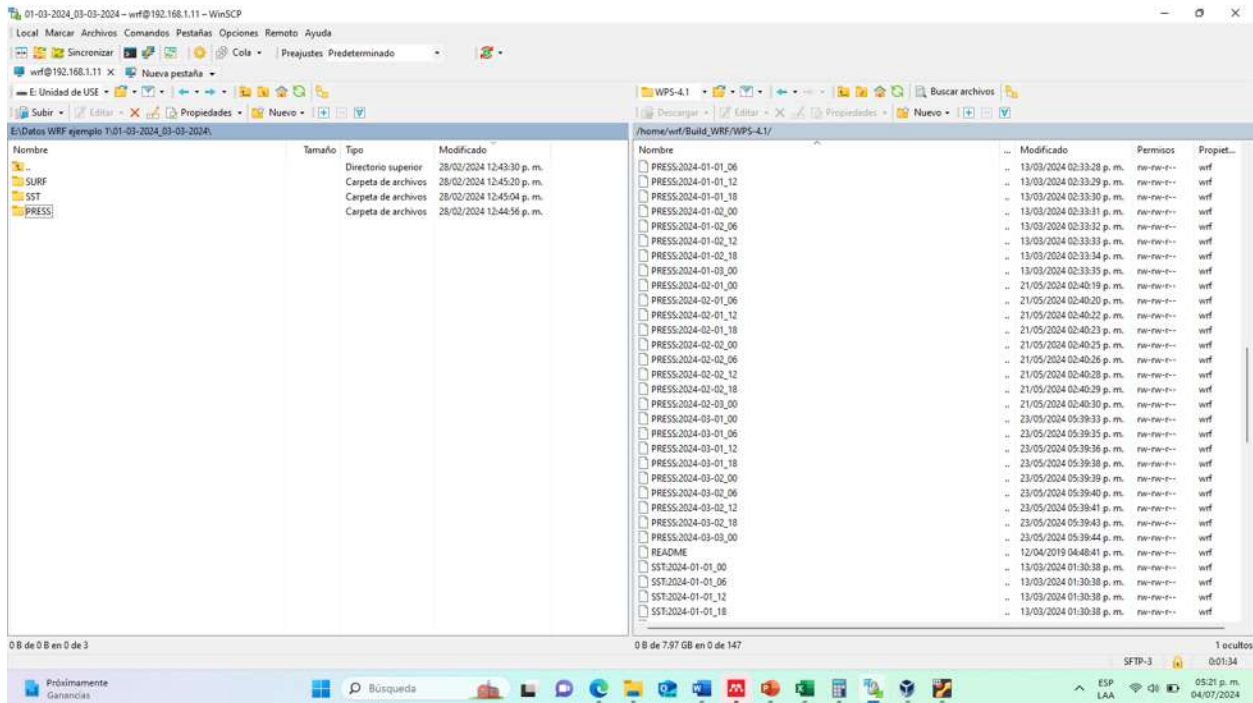


Figura 35. Interfaz de WinSCP.

4.2.3. Sistema de Preprocesamiento (WPS)

Hasta el momento hemos hablado de tres herramientas para la creación de nuestro modelo (Figura 36); ingresamos a nuestra máquina virtual, obtenemos la dirección IP para con ella ingresar a PuTTY y poder entrar al WRF contenido en nuestra máquina virtual, además de utilizar WinSCP para subir nuestros datos de reanálisis descargados del Centro Nacional de Investigación Atmosférica.



Figura 36. Herramientas utilizadas.

Es importante mencionar que WRF no posee una interfaz gráfica (como se observa en la Figura 31), por lo que para poder trabajar con el programa es necesario

utilizar líneas de comandos y recordando lo antes mencionado, es más cómodo trabajar conectándose a la máquina virtual a través de PuTTY, por las razones anteriormente comentadas.

El WRF se ejecuta en un entorno Linux, aprovechando las ventajas de este sistema operativo en términos de estabilidad, seguridad y manejo eficiente de recursos. Linux es especialmente adecuado para tareas de computación intensiva como las que requiere WRF, debido a su capacidad para gestionar grandes volúmenes de datos y ejecutar cálculos complejos de manera eficiente. Los comandos de Linux se ejecutan en la Terminal pulsando “Enter” al final de la línea. Puedes ejecutar comandos para realizar diversas tareas, desde la instalación de paquetes hasta la gestión de usuarios y la manipulación de archivos [35].

El Sistema de Preprocesamiento o WPS (WRF Preprocessing System) consiste de tres programas: *geogrid.exe*, *ungrib.exe* y *metgrid.exe*, cuya función colectiva es hacer los preparativos necesarios para la ejecución del programa *real.exe* para la simulación de datos reales. Su ejecución está dirigida con un archivo de texto llamado *namelist.wps* que contiene las configuraciones específicas para cada tarea.

En el archivo de configuración *namelist.wps*, es crucial establecer las fechas para los datos iniciales del modelo. Para ejemplificar el modelado, los datos utilizados para hacer el ejemplo abarcan desde el 1 de enero del 2024 a las 00:00 horas hasta el 3 de enero del 2024 a las 00:00 horas. Este rango temporal se selecciona para garantizar una adecuada captación y procesamiento de la información climática necesaria para las simulaciones.

La configuración del intervalo entre cada archivo de reanálisis también es fundamental. En este caso, el intervalo es de 6 horas, equivalente a 21600 segundos. Este valor se especifica en la línea *interval_seconds* del archivo *namelist.wps*.

```
&share  
wrf_core = 'ARW',  
max_dom = 1,  
start_date = '2024-03-01_00:00:00',  
end_date = '2024-03-03_00:00:00',  
interval_seconds = 21600
```

```
|| io_form_geogrid = 2,  
/
```

Esta configuración permite que el modelo WRF utilice datos de reanálisis actualizados cada 6 horas, proporcionando así una base sólida para generar pronósticos climáticos precisos durante el período especificado. Al asegurarse de que los datos se actualicen con la frecuencia necesaria, se mejora la calidad y la fiabilidad de las predicciones generadas por el modelo.

En la siguiente sección del archivo `namelist.wps`, se detallan las instrucciones para la ejecución del programa `geogrid.exe`. Este programa es esencial para definir las características espaciales de la malla utilizada en el modelo, incluyendo el tamaño y la resolución.

Primero, se establecen las dimensiones de la malla con los parámetros `e_we` y `e_sn`, que determinan el número de puntos en las direcciones este-oeste y norte-sur, respectivamente. A continuación, se especifica la resolución de la malla mediante `dx` y `dy`, que representan las dimensiones del espacio de la malla en kilómetros.

Además, se determinan las coordenadas del punto medio de la malla con `ref_lat` y `ref_lon`, que establecen la latitud y longitud de referencia central. También se define la proyección cartográfica más adecuada para la simulación mediante `map_proj`, junto con parámetros adicionales como `truelat1` y `truelat2`, que especifican las latitudes verdaderas para la proyección.

```
&geogrid  
parent_id      = 1,  
parent_grid_ratio = 1,  
i_parent_start  = 1,  
j_parent_start  = 1,  
e_we           = 70,  
e_sn           = 80,  
geog_data_res  = 'default',  
dx = 30000,  
dy = 30000,  
map_proj = 'lambert',  
ref_lat  = 16.6174,  
ref_lon  = -94.9777,  
truelat1 = 30.0,
```

```

truelat2 = 60.0,
stand_lon = -94.9777,
geog_data_path = '../WPS_GEOG/'
/
&ungrib
out_format = 'WPS',
prefix = 'PRESS',
/
&metgrid
fg_name = 'PRESS', 'SURF', 'SST',
io_form_metgrid = 2,
/

```

Una vez configurados estos parámetros, se guarda el archivo *namelist.wps* y se procede a ejecutar *./geogrid.exe*. La ejecución de este programa generará un archivo de salida denominado *geo_em.d01.nc*, que contiene la información espacial necesaria para las etapas posteriores del procesamiento del modelo WRF.

Este archivo *geo_em.d01.nc* es fundamental, ya que incluye la malla de la superficie terrestre con todas las características geográficas especificadas, proporcionando así una base sólida para las simulaciones del modelo climático.

La siguiente sección del archivo *namelist.wps* está dedicada a *ungrib.exe*. Este programa se encarga de leer los archivos iniciales, extraer la información necesaria y reescribirla en un formato intermedio más simple y manejable. Este formato intermedio es de libre elección y se utilizará para las etapas posteriores del procesamiento.

Para organizar los datos iniciales, estos se han dividido en tres carpetas:

- PRESS: Contiene los archivos de niveles de presión.
- SURF: Contiene los datos de superficie.
- SST: Contiene los archivos de Temperatura de la Superficie del Mar (SST).

Cada una de estas carpetas tiene su función específica y contiene datos esenciales para la correcta simulación del modelo WRF.

Además, cada base de datos cuenta con su propia tabla de conversiones, conocida como *Vtable*, que es crucial para que *ungrib.exe* interprete correctamente los

datos. En este caso, se utiliza la tabla de conversiones *Vtable.CFSR*, que se selecciona con el siguiente comando:

```
| In -sf ungrib/Variable_Tables/Vtable.CFSR Vtable
```

Este comando crea un enlace simbólico a la *Vtable* correspondiente, asegurando que *ungrib.exe* utilice la tabla de conversiones correcta para los datos de reanálisis de CFSR. A continuación, se debe mostrarle al programa la ruta de los archivos de análisis mediante el script *link_grib.csh*, como se indica a continuación:

```
| ./link_grib.csh /home/wrf/Build_WRF/WPS-4.1/01-01-2024_03-01-2024/ PRESS/
```

A continuación, se ejecuta *./ungrib.exe* para procesar los datos iniciales, esta ejecución toma los archivos de datos divididos en las carpetas *PRESS*, *SURF*, y *SST*, los procesa y genera archivos en un formato intermedio. Este formato simplificado facilita la integración de los datos en las siguientes fases del modelo WRF, asegurando que toda la información necesaria esté disponible y sea coherente.

La correcta configuración y ejecución de *ungrib.exe* es esencial para el éxito del modelo de pronóstico, ya que proporciona los datos de entrada cruciales para las etapas posteriores de simulación y análisis. En la configuración del archivo *namelist.wps*, se define el nombre de los archivos intermedios que se obtendrán después de ejecutar *ungrib.exe*. Este paso es crucial para organizar los datos procesados y facilitar su identificación en etapas posteriores del modelado. Por ejemplo, se utilizó el prefijo *PRESS* para recordar que estos archivos contienen los niveles de presión y están almacenados en la carpeta *PRESS*.

A continuación, se muestra un fragmento del archivo *namelist.wps* con las configuraciones relevantes para *ungrib.exe*:

```
| &ungrib  
| out_format = 'WPS',  
| prefix = 'PRESS',  
| /
```

Esta configuración indica que el formato de salida será *WPS* y que los archivos intermedios generados por *ungrib.exe* tendrán el prefijo *PRESS*. Se ejecuta el *ungrib.exe*

como se mencionó anteriormente y observamos que nos arroja 9 archivos PRESS como podemos observar en la Figura 37.

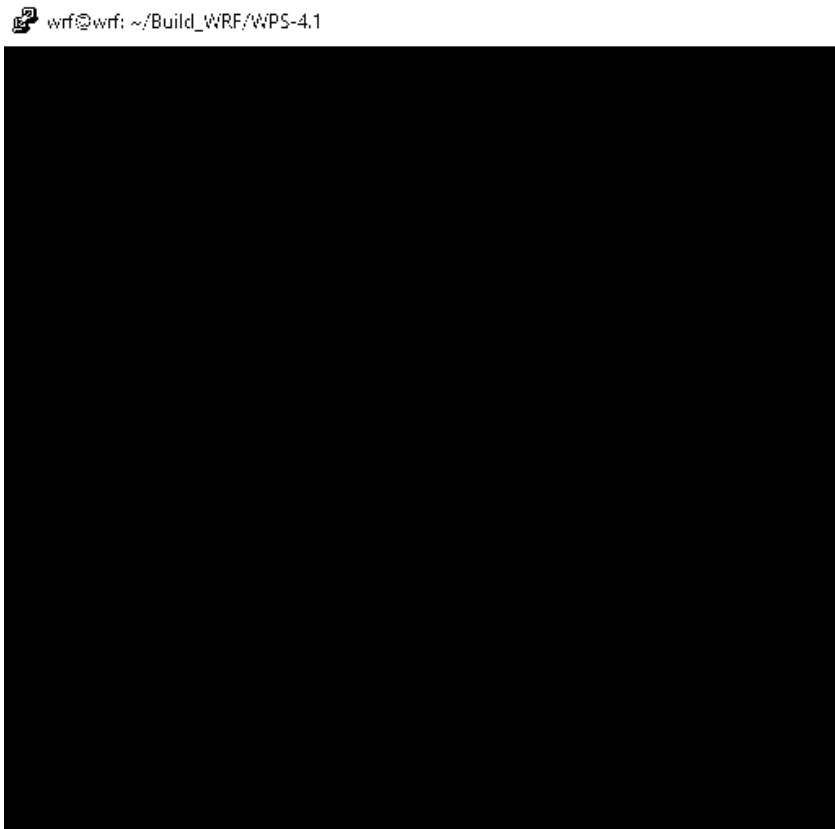


Figura 37. Archivos PRESS.

Nuevamente se enlazan los archivos de reanálisis, pero para la siguiente carpeta SURF para lo cual se ejecuta el comando:

```
./link_grib.csh /home/wrf/Build_WRF/WPS-4.1/01-01-2024_03-01-2024/ SURF/
```

Para lo cual se hacen las modificaciones correspondientes en el *namelist.wps* para SURF y con esta configuración ahora el formato de salida será WPS y los archivos generados por ungrib.exe tendrán el prefijo SURF.

```
&ungrib  
out_format = 'WPS',  
prefix = 'SURF',  
/
```

Se ejecuta de nuevo el ungrib.exe y observamos que nos arroja 9 archivos SURF como podemos observar en la Figura 38.



Figura 38. Archivos SURF.

Nuevamente repetimos el proceso, pero ahora para los archivos SST, ejecutamos:

```
|| ./link_grib.csh /home/wrf/Build_WRF/WPS-4.1/01-01-2024_03-01-2024/ SURF/
```

Modificación correspondiente al namelist:

```
|| &ungrib  
|| out_format = 'WPS',  
|| prefix = 'SST',  
|| /
```

Se ejecuta de nuevo el ungrib.exe y observamos que nos arroja 9 archivos SURF como podemos observar en la Figura 39.



Figura 39. Archivos SST.

Al finalizar este proceso obtenemos 27 archivos (9, PRESS, 9 SURF y 9 SST). última sección del archivo namelist.wps está dedicada a metgrid, cuya función principal es realizar la interpolación horizontal de los datos meteorológicos contenidos en los archivos PRESS, SURF y SST, generados por ungrib.exe. Esta información se integra en el dominio geo_em.d01.nc previamente definido por geogrid.exe.

Para configurar metgrid, se deben especificar los parámetros necesarios en el archivo namelist.wps. A continuación, se muestra un ejemplo de cómo se estructuró esta sección:

```
&metgrid  
fg_name = 'PRESS', 'SURF', 'SST',  
io_form_metgrid = 2,  
/
```

En esta configuración, *fg_name* define los prefijos de los archivos que *metgrid.exe* procesará, y *io_form_metgrid* indica el formato de salida de los archivos interpolados.

Una vez configurado el archivo *namelist.wps*, se procede a ejecutar *metgrid.exe* para interpolar los datos y generar los archivos necesarios para la simulación del modelo WRF. Los pasos son los siguientes:

1. Verificar la configuración de *namelist.wps*: asegurarse de que los parámetros están correctamente configurados para los archivos PRESS, SURF y SST.
2. Ejecutar *metgrid.exe*: utilizando la terminal, se ejecuta el comando *./metgrid.exe*

Este comando interpolará los datos meteorológicos y los integrará en el dominio *geo_em.d01.nc*.

Una vez que ejecutamos obtenemos 9 archivos de salida como se muestra en la Figura 40, estos archivos son muy importantes para realizar el modelo de pronóstico.

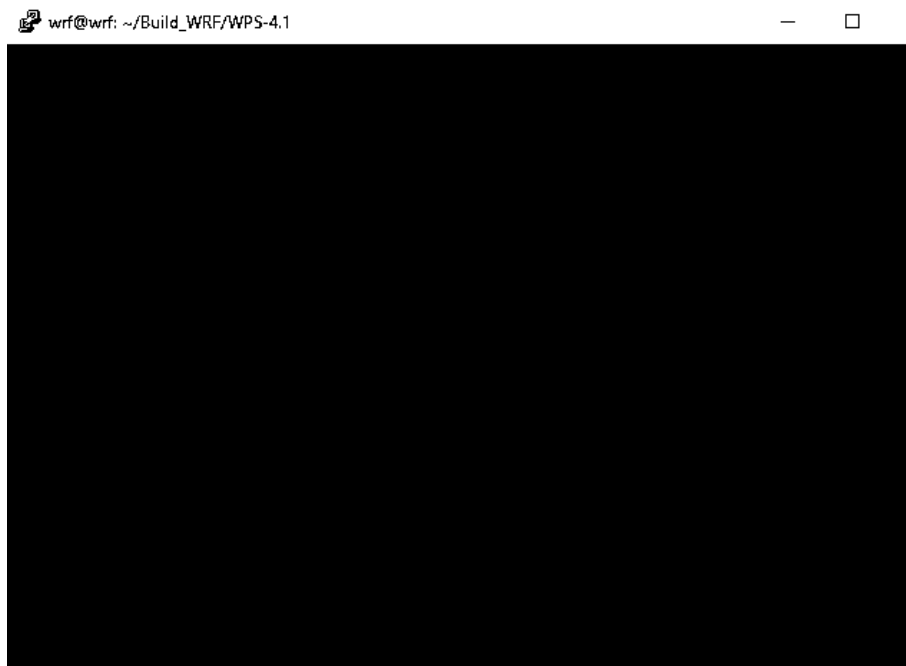


Figura 40. Archivos *met_em-d01.nc*

4.2.4. Integrador Numérico WRF-ARW

Una vez completados los tres procesos que componen el WPS y obtenidos los archivos denominados *met_em.d01*, es necesario transferir estos archivos a la carpeta run de WRF usando el siguiente comando:

```
| cp met_em.d01.2024-0* /home/wrf/WRF/Build_WRF/WRF-4.1.5/run/
```

WRF-ARW consiste en dos programas principales, el primero *real.exe*, un programa de inicialización y el *wrf.exe*, un programa de integración numérica. El programa WRF utiliza los esquemas de integración numérica de Runge-Kutta de segundo y tercer orden para integrar cada punto de la malla en la que se ha dividido la atmósfera.

Similar al WPS, el WRF cuenta con un archivo de configuración denominado *namelist.input*, el cual controla la ejecución del integrador y solucionador WRF. A continuación, se muestra la configuración realizada para estructurar este archivo:

```
&time_control
run_days           = 2,
run_hours          = 0,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = 2024,
start_month        = 01,
start_day          = 01,
start_hour         = 00,
end_year           = 2024,
end_month          = 01,
end_day            = 03,
end_hour           = 00,
interval_seconds   = 21600
input_from_file     = .true.,
history_interval    = 60,
frames_per_outfile  = 24,
restart            = .false.,
restart_interval    = 7200,
io_form_history     = 2
io_form_restart     = 2
io_form_input       = 2
io_form_boundary    = 2
/
```

La primera sección del archivo *namelist.input* está dedicada a la configuración de la duración del pronóstico. Aquí se establecen los siguientes parámetros clave:

1. Duración del Pronóstico:

- run_days = 2: Define que la duración del pronóstico será de 2 días.

2. Fechas del Pronóstico:

- start_year, start_month, start_day, start_hour: Especifican la fecha y hora de inicio del pronóstico.
- end_year, end_month, end_day, end_hour: Especifican la fecha y hora de finalización del pronóstico.

3. Intervalo de Archivos met:

- interval_seconds = 21600: Indica que el intervalo entre los archivos met es de 6 horas, equivalentes a 21,600 segundos.

4. Intervalo de Archivos de Salida:

- history_interval = 60: Define el intervalo de los archivos de salida del modelo WRF, configurado para 1 hora (60 minutos).

5. Cantidad de Datos Pronosticados por Archivo de Salida:

- frames_per_outfile = 24: Especifica que cada archivo de salida contendrá 24 horas de datos pronosticados, es decir, 1 día de pronóstico por archivo. Para un pronóstico de 2 días, se generarán 2 archivos de salida.

```
&domains
time_step                = 120,
time_step_fract_num      = 0,
time_step_fract_den      = 1,
max_dom                  = 1,
e_we                     = 70,
e_sn                     = 80,
e_vert                   = 33,
p_top_requested          = 5000,
num_metgrid_levels       = 38,
num_metgrid_soil_levels  = 4,
dx                       = 30000,
dy                       = 30000,
grid_id                  = 1,
parent_id                = 0,
i_parent_start           = 1,
j_parent_start           = 1,
```

```

parent_grid_ratio      = 1,
parent_time_step_ratio = 1,
feedback               = 1,
smooth_option          = 0
/

```

La segunda sección del archivo *namelist.input* comparte varios ajustes con el archivo *namelist.wps* del proceso WPS. Estos ajustes incluyen parámetros como *e_we*, *e_sn*, *dx*, *dy*, y otros específicos de la configuración del modelo WRF. En cuanto al tamaño y resolución de la malla *e_we* y *e_sn*, son parámetros que definen el tamaño de la malla en las direcciones este-oeste y norte-sur, respectivamente; *dx* y *dy*, son parámetros que especifican la resolución espacial de la malla en las direcciones este-oeste y norte-sur, respectivamente.

Mientras que *num_metgrid_levels*, es un parámetro que depende de la base de datos de reanálisis utilizada y define el número de niveles verticales en los datos de entrada generados por metgrid. El comando *time_step*, corresponde al intervalo de tiempo de los archivos de salida, configurado en segundos, para un intervalo de 1 hora, este parámetro se establece en 3600 segundos.

La configuración adecuada de estos parámetros es crucial para asegurar que el modelo WRF funcione de manera eficiente y precisa. La resolución espacial y el número de niveles verticales afectan la capacidad del modelo para capturar detalles importantes de la atmósfera, mientras que el intervalo de tiempo de salida determina la frecuencia con la que se generan los datos de pronóstico. Esta combinación de ajustes permite obtener resultados que son tanto detallados como manejables para el análisis posterior.

```

&physics
mp_physics      = 6,
cu_physics      = 1,
ra_lw_physics   = 4,
ra_sw_physics   = 4,
bl_pbl_physics  = 6,
sf_sfclay_physics = 2,
sf_surface_physics = 2,
radt            = 30,
bltd            = 0,
cudt            = 5,
icloud          = 1,

```

```

num_land_cat          = 21,
sf_urban_physics      = 0,
/
&fdda
/

```

Esta sección es de las más importantes para obtener un buen pronóstico, ya que corresponde a los parámetros físicos o la física del modelo. La selección adecuada de estos parámetros depende en gran medida de la zona geográfica del pronóstico, y existen varias propuestas publicadas que guían esta elección. Para el modelo de pronóstico aplicado a la zona de La Mata, Oaxaca, se han seleccionado esos parámetros físicos que han demostrado ser efectivos para la generación de pronósticos precisos en esta región específica.

El comando *mp_physics* = 6, selecciona un esquema de microfísica adecuado para capturar procesos de nubes y precipitación; *ra_lw_physics* = 4, define el esquema utilizado para la radiación de onda larga, importante para representar el enfriamiento radiativo nocturno; *ra_sw_physics* = 4, este parámetro se utiliza para modelar la radiación solar de onda corta, crucial para representar la influencia solar en la atmósfera; *sf_surface_physics* = 2, elige un esquema que modela las interacciones entre la superficie terrestre y la atmósfera; *bl_pbl_physics* = 6, este esquema es crítico para representar la turbulencia y los flujos en la capa límite planetaria; *cu_physics* = 1, utilizado para modelar la convección profunda, fundamental en áreas con actividad convectiva significativa.

```

&dynamics
w_damping              = 0,
diff_opt               = 1,
km_opt                 = 4,
diff_6th_opt           = 0,
diff_6th_factor        = 0.12,
base_temp              = 290.
damp_opt               = 3,
zdamp                  = 5000.,
dampcoef               = 0.2,
khdif                  = 0,
kvdif                  = 0,
non_hydrostatic        = .true.,
moist_adv_opt           = 1,
scalar_adv_opt          = 1,

```

```

gwd_opt          = 1,
/
&bdy_control
spec_bdy_width   = 5,
specified         = .true.
/
&grib2
/
&namelist_quilt
nio_tasks_per_group = 0,
nio_groups = 1,
/

```

La última sección del archivo *namelist.input* está dedicada a los ajustes del proceso de integración del modelo, especificados bajo el bloque *&dynamics*. Aquí se definen parámetros cruciales para la precisión y eficiencia de la simulación del pronóstico meteorológico. El modelo WRF-ARW permite utilizar esquemas de integración de segundo o tercer orden, los cuales son fundamentales para resolver las ecuaciones dinámicas del modelo con alta precisión temporal.

Además, el parámetro *non_hydrostatic* es crucial para indicar si el modelo operará bajo suposiciones no hidrostáticas. En la mayoría de los casos, se opta por un modelo no hidrostático (*non_hydrostatic = .true.*), lo que permite una simulación más detallada de los movimientos verticales de la atmósfera, siendo especialmente importante para pronósticos de alta resolución donde los fenómenos convectivos son relevantes.

También se configuran características relacionadas con la difusión, que ayudan a suavizar las fluctuaciones numéricas y mejorar la estabilidad del modelo. Estos ajustes son esenciales para asegurar que las soluciones del modelo sean físicas y no presenten artefactos numéricos indeseados.

Tras realizar los ajustes necesarios en el archivo *namelist.input*, el siguiente paso consiste en ejecutar el programa *real.exe*. Este programa está diseñado para casos reales y se encarga de establecer la inicialización del modelo, así como las condiciones de frontera. Como se observa en la Figura 41, la ejecución de *real.exe* genera dos archivos cruciales: *wrfinput_d01* y *wrfbdy_d01*.

```
-rw-rw-r-- 1 wrf wrf 13283991 may 24 17:00 wrfbdy_d01
lrwxrwxrwx 1 wrf wrf      15 oct 26  2020 wrf.exe -> ../main/wrf.exe*
-rw-rw-r-- 1 wrf wrf 6156819 may 24 17:00 wrfinput_d01
```

Figura 41. Archivos *wrfbdy_d01* y *wrfinput_d01*.

Con estos archivos listos, se dispone de todo lo necesario para proceder con la integración numérica que producirá el pronóstico meteorológico. Este proceso se inicia con el comando *./wrf.exe* y la ejecución de este comando es el núcleo del modelo de pronóstico, y debido a la complejidad de los cálculos numéricos involucrados, es también la etapa que más tiempo consume. La duración de esta tarea depende de la cantidad de días a pronosticar y de los recursos computacionales disponibles. Cuanto más potente sea el procesador, más rápido se completará el proceso.

Al finalizar la ejecución de *wrf.exe*, se obtienen los archivos de salida que contienen los datos pronosticados. Estos archivos son el resultado final del modelo de pronóstico y proporcionan la información necesaria para el análisis meteorológico (Figura 42).

```
-rw-rw-r-- 1 wrf wrf 181805124 mar 16 22:59 wrfout_d01_2024-01-01_00:00:00
-rw-rw-r-- 1 wrf wrf 189745267 mar 16 23:08 wrfout_d01_2024-01-02_00:00:00
-rw-rw-r-- 1 wrf wrf 8921993 mar 16 23:09 wrfout_d01_2024-01-03_00:00:00
-rw-rw-r-- 1 wrf wrf 190447853 may 22 00:55 wrfout_d01_2024-02-01_00:00:00
-rw-rw-r-- 1 wrf wrf 190287327 may 22 01:06 wrfout_d01_2024-02-02_00:00:00
-rw-rw-r-- 1 wrf wrf 8794104 may 22 01:06 wrfout_d01_2024-02-03_00:00:00
-rw-rw-r-- 1 wrf wrf 181536393 may 24 17:16 wrfout_d01_2024-03-01_00:00:00
-rw-rw-r-- 1 wrf wrf 186238044 may 24 17:31 wrfout_d01_2024-03-02_00:00:00
-rw-rw-r-- 1 wrf wrf 8751572 may 24 17:32 wrfout_d01_2024-03-03_00:00:00
```

Figura 42. Archivos *wrfout*.

Como último paso guardamos nuestros archivos *wrfout* en la carpeta *ARWpost* (*cp wrfout_d01_2024-0* /home/wrf/ARWpost*), para posteriormente ejecutar el comando *./ARWpost.exe*. Este proceso genera dos archivos con los nombres asignados, como se observa en la Figura 43, los archivos resultantes son *Pronostico48horas.ctl* y *Pronostico48horas.dat*. Estos archivos contienen los datos de pronóstico que se procesarán y analizarán posteriormente.

 Pronostico48horas.ctl	16/03/2024 04:03 p. m.	Archivo CTL	16 KB
 Pronostico48horas.dat	16/03/2024 04:03 p. m.	Archivo DAT	1,210,293 KB

Figura 43. Archivos .ctl y .dat.

Estos archivos son esenciales para el trabajo en el post procesamiento, ya que *Pronostico48horas.ctl* sirve como archivo de control, definiendo la estructura y el contenido del archivo de datos *Pronostico48horas.dat* y se utiliza esta información para acceder, manipular y visualizar los datos de pronóstico de manera efectiva. La preparación y correcta configuración de estos archivos es crucial para asegurar que el análisis de datos se realice sin problemas y con precisión.

4.2.5. Post Procesamiento de datos

Para procesar los archivos .ctl y .dat generados por WRF-ARW, existen varias herramientas desarrolladas, muchas de ellas externas al propio WRF. En este modelo de pronóstico, se optó por utilizar Open GrADS (The Grid Analysis and Display System), como se muestra en la Figura 44, debido a que se ajustaba mejor a los propósitos específicos del análisis de datos de pronóstico.

GrADS es una herramienta diseñada para facilitar el acceso, manipulación y visualización de datos climatológicos terrestres [36]. Esta herramienta permite una integración eficaz con los archivos .ctl y .dat, proporcionando una interfaz robusta para el análisis y visualización de datos climáticos complejos. Su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos y su flexibilidad en la visualización de resultados lo convierten en una elección ideal para este proyecto de pronóstico.

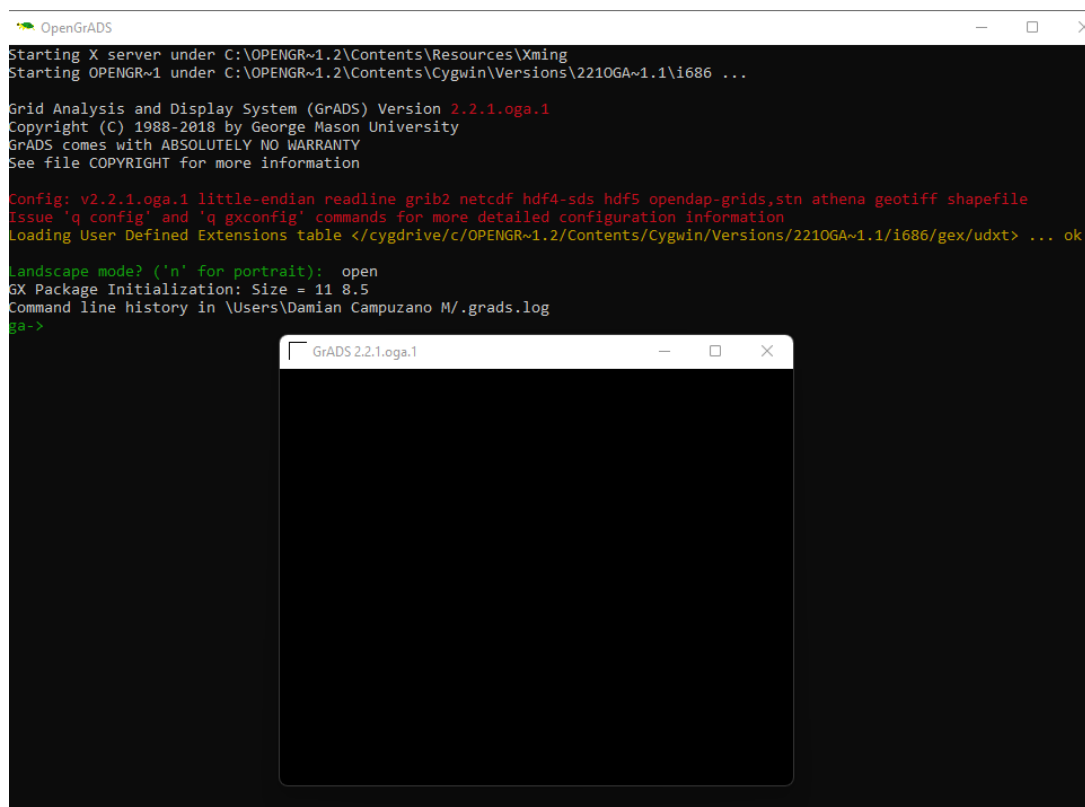


Figura 44. Open GrADS

GrADS está diseñado para la creación de mapas y gráficos basados en información meteorológica, por lo que debe instalarse en un sistema operativo gráfico como Windows. No es compatible con la máquina virtual que opera únicamente con líneas de comando.

Una vez que GrADS está instalado en un sistema operativo gráfico, es necesario transferir los archivos Pronostico48horas.ctl y Pronostico48horas.dat desde la máquina virtual al equipo físico con el que estamos trabajando. Para realizar esta transferencia, se utiliza nuevamente el software WinSCP, que también fue empleado para transferir los archivos de reanálisis al entorno de la máquina virtual como se mostró en la Figura 35. Dado el tamaño de los archivos, este proceso puede llevar un tiempo considerable.

Una vez completada la transferencia, para abrir los archivos .ctl y .dat en GrADS, se utiliza el siguiente comando, el cual contiene la ruta de la ubicación exacta del archivo .ctl, por ejemplo, para el pronóstico del 01 de febrero del 2024 al 03 de febrero del 2024

tenemos la siguiente ruta: open C:\Users\Procesamientodedatos_WRF\Pronostico_01-02-2024\Archivos_de_ARWpost\Feb01Pronostico48horas), como se muestra en la Figura 45:

```
GX Package Initialization: Size = 11 8.5
Command line history in \Users\Damian Campuzano M/.grads.log
<odedatos_WRF\Pronostico_01-02-2024\Archivos_de_ARWpost\Feb01Pronostico48horas.ct1
Scanning description file: C:\Users\Procesamientodedatos_WRF\Pronostico_01-02-2024\Archivos_de_ARWpost\Feb01Pronostico48horas.ct1
Data file C:\Users\Procesamientodedatos_WRF\Pronostico_01-02-2024\Archivos_de_ARWpost\Feb01Pronostico48horas.dat is open as file 1
LON set to -106.378 -83.8106
LAT set to 5.57363 27.8709
LEV set to 1 1
Time values set: 2024:2:1:0 2024:2:1:0
E set to 1 1
Notice: Implied interpolation for file C:\Users\Procesamientodedatos_WRF\Pronostico_01-02-2024\Archivos_de_ARWpost\Feb01Pronostico48horas.ct1
Interpolation will be performed on any data displayed from this file
ga-> set lat 16.617357
LAT set to 16.6547 16.6547
ga-> set lon -94.977722
LON set to -95.0268 -95.0268
ga-> d mag(u10,v10)
Notice: Automatic Grid Interpolation Taking Place
ga-> set t 1 25
Time values set: 2024:2:1:0 2024:2:2:0
ga-> set t 1 40
Time values set: 2024:2:1:0 2024:2:3:0
ga-> set gxout print
ga-> set prnopts %f 1 1
ga-> d mag(u10,v10)
Notice: Automatic Grid Interpolation Taking Place
Printing Grid -- 49 Values -- Undef = -9.99e+08
```

Figura 45. Comandos en Open GrADS.

Para enfocar el análisis en la velocidad del viento en un punto específico, como lo es nuestra zona de estudio, La Mata, Oaxaca, se utilizan comandos específicos en GrADS, como se muestra en la Figura 45. Primero, se establecen las coordenadas de latitud y longitud del punto de interés con los comandos *set lat 16.617357* y *set lon -94.977722*. El comando *d mag (u10, v10)* muestra la magnitud del componente del viento en la superficie, donde u10 y v10 representan los componentes del viento en las direcciones este-oeste y norte-sur, respectivamente a 10 metros de altura en m/s.

```
OpenGrADS
Printing Grid -- 49 Values -- Undef = -9.99e+08
5.073450
7.771203
7.178620
7.504819
7.840373
8.191590
8.101018
8.153931
8.254496
8.246093
8.112238
8.170149
7.780745
7.568717
8.012870
9.006521
9.841760
10.248532
10.788554
11.058614
10.850576
10.409773
9.744649
8.908978
7.022616
5.458299
5.674567
5.999223
5.992532
5.892223
5.668141
5.585269
5.569854
5.143691
4.645770
4.572768
4.643653
4.404648
4.201375
3.968205
2.996684
1.713337
0.768210
0.642771
1.969234
3.592727
5.190634
6.216631
5.870696
ga->
```

Figura 46. Pronóstico de velocidad del viento.

Los demás comandos mostrados en la Figura 45, como el `set t 1 49`, establece el tiempo de la visualización, en este caso, del primer al 49º período de tiempo en el archivo de datos. Aquí, 1 y 49 corresponden al índice del tiempo en los datos, lo que te permite seleccionar el intervalo deseado para la visualización del pronóstico.

`Set gxout print`, configura el modo de salida para que los datos se impriman en la ventana de comandos de GrADS en lugar de graficar visualmente. Esto es útil para obtener datos en formato tabular. `set prnopts %f 1 1`, define el formato de impresión para los datos, donde %f indica un formato flotante con una precisión específica. Los valores 1 1 especifican el número de decimales y `d mag (u10, v10)`, calcula y muestra la magnitud del viento a partir de los componentes u10 (este-oeste) y v10 (norte-sur). La función `mag`

se utiliza para obtener la magnitud del vector del viento, arrojando con ello el valor del pronóstico para cada hora seleccionada como se muestra en la Figura 46.

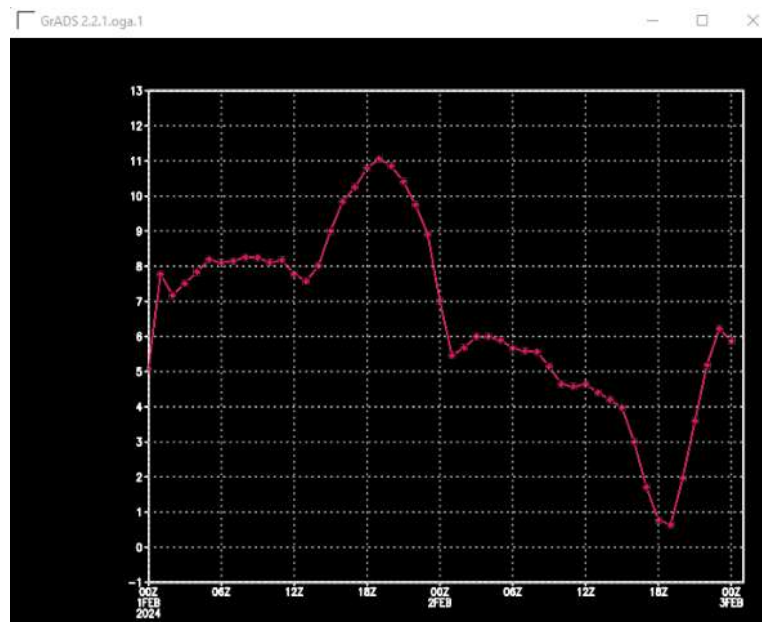


Figura 47. Terminal o consola de GrADS.

En GrADS, cuando abres un archivo con el comando open, se abre una ventana de terminal o consola de GrADS. Esta ventana se utiliza para interactuar con GrADS, ejecutar comandos y ver los resultados de las operaciones realizadas sobre los datos meteorológicos. La ventana de terminal de GrADS es donde se ingresan los comandos, se visualizan los resultados y se realizan análisis de datos. Como se muestra en la Figura 47, podemos visualizar un previo del comportamiento del modelo con los datos arrojados en la Figura 46.

Otro comando que se utilizó para obtener información visual de nuestro modelo fue *set gxout shaded* con lo que obtuvimos un mapa de la velocidad promedio del viento para cada pronóstico como se muestra en la Figura 48.

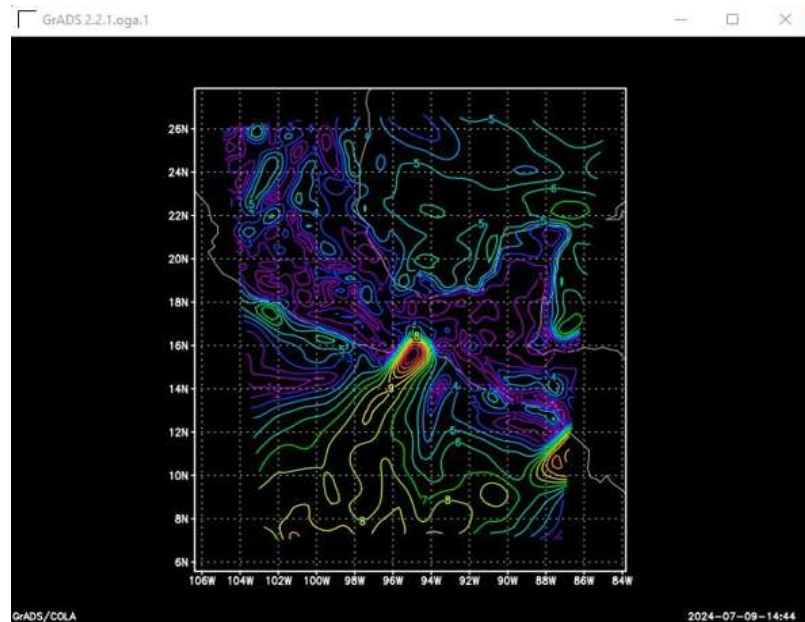


Figura 48. Mapa de la velocidad del viento promedio del 01 de febrero al 03 de febrero del 2024.

Dado que los resultados del modelo de pronóstico se basan en simulaciones, es crucial compararlos con datos observacionales reales para validar su precisión. Los datos observacionales de la NASA de los recursos energéticos mundiales [37] se obtuvieron en hojas de cálculo de Excel y se descargaron de la plataforma NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Data Access Viewer (DAV) (Figura 49).

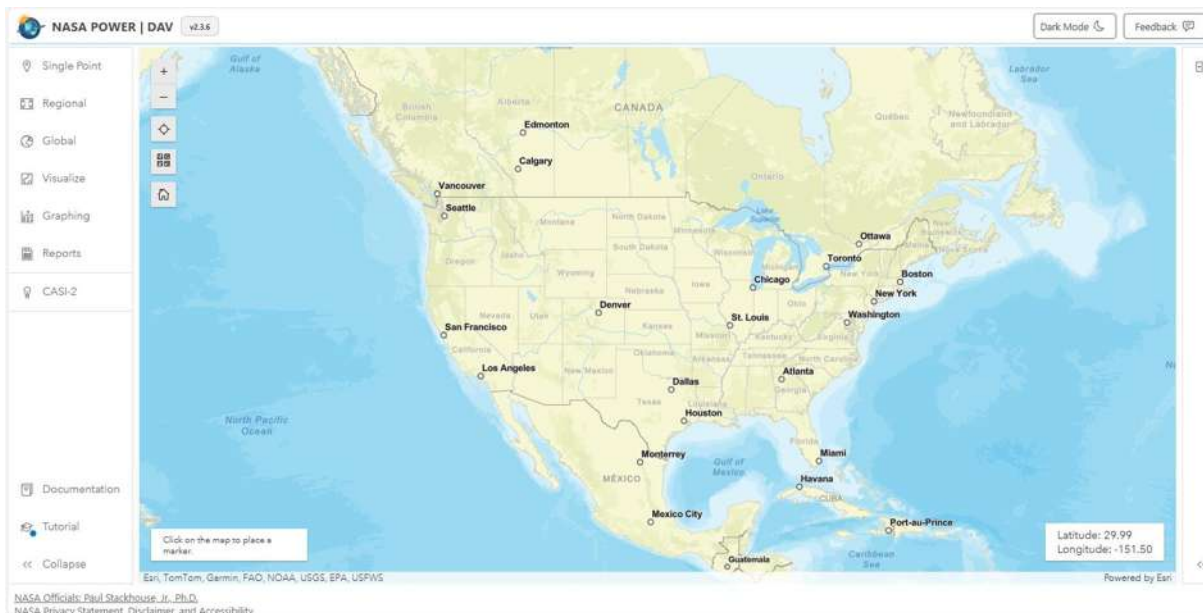


Figura 49. Interfaz NASA POWER

Los datos reales observados de la plataforma de NASA contienen las mismas características que los del pronóstico, es decir, las mismas coordenadas, días y alturas, como se muestra en la Figura 50.

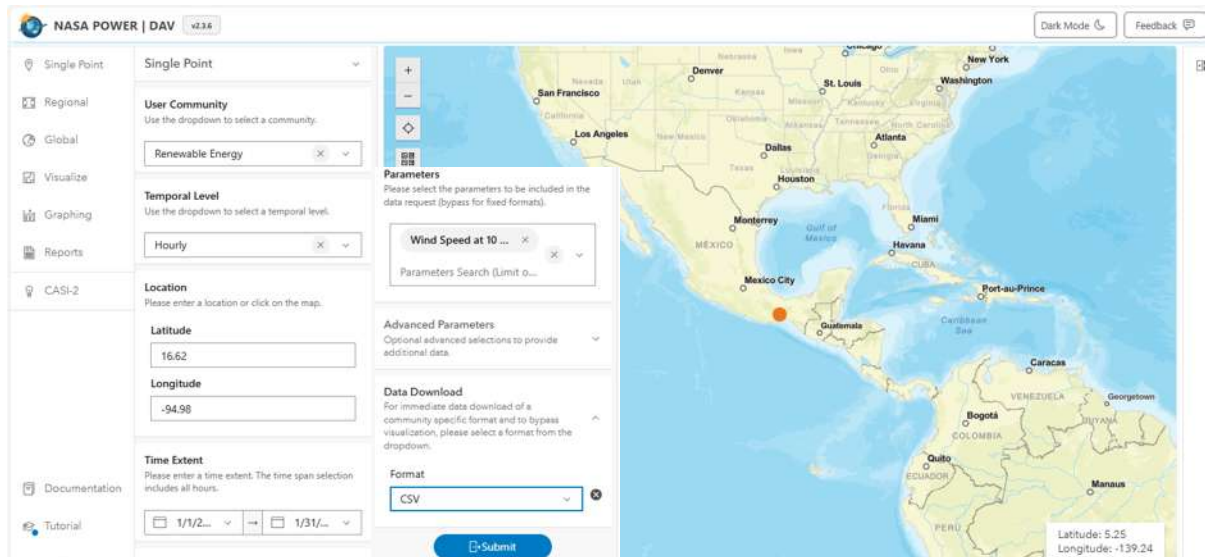
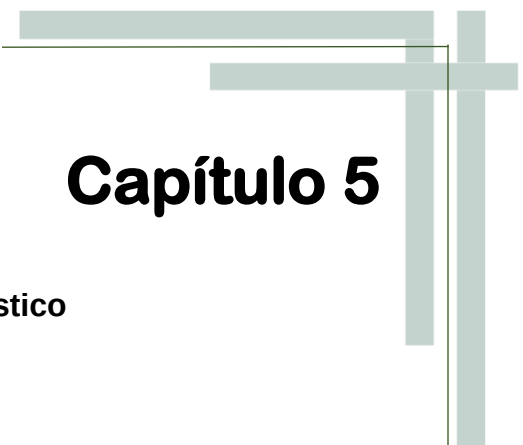


Figura 50. Descarga de datos para validar el modelo.

Una vez que los datos pronosticados se encuentran en el mismo formato Excel junto con los reales, es posible realizar comparaciones directas con los datos reales observados, permitiendo así una evaluación más precisa del rendimiento del modelo.



Capítulo 5

5.1. Validación del modelo de pronóstico

5.1.1. Validación cualitativa del modelo

Una vez que se tienen los datos del modelo es importante cuantificar que tan preciso es, dicho en otras palabras, es importante comparar que tan cercanos son los datos pronosticados con los datos reales; el medir esta exactitud no es tan sencillo ya que no existe un método de evaluación estandarizado para que sea aplicado a todos los modelos de predicción meteorológica y es sólo mediante la experimentación que se puede determinar este desempeño del modelo.

Mayoritariamente en investigaciones previas, se observa que el método más utilizado por su efectividad se basa en la comparación de métricas de error entre los datos pronosticados y las mediciones reales observacionales, en nuestra investigación utilizamos dicho método para analizar cuantitativamente la efectividad de nuestro modelo de pronóstico, sin embargo, proponemos una validación cualitativa en una escala regional previa a validar el modelo con las métricas de error para la zona en específico de La Mata.

Para esta validación cualitativa utilizaremos datos observacionales de la plataforma NASA Giovanni que nos proporcionan una visualización regional que facilita la interpretación y el análisis de las condiciones del viento en un contexto más amplio y nos permitirá hacer una comparación previa en las regiones de estudio para corroborar si las velocidades promedio del modelo de pronóstico con WRF y los datos observacionales reales de Giovanni para los días y horas seleccionados son similares.

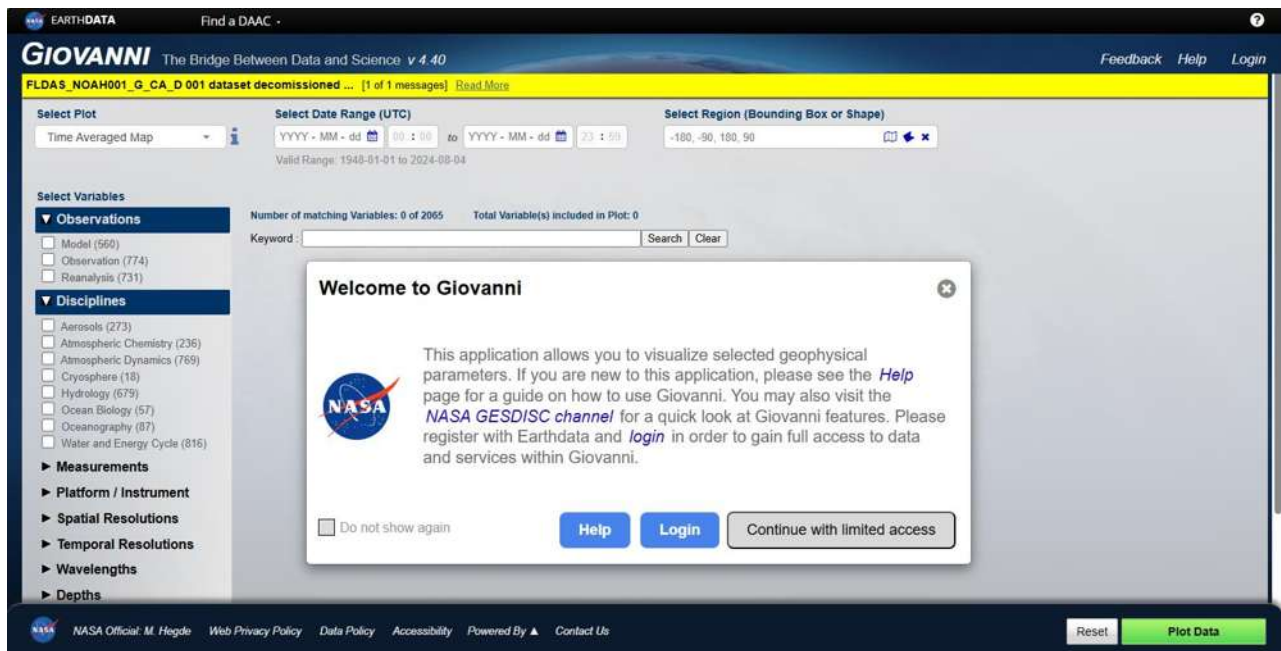


Figura 51. Interfaz NASA Giovanni.

Con la validación cualitativa del modelo, obtuvimos los siguientes datos para la velocidad del viento promedio en los tres horizontes de pronóstico realizados:

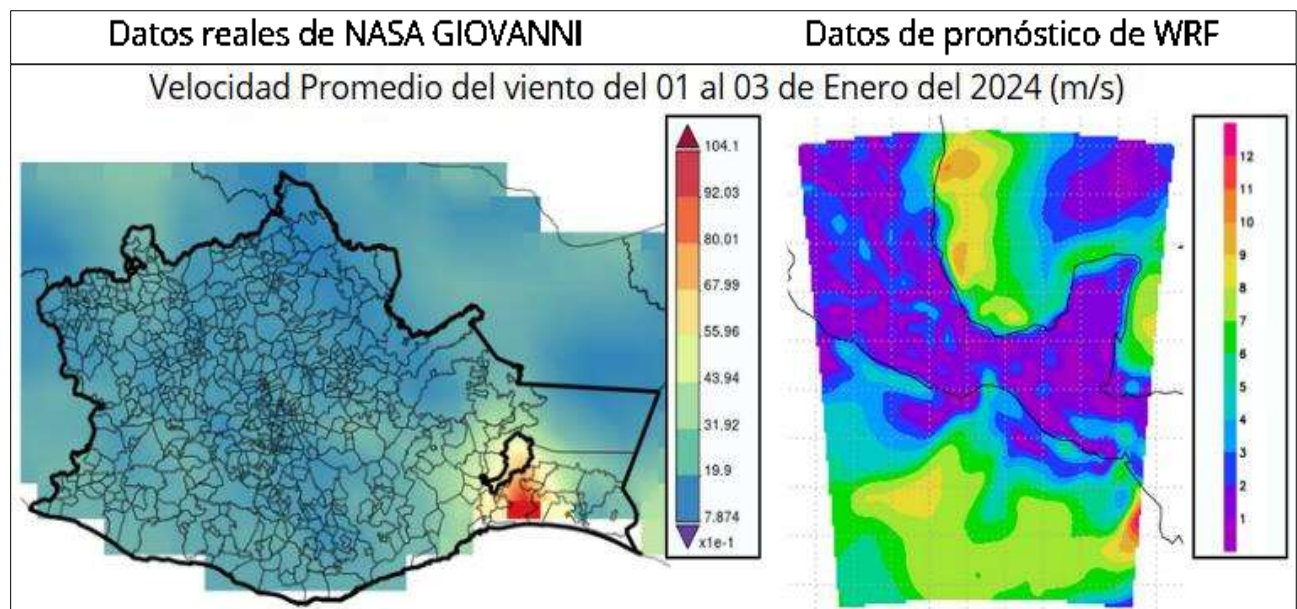


Figura 52. Velocidad Promedio del viento del 01 al 03 de enero del 2024

Como se muestra en la Figura 52 donde muestra el mapa de pronóstico de WRF y el mapa de datos observacionales de Giovanni, la velocidad del viento en la zona de estudio para el 01 al 03 de enero, según el WRF, varió entre 3 y 7 m/s. Al comparar esto con los datos obtenidos de la plataforma Giovanni, encontramos mediciones entre 4.3 y 6.7 m/s para las mismas condiciones, coincidiendo ambos rangos de velocidades.

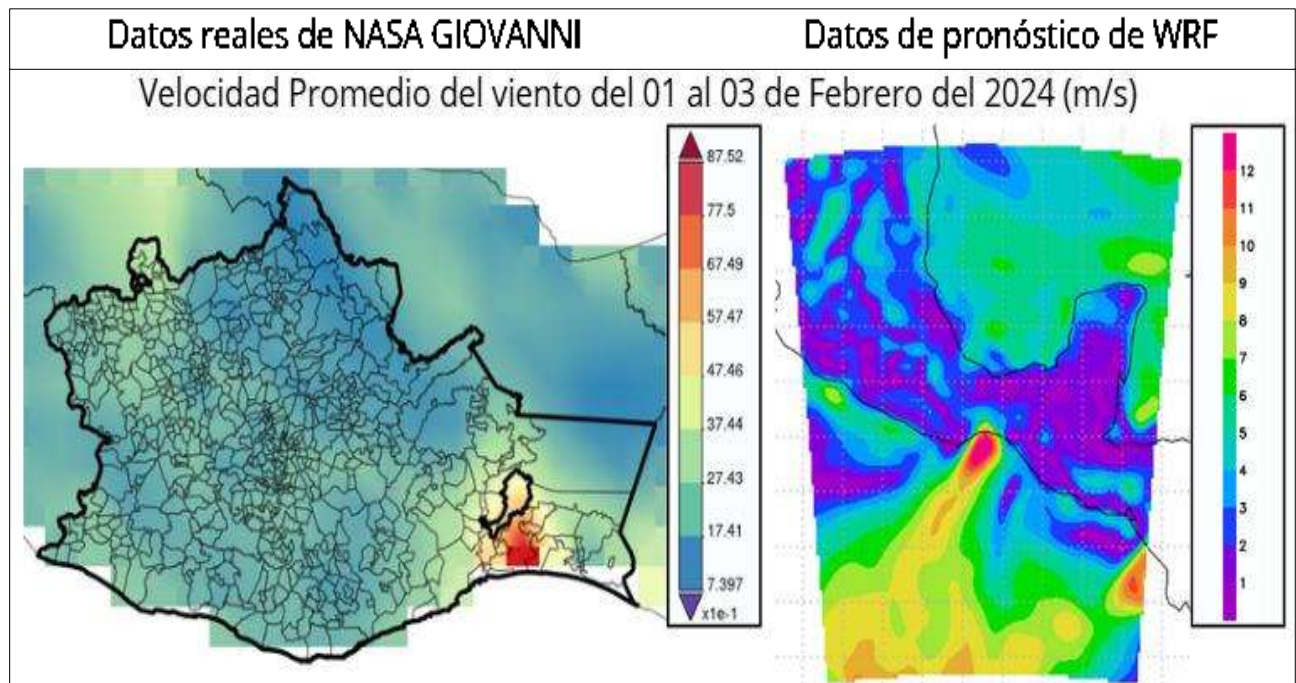


Figura 53. Velocidad Promedio del viento del 01al 03 de febrero del 2024.

En la Figura 53, se muestra nuevamente el mapa de pronóstico de WRF y el mapa de datos observacionales de Giovanni para el 1 al 3 de febrero de 2024, donde el WRF indicó velocidades del viento de 3 a 7 m/s, mientras que Giovanni registró velocidades entre 4.7 y 6.7 m/s, estas comparaciones no resultan ser tan indiferentes una de la otra.

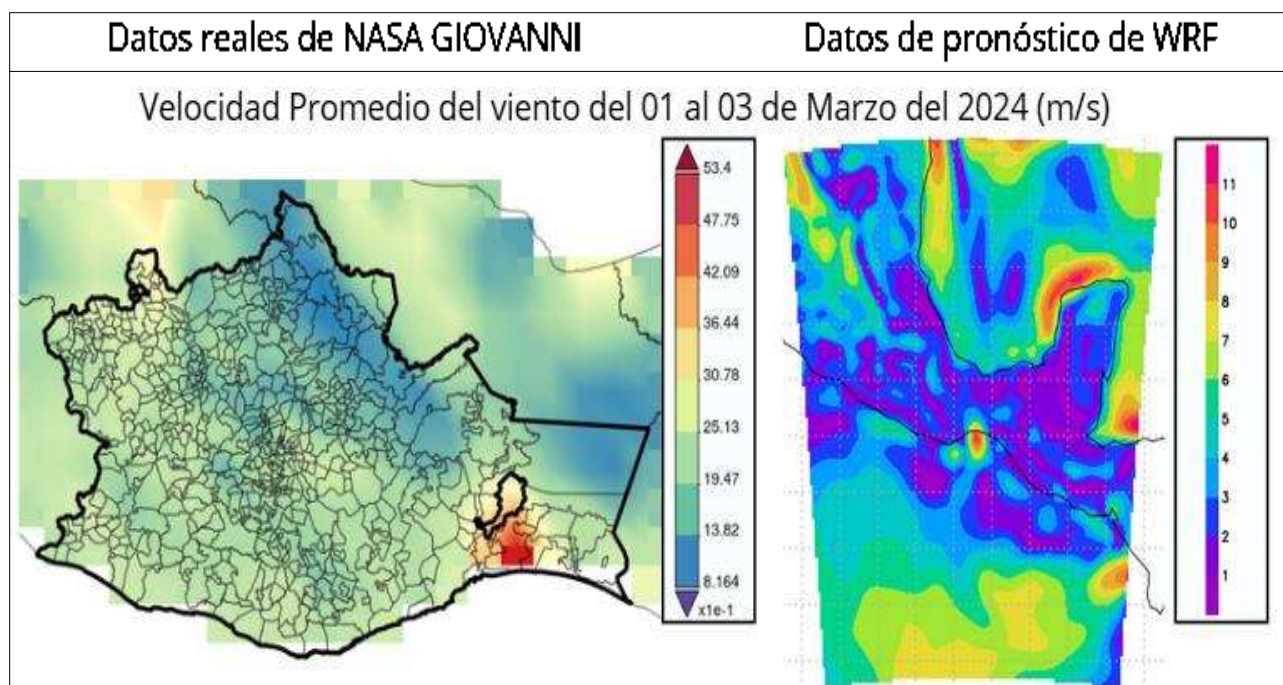


Figura 54. Velocidad Promedio del viento del 01 al 03 de marzo del 2024.

La Figura 54 nos proporciona una comparación visual de las predicciones para 01 al 03 de marzo de 2024 y el comportamiento observacional real de Giovanni donde el WRF predijo velocidades entre 3 y 6 m/s, y Giovanni mostró velocidades de 4.7 a 6.7 m/s, obteniéndose nuevamente valores con alta similitud entre sí.

Las comparaciones de los rangos de velocidades promedio obtenidos son muy similares para cada pronóstico en comparación con los datos de Giovanni. Los mapas generados nos muestran de forma gráfica la comparación de las velocidades promedio entre las predicciones del WRF y los datos observacionales de Giovanni para los tres horizontes de pronóstico. Las discrepancias iniciales observadas no son significativamente grandes, lo que sugiere una buena correlación entre el modelo de pronóstico y los datos observacionales de Giovanni.

5.1.2. Validación cuantitativa del modelo

Como ya se mencionó anteriormente, para la validación cuantitativa, se utilizaron datos reales obtenidos de la base de datos de Predicción de la NASA de los recursos

energéticos mundiales, correspondientes a los días de pronóstico. Estos datos fueron descargados en formatos compatibles para su análisis comparativo en Excel.

Se realizó una comparación entre las predicciones del WRF y los datos observacionales utilizando las siguientes métricas de error:

- 1. Error Promedio Absoluto (MAE):** Esta métrica cuantifica la media de las diferencias absolutas entre las predicciones del modelo y los datos observacionales.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad [Ec.5.1]$$

Donde:

- P_i es el valor predicho.
- O_i es el valor observado.
- n es el número de observaciones.

Para saber que tan grande o pequeño es el error podemos obtenerlo en términos porcentuales de la siguiente manera:

$$\% MAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i} \quad [Ec.5.2]$$

- 2. Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE):** Esta métrica proporciona una medida de la magnitud de los errores en las predicciones del modelo, destacando los errores más grandes debido al cuadrado de las diferencias.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad [Ec.5.3]$$

De la misma manera, en términos porcentuales tenemos:

$$\% RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i} \quad [Ec.5.4]$$

3. Coeficiente de Correlación de Anomalías (ACC): Esta métrica mide la correlación entre las anomalías de las predicciones del modelo y las anomalías de los datos observacionales, evaluando la habilidad del modelo para capturar las variaciones del fenómeno estudiado.

$$ACC = \frac{\sum_{i=1}^n (P'_i * O'_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P'_i)^2 * \sum_{i=1}^n (O'_i)^2}} \quad [Ec.5.5]$$

Donde:

- $P'_i = P_i - \bar{P}$ es la anomalía del valor predicho.
- $O'_i = O_i - \bar{O}$ es la anomalía del valor observado.
- $\bar{P}$ es la media de las predicciones.
- $\bar{O}$ es la media de las observaciones.

En base a los valores arrojados por las métricas de error, al modelo se le puede asignar una categoría cuantitativa al modelo de pronóstico del viento utilizando estos índices. Dependiendo de los valores de MAE, RMSE y ACC, se puede clasificar el desempeño del modelo como Pobre, Aceptable, Bueno y Excelente, como se muestra en la Figura 55.

Grado	MAE (m/s)	RMSE (m/s)	ACC (sin unidad)
<i>Pobre</i>	> 3.0	> 3.0	< 0.50
<i>Aceptable</i>	< 3.0	< 3.0	> 0.50
<i>Bueno</i>	< 2.5	< 2.5	> 0.60
<i>Excelente</i>	< 2.0	< 2.0	> 0.75

Figura 55. Grados de desempeño estadístico del modelo de pronóstico del viento.

Para la validación cuantitativa de nuestro modelo de pronóstico en la zona de estudio de La Mata, municipio de Asunción Ixtaltepec en Oaxaca (Figura 18), recordaremos que se obtuvieron los datos observacionales de datos de Predicción de la NASA de los recursos energéticos mundiales como se muestra en la Figura 50 y se formularon los siguientes concentrados de datos para su análisis.

Para el primer modelo de pronóstico del 01 al 03 de enero del 2024 con los datos obtenidos se elaboró la Tabla 4.

Velocidad del viento en La Mata Oaxaca 01-01-2024 a 03-01-2024			
	Horas	Pronóstico	Medición real
1	00:00	3.370882	5.81
2	01:00	6.523	5.83
3	02:00	6.52686	5.72
4	03:00	6.138945	5.45
5	04:00	6.356718	5.13
6	05:00	6.625861	5.16
7	06:00	6.686736	5.26
8	07:00	6.649982	5.57
9	08:00	6.609237	5.64
10	09:00	6.532846	5.43
11	10:00	6.495832	4.63
12	11:00	6.498674	3.98
13	12:00	6.545294	3.81
14	13:00	6.722761	4.79
15	14:00	7.685192	5.88
16	15:00	8.416149	6.45
17	16:00	8.899159	6.63
18	17:00	9.335234	6.94
19	18:00	10.027284	7.35
20	19:00	10.299997	7.66
21	20:00	10.442523	7.79
22	21:00	10.420061	7.67
23	22:00	10.273398	7.38
24	23:00	9.921405	6.33
25	00:00	7.811809	5.41
26	01:00	7.315224	5.46
27	02:00	7.454228	5.46
28	03:00	7.720562	5.53
29	04:00	7.776898	5.47
30	05:00	7.739186	5.6
31	06:00	7.843668	5.79
32	07:00	7.698105	5.89
33	08:00	7.401644	5.85
34	09:00	7.202573	5.67

35	10:00	7.173773	5.44
36	11:00	7.16855	5.31
37	12:00	7.196313	5.18
38	13:00	7.069944	6.07
39	14:00	7.487261	7.19
40	15:00	8.187863	7.8
41	16:00	9.157847	7.64
42	17:00	9.865727	7.26
43	18:00	10.09111	6.88
44	19:00	9.916412	6.64
45	20:00	9.650276	6.55
46	21:00	9.290134	6.44
47	22:00	8.591838	6.16
48	23:00	7.667623	4.92
49	00:00	5.802076	3.64

Tabla 4. Velocidad del viento en La Mata del 01 al 03 de enero del 2024.

Con los datos contenidos en la Tabla 4, gráficamente podemos ver a simple vista que el comportamiento de ambos es similar, como se muestra en la Figura 56.

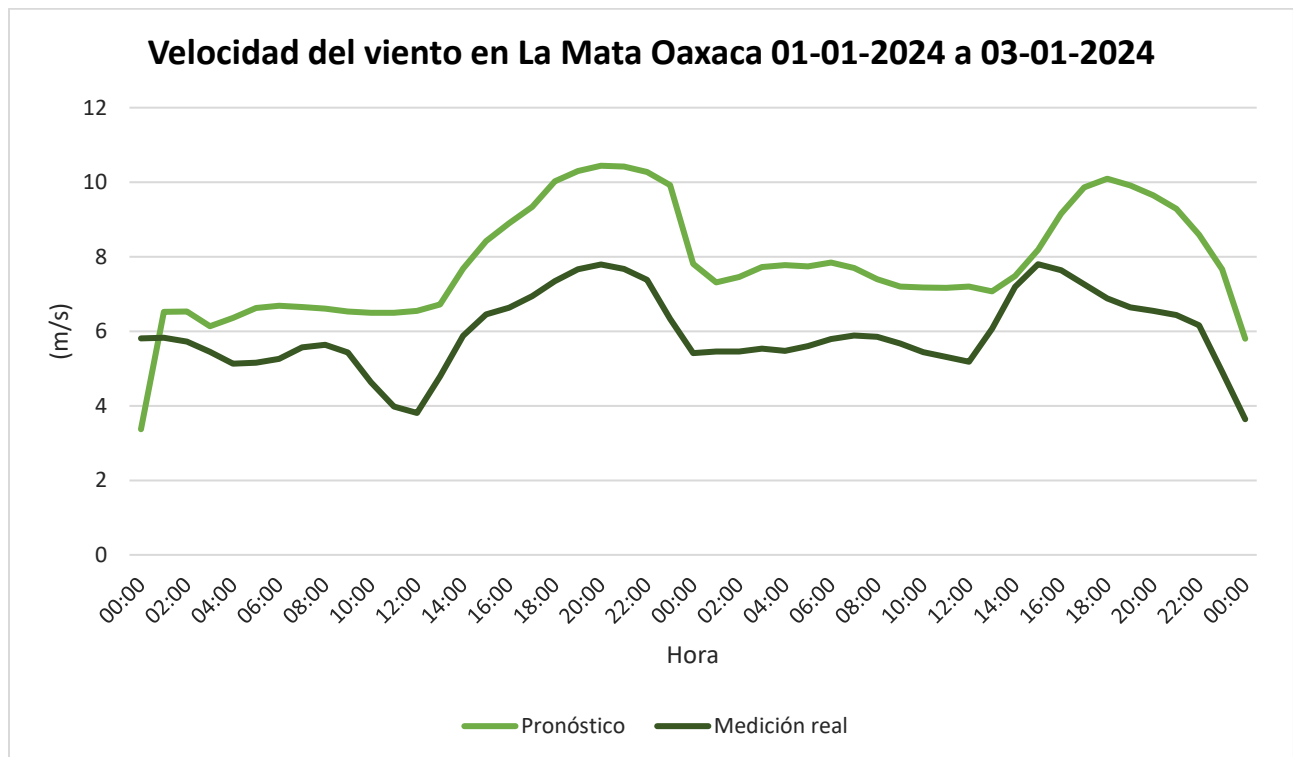


Figura 56. Datos de pronóstico vs datos reales del 01 al 03 de enero.

Realizando el análisis de las métricas de error se obtuvieron los valores de la Tabla 5 y que comparando los resultados con las etiquetas que nos indica la Figura 55, obtenemos que para el MAE se tiene un 0.33% de error y para el RMSE se tiene un error de 0.35%, concluyendo que el modelo tiene un desempeño Excelente.

Métrica	Resultado	Etiqueta
MAE	1.99230429	Excelente
RMSE	2.13584446	Bueno
ACC	0.98116562	Excelente

Tabla 5. Métricas de error del modelo 01 al 03 de enero.

Para el segundo modelo de pronóstico del 01 al 03 de febrero del 2024 con los datos obtenidos se elaboró la Tabla 6.

Velocidad del viento en La Mata Oaxaca 01-02-2024 a 03-02-2024			
	Horas	Pronóstico	Medición real
1	00:00	5.07345	6.94
2	01:00	7.771203	7.01
3	02:00	7.17862	6.81
4	03:00	7.504819	6.48
5	04:00	7.840373	5.94
6	05:00	8.19159	5.76
7	06:00	8.101018	5.61
8	07:00	8.153931	6.44
9	08:00	8.254496	7.56
10	09:00	8.246093	7.88
11	10:00	8.112238	7.57
12	11:00	8.170149	7.12
13	12:00	7.780745	6.68
14	13:00	7.568717	6.32
15	14:00	8.01287	6.12
16	15:00	9.006521	6.01
17	16:00	9.84176	5.93
18	17:00	10.248532	5.15
19	18:00	10.788554	4.34
20	19:00	11.058614	4.39
21	20:00	10.850576	4.28
22	21:00	10.409773	4.01
23	22:00	9.744649	3.47

24	23:00	8.908978	3.03
25	00:00	7.022616	2.64
26	01:00	5.458299	2.35
27	02:00	5.674567	2.02
28	03:00	5.999223	1.63
29	04:00	5.992532	1.09
30	05:00	5.892223	0.46
31	06:00	5.668141	0.22
32	07:00	5.585269	0.57
33	08:00	5.569854	1.46
34	09:00	5.143691	2.85
35	10:00	4.64577	3.37
36	11:00	4.572768	3.67
37	12:00	4.643653	3.91
38	13:00	4.404648	4.08
39	14:00	4.201375	3.94
40	15:00	3.968205	3.06
41	16:00	2.996684	1.57
42	17:00	1.713337	0.39
43	18:00	0.76821	1.23
44	19:00	0.642771	2.94
45	20:00	1.969234	4.84
46	21:00	3.592727	5.58
47	22:00	5.190634	5.62
48	23:00	6.216631	5.32
49	00:00	5.870696	5.04

Tabla 6. Velocidad del viento en La Mata del 01 al 03 de febrero del 2024.

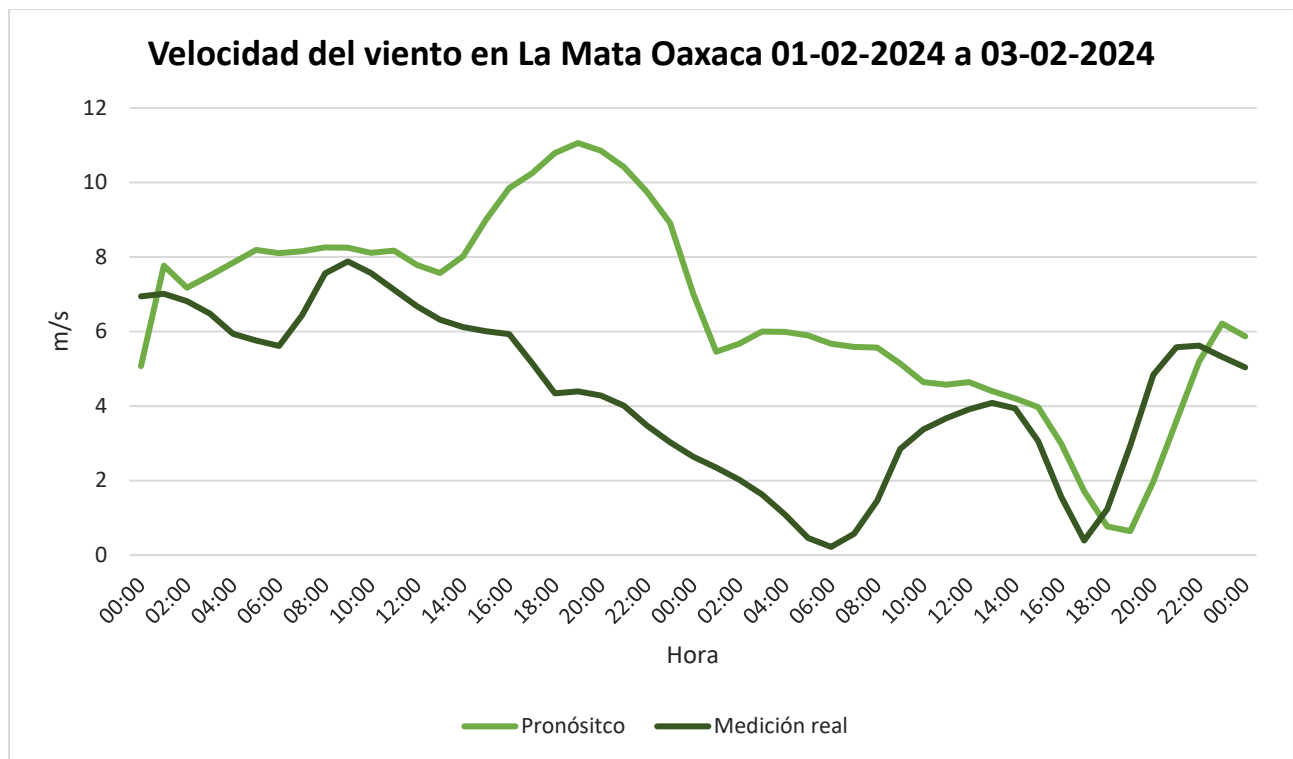


Figura 57. Datos de pronóstico vs datos reales del 01 al 03 de febrero.

Con los datos contenidos en la Tabla 6, gráficamente podemos ver a simple vista el comportamiento de ambos grupos de datos en la Figura 57 y que al aplicar las métricas de error se obtuvieron los valores de la Tabla 7.

Métrica	Resultado	Etiqueta
MAE	2.63975459	Pobre
RMSE	3.33701594	Aceptable
ACC	0.75164601	Excelente

Tabla 7. Métricas de error del modelo del 01 al 03 de febrero.

Comparando los resultados con las etiquetas que nos indica la Figura 55, obtenemos que para el MAE se tiene un 0.6138% de error y para el RMSE un error de 0.776%, concluyendo que el modelo pese a que en una de las etiquetas nos indica que es pobre, se cuenta con otras dos que nos arrojan resultados favorables, por lo que se tiene un desempeño aceptable.

Para el tercer modelo de pronóstico del 01 al 03 de marzo del 2024 con los datos obtenidos se elaboró la Tabla 8.

Velocidad del viento en La Mata Oaxaca 01-03-2024 a 03-03-2024			
	Horas	Pronóstico	Medición real
1	00:00	3.4292855	2.64
2	01:00	4.1968495	2.35
3	02:00	3.707449	2.02
4	03:00	3.6060045	1.63
5	04:00	3.6085685	1.09
6	05:00	3.4183555	0.46
7	06:00	3.264216	0.22
8	07:00	3.4111515	0.57
9	08:00	3.7553025	1.46
10	09:00	4.290515	2.85
11	10:00	4.403032	3.37
12	11:00	4.485703	3.67
13	12:00	4.544587	3.91
14	13:00	4.630445	4.08
15	14:00	5.124591	3.94
16	15:00	4.8285435	3.06
17	16:00	4.090456	1.57
18	17:00	3.3367585	0.39
19	18:00	3.7099075	1.23
20	19:00	4.37822	2.94
21	20:00	5.1252975	4.84
22	21:00	5.4465095	5.58
23	22:00	5.2774115	5.62
24	23:00	4.805333	5.32
25	00:00	4.24275	5.04
26	01:00	3.5990705	4.89
27	02:00	3.452791	4.93
28	03:00	3.4937545	4.76
29	04:00	3.6976805	4.49
30	05:00	3.919352	4.78
31	06:00	4.230699	5.38
32	07:00	4.6685355	6.06
33	08:00	5.1822245	7.05
34	09:00	5.1299405	6.95

35	10:00	4.843578	6.26
36	11:00	4.582158	5.53
37	12:00	4.41408	4.9
38	13:00	4.3354355	4.35
39	14:00	4.640356	3.96
40	15:00	4.6801625	3.71
41	16:00	4.8298935	3.33
42	17:00	4.4553565	2.22
43	18:00	4.3200335	1.89
44	19:00	4.2773515	1.77
45	20:00	4.0819235	1.6
46	21:00	3.841386	1.46
47	22:00	3.592737	1.41
48	23:00	3.3440305	1.34
49	00:00	3.013673	1.11

Tabla 8. Velocidad del viento del 01 al 03 de marzo del 2024.

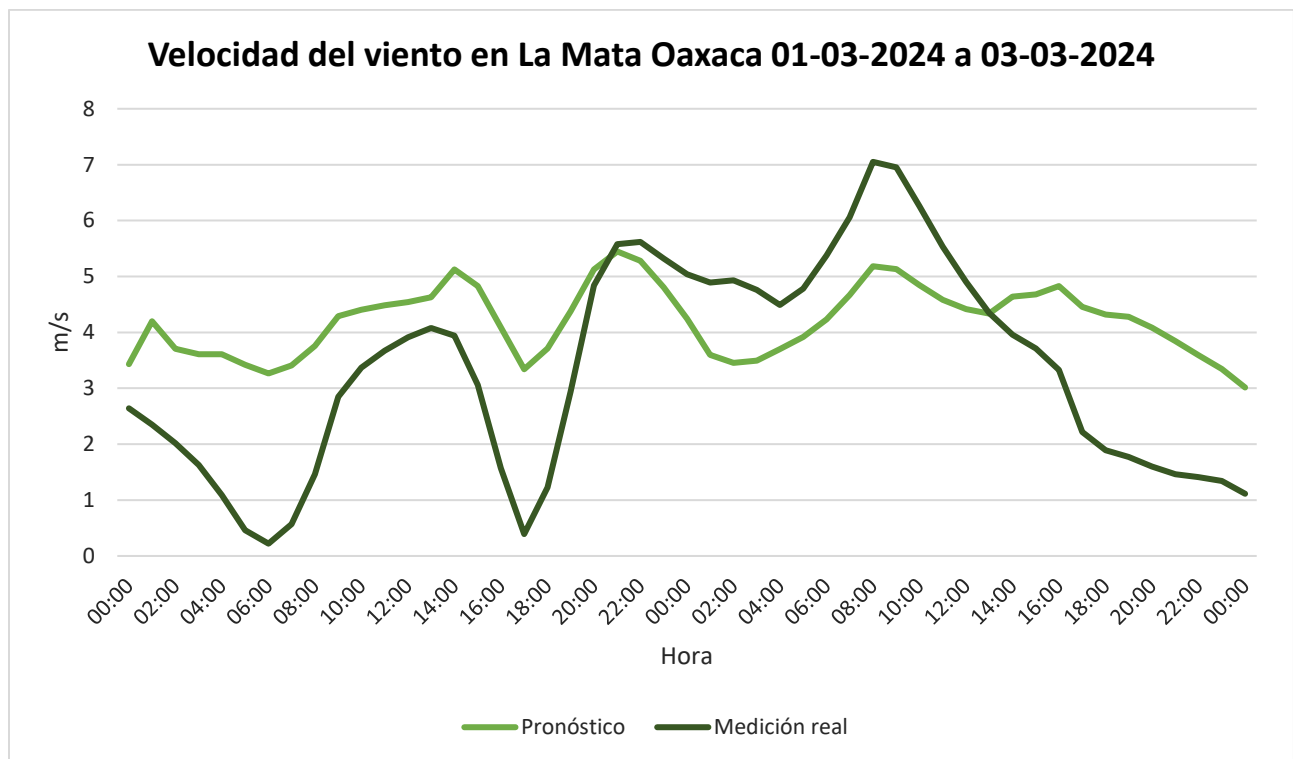


Figura 58. Datos de pronóstico vs datos reales del 01 al 03 de marzo.

Visualmente en la Figura 58 vemos comportamientos muy similares y los resultados de las etiquetas que nos indica la Figura 55, obtenemos que para el MAE se

tiene un error porcentual del 0.4567% y para el RMSE un error de 0.5175%, concluyendo que el desempeño del modelo es excelente para las tres métricas de error aplicadas como se muestra en la Tabla 9.

Métrica	Resultado	Etiqueta
MAE	1.52858854	Excelente
RMSE	1.73206417	Excelente
ACC	0.79239651	Excelente

Tabla 9. Métricas de error del modelo del 01 al 03 de marzo.

Conclusiones

El objetivo general de esta investigación fue conformar un modelo a mesoescala para la predicción de la velocidad del viento a mediano plazo en La Mata, Oaxaca, utilizando el modelo Weather Research and Forecasting (WRF). A lo largo del trabajo, se abordaron tres objetivos específicos que permitieron la evaluación y validación del modelo: la revisión del estado del arte, la obtención de datos históricos de medición del viento y la aplicación del WRF para generar pronósticos de velocidad del viento.

El análisis de los resultados del modelo de pronóstico muestra que la predicción de la velocidad del viento en La Mata es adecuada, con un desempeño entre aceptable y bueno. La comparación con los datos observacionales de la región, obtenidos de NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Data Access Viewer (DAV) y NASA Giovanni, indicó una buena correlación entre las predicciones y las mediciones satelitales, lo que valida la efectividad del modelo para esta área geográfica. Sin embargo, algunas desviaciones fueron observadas en ciertos períodos, lo que sugiere la necesidad de optimizar el modelo en las horas con mayores errores.

El software WRF demostró ser una herramienta adecuada para la predicción a mediano plazo de la velocidad del viento en la región, aunque se recomienda explorar configuraciones adicionales, como una mayor resolución temporal y espacial, para mejorar los resultados. Además, es crucial mejorar los datos de entrada, utilizando datos de reanálisis con mejores características o datos más confiables, como los de estaciones meteorológicas locales, preferentemente a la altura de los aerogeneradores.

Una de las principales aportaciones de este estudio es la implementación de una validación cualitativa utilizando datos de NASA Giovanni, lo que ha permitido analizar de manera visual y espacial la distribución del viento en la región. Este enfoque complementa el análisis cuantitativo basado en métricas de error como MAE, RMSE y ACC, proporcionando una evaluación más integral del desempeño del modelo. La combinación de estas herramientas no solo fortalece la confianza en la predicción del

viento, sino que también ofrece un marco metodológico replicable en otras regiones con potencial eólico.

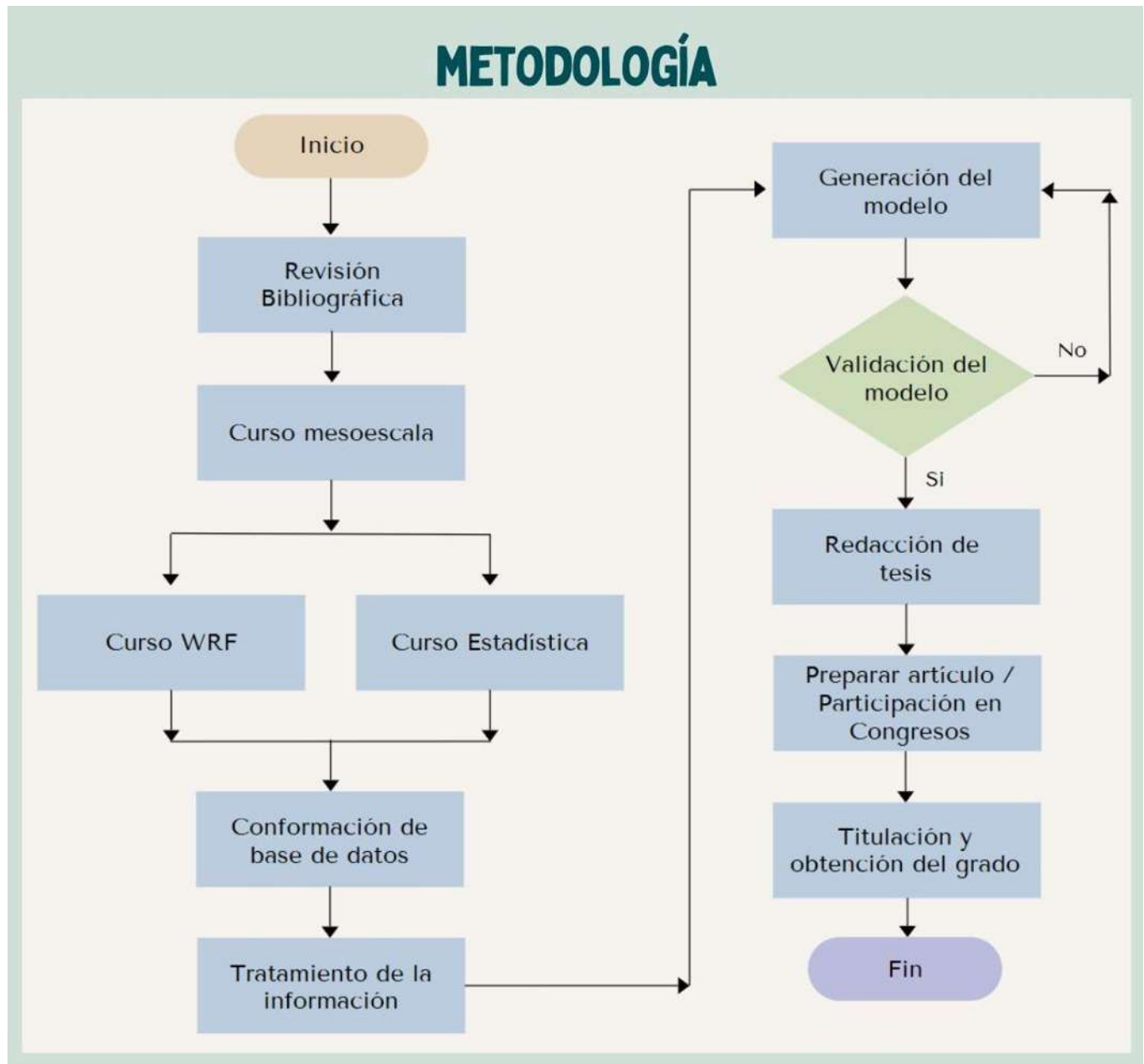
Finalmente, el modelo desarrollado cumple con los objetivos establecidos, proporcionando un pronóstico fiable de la velocidad del viento en La Mata, Oaxaca, con aplicaciones potenciales para la predicción de la generación de energía eólica en la región. Su implementación contribuye a la planificación energética y al desarrollo de proyectos sostenibles, alineándose con la transición hacia fuentes de energía renovables. No obstante, se sugiere continuar con la investigación para refinar el modelo, incorporando factores estacionales y geográficos adicionales, así como mediciones in situ, que podrían mejorar aún más su precisión a largo plazo.

A.1. Cronograma de actividades

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDAD	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F
1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2 CURSO DE MESOESCALA	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3 CURSO DEL SOFTWARE WRF	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
4 BÚSQUEDA DE BASES DE DATOS DEL SITIO	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
5 CURSO ESTADÍSTICA MANEJO DE DATOS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
6 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
7 GENERACIÓN DEL MODELO A MESOESCALA DEL SITIO	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
8 VALIDACIÓN DEL MODELO DE MESOESCALA	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
9 PREPARACIÓN DE ARTÍCULO / PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
10 REDACCIÓN DE TESIS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
11 TITULACIÓN Y OBTENCIÓN DEL GRADO	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

A.2. Diagrama de flujo de la metodología utilizada



A.3. Actividades de Retribución Social

Dentro de las actividades de Retribución Social realizadas se encuentran las siguientes:

1. Asesorías académicas a alumnos de Bachillerato y Licenciatura.



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE
SAN NICOLAS DE HIDALGO

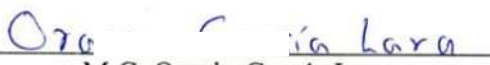
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
COORDINACIÓN DEL PROGRAMA
DE ASESORÍAS ACADÉMICAS
Asunto: **CONSTANCIA DE ASESORÍAS
ENERO A DICIEMBRE DEL 2023**

A QUIEN CORRESPONDA:

La Coordinación del Programa de Asesorías Académicas (PAA) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por éste medio hace **CONSTAR** que el **Ing. Damián Campuzano Milán**, atendió durante el periodo de enero a diciembre del año 2023 las Asesorías a los estudiantes de los Programas de Licenciatura en Ingeniería Mecánica y Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, con prontitud, esmero y eficiencia, demostrando en todo momento su absoluta disponibilidad para atender todas las actividades relacionadas con las consultas de los estudiantes.

Se extiende la presente, para los usos y efectos legales que haya lugar, en la Ciudad de Morelia, capital del Estado de Michoacán de Ocampo, a los 31 días del mes de enero de 2024.

Atentamente
Morelia, Michoacán a 31 de enero de 2024


M.C. Oracio García Lara
Coordinador del PAA de la Licenciatura en
Ingeniería mecatrónica.


Dra. Alicia Aguilar Corona
Coordinadora del PAA de la Licenciatura
en Ingeniería mecánica.



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
ESCUELA PREPARATORIA "MELCHOR OCAMPO"
Morelia, Michoacán a 8 de Diciembre del 2023
Of. SA-73/2023

Asunto: Constancia

A QUIEN CORRESPONDA
PRESENTE

La Secretaría Académica de la Escuela Preparatoria Melchor Ocampo de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por medio de la presente hace constar que el Ing. **Damián Campuzano Milian**, estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, con matrícula 1423194H coordinó un círculo de estudio y actividades remediales en la materia **Geometría y Trigonometría** a los alumnos del programa de Bachillerato de la UMSNH de la Sección 201 que solicitaron la asesoría durante el ciclo escolar 2023/2024, **dedicando 3 (tres) horas a la semana, de octubre 2023 a diciembre 2023, dando un total de 20 (veinte) horas.**

Se extiende la presente a petición de interesado y para los fines que él estime convenientes.

NTE

MTR. **VICTOR HUGO ARCIGA HERNÁNDEZ**
SECRETARIO ACADÉMICO DE LA ESCUELA PREPARATORIA
MELCHOR OCAMPO

Telefono 443 312 01 81
Av. Madero Poniente 414 colonia centro C.P. 58000, Morelia, Michoacán, México
www.epmo.umich.mx

#HumanistaPorSiempre



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
ESCUELA PREPARATORIA "MELCHOR OCAMPO"
Morelia, Michoacán a 8 de Diciembre del 2023
Of. SA-71/2023

Asunto: Constancia

A QUIEN CORRESPONDA
PRESENTE

La Secretaría Académica de la Escuela Preparatoria Melchor Ocampo de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por medio de la presente hace constar que el Ing. **Damián Campuzano Milian**, Estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, con matrícula 1423194H, coordinó un círculo de estudio y actividades remediales en la materia **Probabilidad y Estadística** a los alumnos del programa de Bachillerato de la UMSNH de la Sección 401 que solicitaron la asesoría durante el ciclo escolar 2023/2024, **dedicando 3 (tres) horas a la semana, de octubre 2023 a diciembre 2023, dando un total de 20 (veinte) horas.**

Se extiende la presente a petición de interesado y para los fines que él estime convenientes.

MTR. **VICTOR HUGO ARCIGA HERNÁNDEZ**
SECRETARIO ACADÉMICO DE LA ESCUELA PREPARATORIA
MELCHOR OCAMPO

Telefono 443 312 01 81
Av. Madero Poniente 414 colonia centro C.P. 58000, Morelia, Michoacán, México
www.epmo.umich.mx

#HumanistaPorSiempre



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
ESCUELA PREPARATORIA "MELCHOR OCAMPO"

Morelia, Michoacán a 8 de Diciembre del 2023
Of. SA-71/2023

Asunto: Constancia

A QUIEN CORRESPONDA
PRESENTE

La Secretaría Académica de la Escuela Preparatoria Melchor Ocampo de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por medio de la presente hace constar que el Ing. **Damián Campuzano Milian**, Estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, con matrícula 1423194H, coordinó un círculo de estudio y actividades remediales en la materia de **Cálculo Diferencial** a los alumnos del programa de Bachillerato de la UMSNH de la Sección 601 de Químico Biológico que solicitaron la asesoría durante el ciclo escolar 2023/2024, **dedicando 3 (tres) horas a la semana, de octubre 2023 a diciembre 2023, dando un total de 20 (veinte) horas.**

Se extiende la presente a petición de interesado y para los fines que él estime convenientes.

MTR. **VICTOR HUGO ARCIGA HERNÁNDEZ**
SECRETARIO ACADÉMICO DE LA ESCUELA PREPARATORIA
MELCHOR OCAMPO

Telefono 443 312 01 81
Av. Madero Poniente 414 colonia centro C.P. 58000, Morelia, Michoacán, México
www.epmo.umich.mx

#HumanistaPorSiempre



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
ESCUELA PREPARATORIA "MELCHOR OCAMPO"
Morelia, Michoacán a 11 de Julio del 2024
Of. SA-464/2024

Asunto: Constancia

A QUIEN CORRESPONDA
PRESENTE

La Secretaría Académica de la Escuela Preparatoria Melchor Ocampo de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por medio de la presente hace constar que el Ing. **Damián Campuzano Milian**, Estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, con matrícula 1423194H, coordinó un círculo de estudio y actividades remediales en la materia **Geometría y Trigonometría** a los alumnos del programa de Bachillerato de la UMSNH del segundo semestre que solicitaron la asesoría durante el ciclo escolar 2024/2024, **dedicando 3 (tres) horas a la semana, de abril 2024 a junio 2024, dando un total de 20 (veinte) horas.**

Se extiende la presente a petición de interesado y para los fines que él estime convenientes.

MTR. **VICTOR HUGO ARCIGA HERNÁNDEZ**
SECRETARIO ACADÉMICO DE LA ESCUELA PREPARATORIA
MELCHOR OCAMPO

Telefono 443 312 01 81
Av. Madero Poniente 414 colonia centro C.P. 58000, Morelia, Michoacán, México
www.epmo.umich.mx

#HumanistaPorSiempre

2. Divulgación de la Ciencia

2.1 Tianguis de la Ciencia



Otorgan la presente

CONSTANCIA

Damian Campuzano Milian

Por su participación como:

Responsable

En el taller:

Engranajes magnéticos: sin fricción no hay desgaste.

En el 31 TIANGUIS DE LA CIENCIA realizado el día 21 de abril, en las instalaciones de
Ciudad Universitaria de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Morelia, Michoacán; 21 abril 2023

Dr. Jesús Campos García
Coordinador de la Investigación Científica

Dr. Horacio Cano Camacho
Jefe del Departamento de Comunicación de la Ciencia

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA
DEPARTAMENTO DE COMUNICACIÓN DE LA CIENCIA

OTORGAN LA PRESENTE

CONSTANCIA

A: **DAMIAN CAMPUZANO MILIAN**

Por su participación como responsable en el taller:

Impulso del cohete y la tercera ley de Newton

En el 32 Tianguis de la Ciencia, realizado en Ciudad Universitaria
Morelia Michoacán, 19 y 20 de abril de 2024.

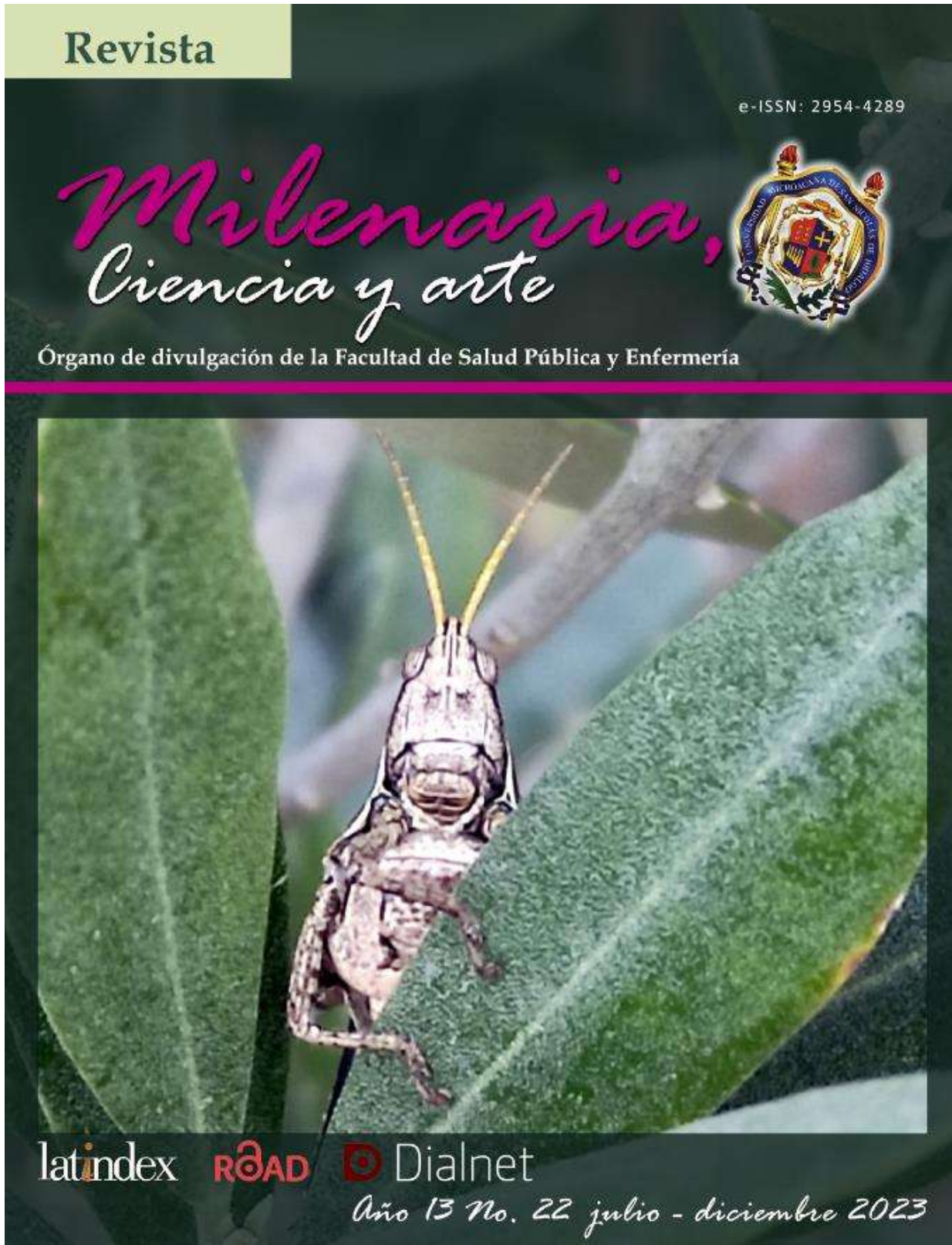
DR. JESÚS CAMPOS GARCÍA
Coordinador de la Investigación Científica

DR. HORACIO CANO CAMACHO
Jefe del Departamento de Comunicación de la Ciencia



3. Artículos de divulgación

3.1 Transformando la Ingeniería Con SolidWorks



Introducción

En la encrucijada de la creatividad y la precisión, la ingeniería moderna se erige como un arte de la innovación tecnológica. En esta travesía, los profesionales enfrentamos el desafío de forjar productos vanguardistas y eficientes que den respuesta a las demandas cambiantes. En este escenario, los softwares de diseño asistido por computadora (CAD) han despertado una revolución en la manera en que materializamos conceptos complejos. Uno de los protagonistas indiscutibles en esta evolución es SolidWorks. Permítanme compartir mi experiencia personal como ingeniero mecánico en la agroindustria, donde SolidWorks ha sido mi brújula en la creación de máquinas clasificadoras de frutas y hortalizas.

Según Gómez González (2015), "SolidWorks® es una solución de diseño tridimensional completa que integra un gran número de funciones avanzadas para facilitar el modelado de piezas, crear grandes ensamblajes, generar planos y otras funcionalidades que permiten validar, gestionar y comunicar proyectos de forma rápida, precisa y fiable" (p. 20). Siendo SolidWorks una potente herramienta que ha revolucionado la forma en que los ingenieros dan vida a sus ideas con precisión y efectividad, ya que cuenta con herramientas de diseño de piezas, ensambles y dibujos; tal como lo menciona Gómez (2015) "SolidWorks® incluye Herramientas de Productividad, de Gestión de Proyectos, de Presentación y de Análisis y Simulación que lo hacen uno de los estándares de diseño mecánico más competitivo del mercado".

Navegando la Innovación con SolidWorks

Mi primer contacto con el mundo laboral como ingeniero mecánico fue en el sector de la agroindustria, y esta oportunidad se me presentó gracias a mi conocimiento de SolidWorks. Mi primera asignación fue abordar un desafío que involucraba el diseño de charolas de escurrimiento para una línea de producción de frutas. El cliente necesitaba resolver un problema de diseño en sus máquinas que había adquirido meses atrás. El desafío consistía en evitar el exceso de agua en



Figura 1: Transportadores Curvos (Nichiden, 2021)

Transformando la ingeniería con SolidWorks

Martha Angélica Lemus Solorio¹ y Damián Campuzano Milian²

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas "Mat. Luis Manuel Gutiérrez Rivera", Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). 2. Facultad de Ingeniería Mecánica, UMSNH. Morelia, Michoacán, México.

Contacto: damian.campuzano@umich.mx

Resumen. Este artículo se explora cómo SolidWorks, un software de diseño asistido por computadora (CAD), ha revolucionado la ingeniería moderna al permitir la creación de productos vanguardistas y eficientes. A través de mi experiencia personal como ingeniero mecánico en la agroindustria, destaco cómo SolidWorks ha sido un aliado esencial en el desarrollo de máquinas clasificadoras de frutas y hortalizas. Desde la concepción de proyectos hasta la producción, SolidWorks ha permitido una precisión sin precedentes, optimización de diseños y colaboración efectiva. Además, se exploran las ventajas clave de SolidWorks en la innovación del diseño, eliminación de errores y estímulo a la colaboración, transformando la manera en que creamos y construimos productos ingenieriles.

Palabras Clave: SolidWorks, diseño asistido por computadora, innovación, eficiencia, ingeniería, agroindustria.

el piso de la línea de producción. Esta situación se debía al flujo de frutas que, después de pasar por una serie de transportadores y una máquina de lavado, aún presentaba escurrimiento de agua. Mi tarea era diseñar un sistema de drenaje eficiente que evitara posibles accidentes en la planta.

Lo que parecía una tarea relativamente sencilla resultó ser más compleja de lo que esperaba. Descubrí que los transportadores eran curvos y

que ya se habían realizado dos intentos de diseño y manufactura sin éxito. Los prototipos no encajaban adecuadamente durante la instalación, lo que agravaba el problema. Esto no solo generaba desafíos técnicos, sino que también representaba pérdidas para la empresa, ya que los trabajos de garantía estaban exentos de costo.

Me asignaron la responsabilidad de encontrar una solución, y eso me llevó a SolidWorks. Con cierta aprehensión debido a que era mi primer proyecto de

diseño de importancia, comencé a trabajar en una propuesta en SolidWorks. Al ensamblar los componentes virtualmente en el software, me di cuenta de que la solución que había concebido en la pantalla se traducía perfectamente a la realidad.

Para mí, esa experiencia representó un punto de inflexión. No solo pude resolver un problema real y complejo en la agroindustria, sino que también descubrí el poder de SolidWorks como una herramienta que permite que lo que se diseña en el entorno virtual sea una representación precisa de lo que ocurrirá en el mundo real. Este logro marcó el comienzo de una carrera en la que SolidWorks se ha convertido en mi aliado constante, transformando la manera en que abordo los desafíos de ingeniería.

El Camino Hacia la Eficiencia y la Innovación

A través de SolidWorks, pude enfrentar desafíos que iban desde el diseño desde cero hasta el redimensionamiento y la configuración de piezas, sub ensambles y ensambles completos. Esta herramienta no solo simplificó la creación de modelos 3D de alta calidad, sino que también me brindó la capacidad de simular y analizar el rendimiento de los productos en condiciones reales. Esta capacidad allanó el camino para optimizar los diseños y garantizar que cada máquina clasificadora fuera una expresión de eficiencia y excelencia.

SolidWorks no solo fue mi caja de herramientas, sino también mi aliado en la colaboración. Al representar visualmente los modelos 3D, pude comunicar de manera efectiva con partes interesadas y clientes, lo que

resultó en una comprensión más profunda y en decisiones informadas. Además, la integración de SolidWorks con sistemas de producción y fabricación aceleró los tiempos de entrega y redujo los costos, transformando mi proceso de diseño en una sinfonía de eficiencia y optimización.

En la actualidad muchas empresas usan estas herramientas para mejorar la experiencia de ventas, haciéndolas mucho más atractivas tal como se muestra en la figura 1, donde podemos observar la línea de empaquetado ofertada por Pattyn en su sitio web, en la cual se comparte visualmente de una manera más real la línea de empaquetado y su proyección:

- 1 Formadora de cajas
- 2 Llenadora por peso
- 3 Sellador hermético de bolsas
- 4 Cerradora de cajas

Un Mundo de Posibilidades a Través de SolidWorks

Mi viaje como ingeniero mecánico en la agroindustria ha sido un testimonio del poder de la innovación tecnológica. SolidWorks no solo se ha erigido como un software, sino como un compañero de viaje que ha impulsado mi creatividad y ha respaldado mi búsqueda de soluciones ingenieriles excepcionales. Desde el cultivo hasta la clasificación de productos, SolidWorks ha sido la fuerza motriz que ha transformado mis ideas en realidad.

En este artículo, exploramos la esencia misma de la ingeniería moderna y la relevancia trascendental de herramientas como SolidWorks en la concreción de nuestras visiones. Teniendo en cuenta las ventajas que este software de diseño aporta al proceso creativo, destacando su impacto en la

precisión, la eficiencia y la innovación. La historia de mi viaje como ingeniero mecánico en la agroindustria se teje intrincadamente con las virtudes de SolidWorks, y es un testimonio del poder de la colaboración entre la mente humana y la tecnología.

SolidWorks: Innovación en el Diseño

SolidWorks ha consolidado su posición como una solución CAD tridimensional de reconocimiento global, empleada ampliamente en la ingeniería y el diseño industrial. Además de posibilitar la creación de modelos 3D de alta calidad, SolidWorks simplifica la simulación, el análisis y la documentación de productos. Es importante resaltar su interfaz intuitiva y su conjunto completo de herramientas avanzadas, lo que lo convierte en una herramienta indispensable para ingenieros, arquitectos y diseñadores de productos.

Transformando el Proceso de Diseño

La integración de software de diseño ha remodelado la forma en que los profesionales encaran la creación de productos. En un mundo caracterizado por la competencia global y la rapidez de la innovación, la precisión y la eficiencia otorgadas por estas herramientas se vuelven cruciales. Examinemos con más profundidad algunas de las razones que convierten al software de diseño en un elemento esencial en la ingeniería contemporánea.

1. Precisión y Eliminación de Errores

Los softwares de diseño, como SolidWorks, dotan a los ingenieros de la capacidad de esculpir modelos digitales



Figura 2: Línea de empaquetado de frutas y hortalizas (Pattyn, 2020)

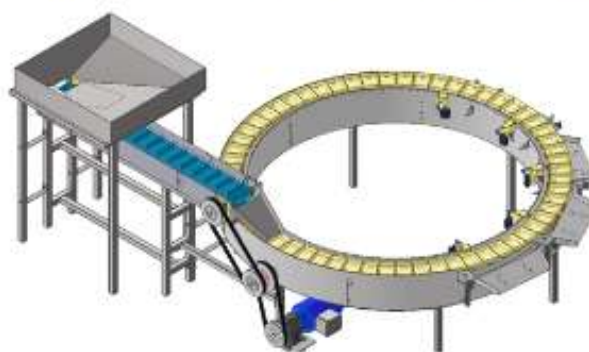


Figura 3: Propuesta de diseño y simulación de una máquina clasificadora y contadora de tomates de árbol (Cajamarca, Jorge, 2021)

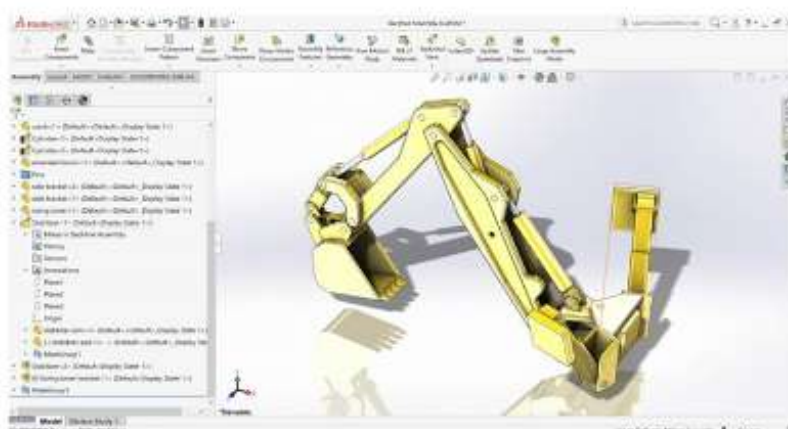


Figura 4: Interfaz de Solidworks

detaillados que replican con fidelidad los productos antes de su materialización física. Esta capacidad resulta vital para identificar y corregir errores de diseño en sus etapas iniciales, evitando rectificaciones costosas en fases posteriores de producción.

2. Optimización del Diseño

La robustez de SolidWorks radica en su conjunto de herramientas de simulación y análisis, permitiendo a los ingenieros evaluar el rendimiento de los productos en condiciones del mundo real. Esto allana el camino para optimizar los diseños, mejorando la eficiencia, durabilidad y funcionalidad antes de invertir en prototipos físicos.

El modelado puede implicar también la construcción de escenarios potenciales que puedan revelar situaciones que pudieran presentarse durante la ejecución del proceso. Estos escenarios surgen a partir de las simulaciones de variaciones en los valores normales de operación y de la verificación de los resultados y los impactos en curso, y pueden servir para tomar medidas correctivas previas a la implementación del proceso. La simulación es, por tanto, una evaluación de si las premisas del modelo funcionan según lo previsto, y una observación del comportamiento del proceso frente a la presencia de múltiples variables (Palvarini y Quezada, 2013).

3. Estimulo a la Colaboración y Comunicación

La naturaleza digital de los diseños generados mediante software de diseño promueve una colaboración fluida ya que múltiples ingenieros pueden

trabajar simultáneamente en un proyecto, compartiendo y sincronizando sus avances de manera fluida, inclusive entre equipos dispersos geográficamente. Además, la representación visual de modelos 3D mejora la comunicación con partes interesadas y clientes, facilitando la comprensión y la toma de decisiones informadas.

4. Eficiencia en la Fabricación

Los modelos concebidos con software de diseño pueden integrarse directamente con sistemas de producción y fabricación, agilizando el proceso y reduciendo los tiempos de entrega. Esto se traduce en una mayor eficiencia operativa y una reducción de los costos de producción. Considerando que la eficiencia se define como la capacidad de disponer de alguien o de algo para conseguir un efecto determinado (RAE, 2001). "Expresión que mide la capacidad o cualidad de la actuación de un sistema o sujeto económico para lograr el cumplimiento de un objetivo determinado, minimizando el empleo de recursos" (Fernández-Ríos y Sánchez, 1997).

5. Fomento de la Innovación

La adopción de software de diseño no solo aumenta la eficiencia, sino que también despierta la innovación. Los ingenieros tenemos la libertad de explorar una amplia variedad de diseños y soluciones sin incurrir en gastos significativos, esta libertad estimula la generación de productos innovadores capaces de redefinir nuestra interacción con el entorno. Sin embargo, se observó que los procesos que dan lugar a la innovación se ajustan mejor a un

modelo interactivo y multidimensional (Kline y Rosenberg, 1986), según el cual la actividad de innovación es el resultado de un complejo proceso de interacciones, a veces durante un largo periodo de tiempo, entre diferentes actividades heterogéneas e interdependientes, tales como: investigación y desarrollo, ingeniería, estudio de mercados y de usuarios, planificación financiera, canales de distribución, características de los proveedores de equipos y materias primas, opiniones de los clientes, etc. En definitiva, se trata de un proceso que mantiene fuertes enlaces entre la ciencia, la tecnología, los consumidores y el mercado (Sancho, 2007).

Como un ejemplo de la aplicación, se muestran parte de los resultados de optimización en el diseño de un depósito de acero inoxidable, utilizado en la industria alimentaria, en donde se mejoraron el uso de materiales y con ello una disminución de costos en la fabricación de este equipo. En cuanto a la masa de la pieza, se ha producido una reducción significativa entre la original y la optimizada. Por tanto, el resultado obtenido ha sido satisfactorio y se ha conseguido el objetivo de mejorar el diseño y fabricación de este equipo.



Figura 5: Diseño y variables a optimizar de un depósito de alimentos.

Elemento	Condición inicial	Opción A	Opción B	Opción C	Optimización final
Masa de las piezas	3.2 kg	3.14 kg	3.10 kg	1.5 kg	1.35 kg
Volumen de las piezas	38.6 m ³	39 m ³	38.9 m ³	18.5 m ³	16.8 m ³
Desplazamiento máximo	0.78 mm	1.35 mm	0.78 mm	0.78 mm	1.0 mm

Tabla 1. Variables a optimizar en la elaboración de un depósito grado industrial de acero inoxidable comercial.

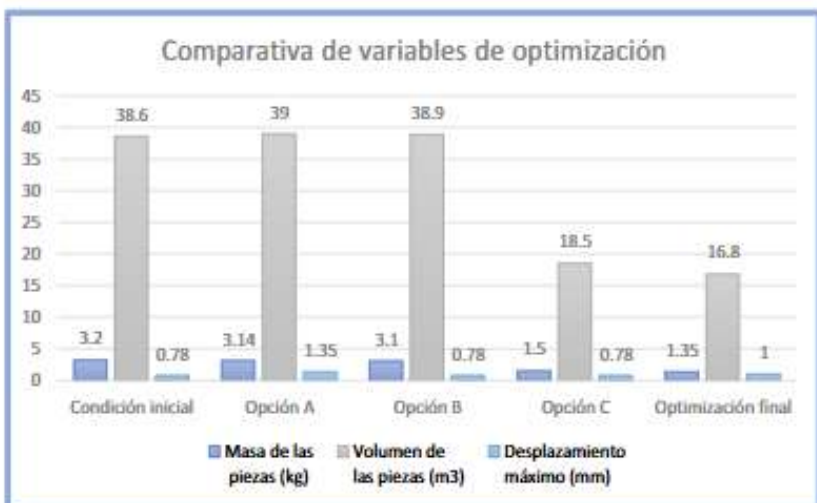


Figura 6: Gráfico comparativo de variables de optimización del diseño de un depósito de alimentos de grado industrial.

Conclusiones

Mi travesía como ingeniero mecánico en la agroindustria ha sido un testimonio del poder transformador de SolidWorks. Esta herramienta ha sido el enlace entre mis ideas y su materialización en productos eficientes y vanguardistas. Desde la concepción hasta la producción, SolidWorks ha sido mi aliado constante en la búsqueda de la excelencia ingenieril. Mi experiencia no solo subraya las capacidades de este software, sino que también resalta cómo la tecnología puede ser el catalizador de la innovación y la colaboración en la ingeniería moderna. En última instancia, SolidWorks ha redefinido la forma en que creamos y construimos, allanando el camino para un mundo de posibilidades ilimitadas. Dentro los resultados llevados a cabo en la optimización la masa utilizada de acero inoxidable para la elaboración de un contenedor de grados industrial disminuyó aproximadamente 42% sin comprometer de forma significativa el desplazamiento máximo.

Referencias

Cajamarca Urgilés, Jorge Leonardo. (2021). "Diseño y simulación de una máquina clasificadora y contadora de tomates de árbol".



Figura 7. Agroindustria 4.0 (Sicreesinnovas,2023)

Consultado en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21431/1/UPS-CT009419.pdf>

Fernández-Ríos, M. y Sánchez, J., (1997) Eficacia Organizacional. Madrid

Gómez González, S. (2015). *El gran libro de SolidWorks*. Marcombo.

KLINE, S.J.; ROSENBERG, N.(1986). An overview of innovation. En: Landan, R.; Rosenberg, N. (Editors). *The Positive Sum Strategy. Harnessing Technology for Economic Growth*. Washington. D.C. National Academic Press, p. 275-306, 1986.

Nichiden (2023). Proyectos y Noticias Nichiden. Consultado en <https://nichiden.com.vn/en/project-news/>

Palvarini B. y Quezado C.; Gestión de Procesos Orientada a los Resultados. Brasília, Brasil: Vetsys, 2013.

Pattyn. (2020). "Línea de empaque de frutas y verduras". Consultado en: <https://www.pattyn.com/es/su-industria/linea-de-empaque-de-frutas-y-verduras>

Real Academia Española (RAE), Diccionario de la Lengua Española, Vigésima segunda edición, 2001. [Online]. Recuperado: www.rae.es.

Rojas, m.; jaimes, i.; valencia, m. (2018) Efectividad, eficacia y eficiencia en equipos de trabajo. Revista espacios 3 Vol. 39 (Nº 06). Pág. 11; ISSN 0798 1015

Sancho R.; Innovación industria; (2007). REVISTA ESPAÑOLA DE DOCUMENTACION CIENTIFICA 3 0, 4, OCTUBRE-DICIEMBRE, 553-564, ISSN 0210-0614 <https://digital.csic.es/bitstream/10261/11962/1/417.pdf>

Sicreesinnovas (2023). "La Agroindustria y las tecnologías 4.0: Si crees innovas". Consultado en: <https://sicreesinnovas.com/la-agroindustria-y-las-tecnologias-4-0/>

Srzic Sanja (2017). "Sugerencia Técnica de Solidworks". Consultado en: <https://www.javelin-tech.com/blog/2017/10/solidworks-rigid-sub-assembly-mate/>

3.2 Energía Eólica y Predicción del viento





Figura 2. Turbina eólica (AESVAL, 2022).

Resumen. En medio de la crisis sanitaria global desatada por el virus SARS-CoV-2 en 2019, la reducción drástica de las emisiones de dióxido de carbono brindó una visión fugaz de un mundo con cielos despejados y una naturaleza revitalizada. Este fenómeno efímero subrayó la urgencia de adoptar medidas para abordar el cambio climático y fomentar un futuro más sostenible. En este contexto, el artículo explora el papel crucial de las energías renovables, particularmente la energía eólica, en la transformación hacia un modelo energético más limpio y eficiente. Se examina la importancia de la predicción del viento en la integración exitosa de la energía eólica en la red eléctrica, destacando el papel clave de modelos avanzados como el Weather Research and Forecasting (WRF). A través de una exploración detallada de la ciencia detrás de la predicción del viento y los desafíos asociados con la implementación de modelos matemáticos atmosféricos, el artículo ofrece una visión integral de cómo la innovación tecnológica y la conciencia ambiental se entrelazan para forjar un futuro energético más sostenible. Concluye con una reflexión sobre la importancia de continuar avanzando en la investigación y el desarrollo de modelos de predicción del viento para mitigar el cambio climático y promover un entorno más saludable y equitativo para las generaciones futuras.

Palabras clave: Predicción del Viento, Investigación climática, Energía Eólica.

Abstract. Amidst the global health crisis unleashed by the SARS-CoV-2 virus in 2019, the drastic reduction in carbon dioxide emissions offered a fleeting glimpse of a world with clear skies and revitalized nature. This ephemeral phenomenon underscored the urgency of adopting measures to address climate change and foster a more sustainable future. In this context, the article explores the crucial role of renewable energies, particularly wind energy, in the transition towards a cleaner and more efficient energy model. It examines the importance of wind prediction in the successful integration of wind energy into the electrical grid, highlighting the key role of advanced models such as the Weather Research and Forecasting (WRF). Through a detailed exploration of the science behind wind prediction and the challenges associated with the implementation of atmospheric numerical models, the article offers a comprehensive insight into how technological innovation and environmental awareness intertwine to forge a more sustainable energy future. It concludes with a reflection on the importance of continuing to advance research and development in wind prediction models to mitigate climate change and promote a healthier and more equitable environment for future generations.

Keywords: Wind Prediction, Weather Research and Forecasting (WRF), Wind Energy.

Introducción

Durante la crisis sanitaria mundial de 2019, causada por el virus SARS-CoV-2, las emisiones de dióxido de carbono sufrieron una marcada reducción,

propiciando la aparición de especies animales y la visión de cielos despejados, libres de contaminación. Este fenómeno a escala global nos brindó una valiosa lección, instándonos a reflexionar sobre la imperiosa necesidad de adoptar medidas efectivas

para contrarrestar el calentamiento global. Actualmente, aproximadamente el 85.4% de nuestra energía proviene de combustibles fósiles, como el petróleo y el carbón, los cuales son responsables de gran parte de la contaminación en la producción de energía eléctrica (Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, 2024). La devastación ambiental ocasionada por esta contaminación a gran escala ha impulsado la búsqueda y el desarrollo de fuentes de energía más limpias, que puedan asegurar una huella de carbono neutral y promover el desarrollo sostenible, guiado por los principios de reducir, reutilizar, reciclar y reeducar.

En la sociedad actual, la dependencia de la tecnología y la energía es innegable, resultando difícil concebir un mundo en el que estas no estén presentes. Sin embargo, para provocar un cambio significativo en beneficio de nuestro entorno, es fundamental reconsiderar tanto nuestro modelo de consumo energético como el de producción. En este contexto, han surgido diversas estrategias encaminadas a establecer un sistema energético con un enfoque ecológico, diseñado para hacer frente a los desafíos ambientales que se avecinan.

Este enfoque se basa en la idea de aprovechar los recursos naturales para generar energía limpia y renovable; implica la utilización de fuentes como la radiación solar, el viento, la biomasa o las corrientes de agua para la producción de electricidad. La integración de estas fuentes constituye un modelo completo de energías renovables, que abarca desde la energía solar y eólica hasta la bioenergía, geotérmica, hidroeléctrica y marina. Una de las principales ventajas de estas fuentes (Figura 1) es su potencial prácticamente ilimitado. Por ejemplo, la energía solar se basa en la radiación solar, un recurso que se prevé estará disponible durante al menos otros cinco mil millones de años, convirtiéndola en una fuente de energía prácticamente inagotable.

En el amanecer del siglo XXI, el paradigma energético mundial está experimentando una transformación sin precedentes, lo que nos genera cuestionamientos como si es viable realmente utilizar energías renovables

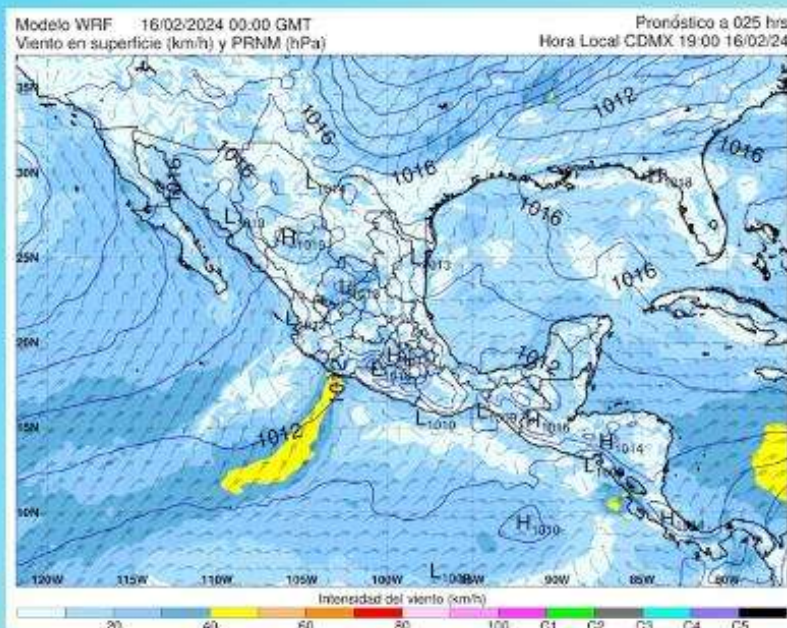


Figura 3. Gráfico de la intensidad del viento en México (Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM, 2024).

para transformar nuestro planeta, sin embargo la conciencia ambiental y la imperativa necesidad de mitigar el cambio climático han impulsado a gobiernos y corporaciones a repensar radicalmente la forma en que generamos y consumimos energía. Esta revolución energética no solo se traduce en la migración de los combustibles fósiles hacia fuentes más sostenibles, sino que también se sustenta en acuerdos internacionales, reformas energéticas y un compromiso global por modelar un futuro más verde.

Durante décadas, el mundo ha dependido en gran medida de los combustibles fósiles para satisfacer sus demandas energéticas. Sin embargo, la conciencia creciente de las consecuencias ambientales y la finitud de estos recursos ha propiciado una transición hacia fuentes renovables. La energía eólica, en particular, ha emergido como un pilar fundamental en esta metamorfosis, destacando su potencial para generar electricidad de manera sostenible y abundante.

El Acuerdo de París, un hito en la lucha contra el cambio climático, ha catalizado un compromiso global para limitar el calentamiento global a niveles manejables. Este pacto histórico ha desencadenado acciones concretas en la

transición a energías limpias, comprometiendo a naciones de todo el mundo a reducir sus emisiones y abrazar fuentes renovables (Naciones Unidas, 2024).

Las reformas energéticas han delineado nuevas rutas hacia un futuro energético sostenible y desde su implementación en México se han emprendido cambios significativos en sus estructuras eléctricas, priorizando la integración de tecnologías renovables y fomentando la inversión en proyectos eólicos. Estos esfuerzos no solo buscan diversificar la matriz energética, sino también fortalecer la resiliencia ante los desafíos ambientales y económicos.

Desde la aprobación de leyes que incentivan la generación de energía limpia hasta inversiones estratégicas en investigación y desarrollo, el mundo se encuentra en una encrucijada definitoria. La transición hacia la energía renovable, con la energía eólica como vanguardia, no solo es una respuesta a la emergencia climática, sino también una oportunidad para forjar un futuro energético más sostenible y equitativo.

Sin embargo, estas leyes exigen a los concesionarios cumplir con requisitos rigurosos, exigiéndoles la presentación

de pronósticos de la potencia generada por cada unidad de Energía Renovable Variable. Esta exigencia ha impulsado a los concesionarios a desarrollar estrategias y modelos de pronóstico.

Energía Eólica: Más Allá de las Aspas

La captura de la energía cinética del viento mediante aerogeneradores (Figura 2) ha evolucionado de manera significativa, convirtiéndose en una de las fuentes más prometedoras y sostenibles; no obstante, la energía eólica se enfrenta a desafíos significativos en comparación con las fuentes de energía tradicionales. La producción de energía a partir del viento está estrechamente relacionada a la velocidad variable y cambiante del viento, lo que complica su regulación en tiempo y espacio. Sumando también, que no se cuenta con un método eficaz para almacenar la energía eólica, lo que conlleva a entregar inmediatamente su producción a la red eléctrica, forzando a las compañías de energía eólica a reportar su producción para contribuir a la planificación eléctrica del Sistema Nacional. Una interrogante muy fuerte es ¿cómo saber la velocidad del viento en las próximas horas, días o meses?, un dato necesario para poder hacer estas planificaciones y que ha generado una importante y novedosa corriente de estudio en predicciones y comportamiento del viento.

La Ciencia Detrás de la Predicción del Viento

La predicción del viento es un campo complicado que combina la meteorología, la climatología y el modelado numérico (Figura 3). Aquí es donde entran en juego los Modelos Meteorológicos Regionales (MMR), herramientas avanzadas diseñadas para comprender los fenómenos atmosféricos a nivel regional con resoluciones espaciales finas. Estos modelos, se enfocan en prever con precisión los patrones de viento, considerando factores como la topografía local y las condiciones climáticas específicas de la región.

Estos modelos emplean una combinación de ecuaciones de la física atmosférica, teniendo en cuenta factores como la temperatura, la presión atmosférica y la humedad. La

resolución espacial fina de los MMR permite desentrañar las complejidades de la mesoescala, capturando detalles cruciales para la generación de energía eólica. Desde la predicción del viento en áreas urbanas hasta la evaluación de eventos meteorológicos extremos, los MMR desempeñan un papel vital.

Planificar la generación de energía según las predicciones meteorológicas permite una integración más eficaz de la energía eólica en la red, optimizando su contribución al suministro energético global. En este contexto, los modelos numéricos atmosféricos desempeñan un papel crucial al proporcionar predicciones a diferentes escalas temporales y espaciales. Uno de estos modelos, el Weather Research and Forecasting (WRF), ha ganado prominencia en la comunidad científica y de ingeniería debido a su capacidad para simular fenómenos meteorológicos complejos, incluyendo la dinámica del viento.

El WRF es un modelo de predicción del tiempo desarrollado conjuntamente por varias instituciones, incluyendo el National Center for Atmospheric Research (NCAR), la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), y otras organizaciones académicas y gubernamentales. Utiliza un enfoque de ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía para simular la dinámica atmosférica en una cuadrícula tridimensional, dividiendo la atmósfera en celdas discretas y resolviendo las interacciones entre ellas en incrementos de tiempo discretos (Grupo de Interacción Océano Atmósfera, 2022).

Uno de los aspectos clave del WRF es su capacidad para representar procesos físicos complejos a escalas espaciales y temporales finas. Esto incluye la parametrización de la turbulencia atmosférica, la radiación solar, la interacción tierra-atmósfera y otros procesos relevantes para la

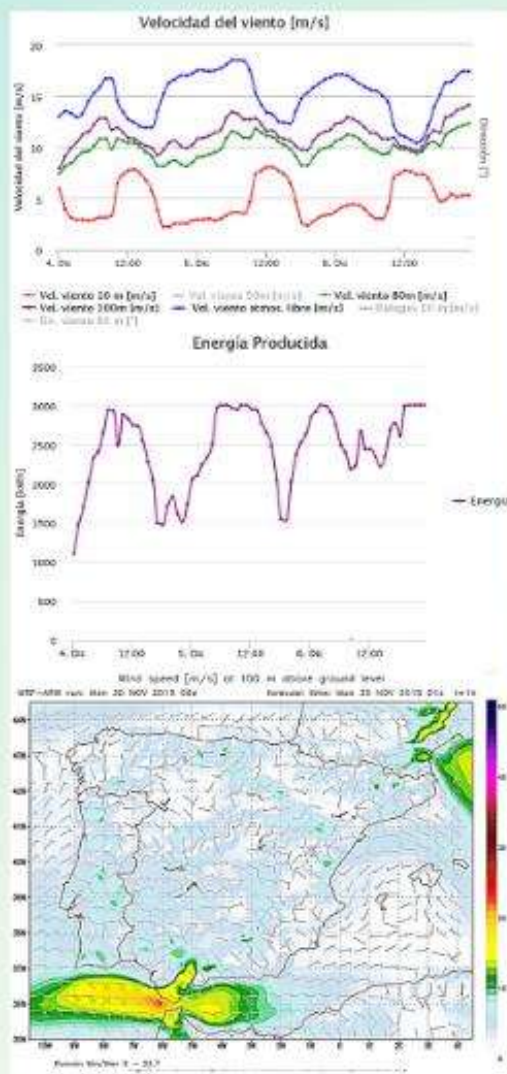


Figura 4. Pronóstico Regional de la velocidad del viento (Meteoexploration, 2015).

dinámica del viento. Además, el modelo puede asimilar datos observacionales en tiempo real para mejorar la precisión de las predicciones, utilizando técnicas de asimilación de datos que integran observaciones satelitales, estaciones meteorológicas terrestres y otros sistemas de monitoreo.

A pesar de sus capacidades avanzadas, el WRF enfrenta varios desafíos en la predicción del viento. Esto incluye la necesidad de datos de entrada precisos y detallados, la resolución adecuada de la cuadrícula para capturar fenómenos locales, y la parametrización efectiva. Además, la

incertidumbre inherente en las condiciones iniciales y los datos observacionales puede afectar la precisión de las predicciones a largo plazo.

Un ejemplo destacado de la aplicación práctica del modelo meteorológico WRF-ARW se encuentra en el estudio presentado por Meteoexploration (Figura 4) sobre la región de la Península Ibérica e Islas Canarias. En este estudio, se implementó el modelo a alta resolución, lo que permitió una mejor definición de la topografía local y su influencia en los patrones de viento. Específicamente, se utilizó una resolución fina para capturar detalles precisos en áreas con topografía compleja. Esto se logró mediante el uso de dominios anidados de menor tamaño de celda, lo que permitió una simulación aún más detallada. Además, como condiciones iniciales y de contorno, se emplearon los datos del modelo GFS Op25 con una resolución de 0.25° . Este enfoque proporciona un ejemplo claro de cómo el modelo WRF-ARW puede adaptarse y aplicarse para estudiar fenómenos meteorológicos específicos con gran detalle y precisión.

Conclusiones

A medida que avanzamos en la investigación y desarrollo de modelos atmosféricos como el WRF, se requiere de una continua exploración de nuevas técnicas de modelado. La implementación de métodos innovadores no solo mejora la precisión de las predicciones del viento, sino que también permite una comprensión más profunda de la compleja dinámica atmosférica que impulsa la generación de energía eólica. Es fundamental seguir investigando y adaptando estos modelos para enfrentar los desafíos cambiantes del clima y la demanda energética.

La colaboración interdisciplinaria entre científicos atmosféricos, ingenieros y profesionales de otras disciplinas relacionadas es fundamental para el desarrollo y aplicación exitosa de

modelos atmosféricos en la industria de la energía eólica. Al combinar conocimientos en meteorología, ingeniería, informática y gestión de recursos energéticos, se pueden abordar de manera integral los desafíos técnicos, económicos y ambientales asociados con la generación de energía eólica. Esta sinergia entre diversas disciplinas impulsa la innovación y la eficiencia en la producción de energía renovable.

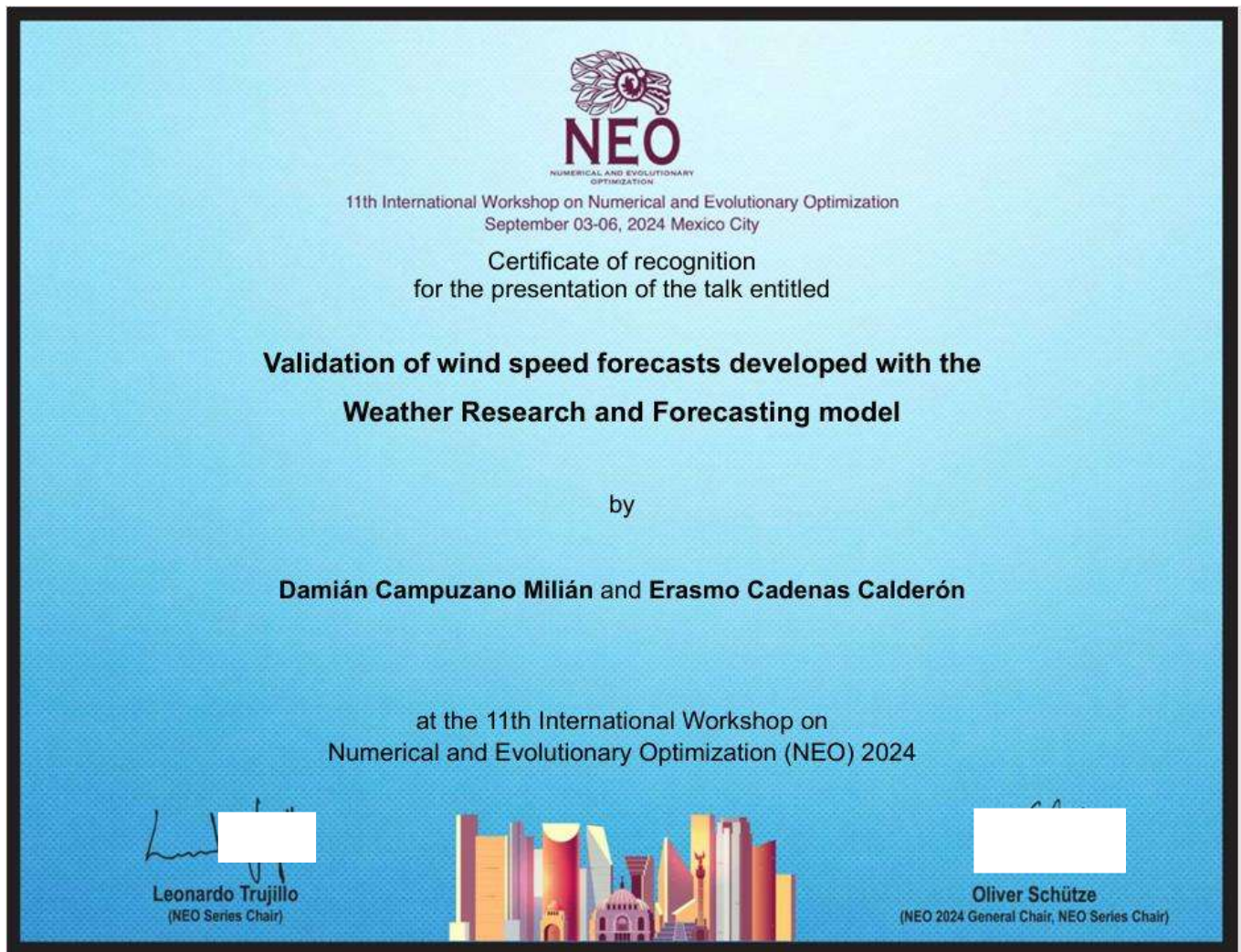
En última instancia, el desarrollo de modelos atmosféricos precisos y confiables tiene implicaciones significativas para el futuro energético sostenible. La energía eólica y la predicción del viento son pilares fundamentales en la transición hacia un sistema energético más limpio y resiliente. Al mejorar nuestra capacidad para prever y aprovechar el recurso eólico, podemos optimizar la generación de energía renovable y reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles. Esto no solo contribuye a mitigar el cambio climático, sino que también promueve un desarrollo económico y social más equitativo y sostenible a nivel global.

Referencias

- AESVAL (2022). *La importancia de la energía eólica*. Consultado en: <https://aesval.es/la-importancia-de-la-energia-eolica/>
- EcuRed (S.F). *Energía Renovable*. Consultado en: https://www.ecured.cu/Energia_renovable
- Grupo de Interacción Océano Atmósfera (2022). *Pronóstico Meteorológico*. [http://grupo-joa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/meteorologia/inf-wrf#~:text=El pronóstico meteorológico se realiza utilizando el modelo diseñado para la investigación y para aplicaciones operativas](http://grupo-joa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/meteorologia/inf-wrf#~:text=El%20pronostico%20meteorologico%20se%20realiza%20utilizando%20el%20modelo%20dise%F1ado%20para%20la%20investigaci%F3n%20y%20para%20aplicaciones%20operativas)
- Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM (2024). *Meteorología*. Consultado en: http://grupo_joa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/meteorologia/viento/dominio-1/en-superficie
- Meteoexploration (2015). *Previsión de viento*. Consultado en: https://meteoexploration.com/wind/wind_es.html
- Naciones Unidas (2024). *El Acuerdo de París*. Consultado en: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- Xosocotla Espejel Oscar Eduardo et al. (2023). *Crecimiento de las energías renovables pospandemia*. Consultado en: <https://acmor.org/publicaciones/crecimiento-de-las-energ-as-renovables-pospandemia>

A.4. Participación en Congresos

1. Congreso Internacional “Numerical and Evolutionary Optimization (NEO)”



2. Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica Aplicada 2024 (CIIMMA)



UMSNH-CA-267



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA A:



DAMIAN CAMPUZANO MILIAN

MARITZA TALHIA BERNABÉ MORALES

ERASMO CADENAS CALDERÓN



Por su destacable participación en la **ponencia** intitulada “Evaluación integral del rendimiento del modelo WRF para pronóstico de viento en regiones específicas”. Que han presentado en el 3er Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica Aplicada, el cual fue llevado a cabo los días 11, 12 y 13 de noviembre de 2024.




Dr. Miguel Villagómez Galindo
Coordinador General CIIMMA


M.A. Roberto Cadenas Tovar
Director de la Facultad de Ingeniería Mecánica

A.5. Publicación de Artículos

1. Congreso Estatal de Ciencia y Tecnología (ICTI)

MEMORIAS

CONGRESO ESTATAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN Y
ENCUENTRO DE JÓVENES INVESTIGADORES DEL ESTADO DE MICHOACÁN



Eje 1. Investigación en las ciencias básicas.

Mesa 2. Ciencias de la Ingeniería y Tecnología.

Octubre, 2024

ID: CP0224124

EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DE MODELOS DE PRONÓSTICO DEL VIENTO UTILIZANDO WRF

**Damian Campuzano Milian¹; Erasmo Cadenas Calderón²; Víctor López Garza³;
Gilberto González Avalos⁴; Miguel Villagómez Galindo⁵; Rafael Campos Amezcua⁶**

¹Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; damian.campuzano@umich.mx

²Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; ecadenas@umich.mx

³Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; victor.garza@umich.mx

⁴Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; gilberto.gonzalez@umich.mx

⁵Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; miguel.villagomez@umich.mx

⁶Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Tecnológico Nacional de México; rafael.ca@cenidet.tecnm.mx

Palabras Clave: WRF, NASA Giovanni, evaluación de modelos, pronóstico del viento, validación cualitativa y cuantitativa.

RESUMEN. La exactitud y confiabilidad en los pronósticos meteorológicos son esenciales para la toma de decisiones en sectores como la agricultura y la gestión de emergencias. El Modelo de Investigación y Pronóstico del Tiempo (WRF) es una herramienta fundamental en la simulación del comportamiento atmosférico, proporcionando una plataforma versátil para pronósticos a diversas escalas. No obstante, para asegurar la fiabilidad de estos pronósticos, es imprescindible realizar un proceso exhaustivo de validación. Este estudio se centra en la validación de las predicciones de viento generadas por el modelo WRF, comparándolas con datos de observación reales. Además de los enfoques tradicionales que se basan principalmente en métricas de error, este trabajo introduce un recurso adicional de validación que complementa las metodologías usuales. Utilizando datos de reanálisis del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) y datos observacionales de recursos energéticos globales de la NASA y de NASA Giovanni, con lo que se evalúa la sensibilidad del modelo. El análisis se lleva a cabo en el sitio de La Mata, en el municipio de Asunción Ixtaltepec, Oaxaca, México, donde se comparan las predicciones del WRF con observaciones de la velocidad del viento a 10 metros de altura. La validación incluye una evaluación cuantitativa mediante el uso de métricas de error como el Error Promedio Absoluto (MAE), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Coeficiente de Correlación de Anomalías (ACC), así como la implementación de un recurso cualitativo visual con datos de NASA Giovanni. Este enfoque combinado busca proporcionar una comprensión más detallada y precisa de la capacidad del WRF para predecir el viento, ofreciendo así una evaluación más integral de la precisión del modelo.

INTRODUCCIÓN. La predicción precisa de la velocidad del viento es esencial para varias industrias y aplicaciones. En el sector de la energía eólica, por ejemplo, la exactitud en la predicción del viento es crucial para maximizar la eficiencia de las turbinas eólicas, optimizar su mantenimiento y planificación, y asegurar la rentabilidad de los proyectos de energías renovables. Además, la aviación y la navegación dependen de pronósticos del viento precisos para garantizar la seguridad de las operaciones y reducir el consumo de combustible. Asimismo, en la agricultura, la previsión del viento puede ayudar a optimizar el uso de pesticidas y prevenir la erosión del suelo. En situaciones de emergencia, como huracanes o tormentas, las predicciones del viento juegan un rol vital en la toma de decisiones para proteger a las comunidades afectadas. El Modelo de Investigación y Pronóstico del Tiempo (WRF) es una herramienta numérica avanzada que ha ganado

INSTITUTO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA
E INNOVACIÓN DEL ESTADO DE MICHOACÁN DE OCAMPO



1164

popularidad en los últimos años debido a su capacidad para modelar condiciones atmosféricas a diversas escalas, desde lo global hasta lo regional y local. Sin embargo, la complejidad de los sistemas atmosféricos hace necesario validar las predicciones generadas por este modelo con datos observacionales. Este proceso de validación garantiza que los modelos sean confiables y precisos. En este estudio, se busca validar las predicciones de velocidad del viento generadas por el modelo WRF en la región de La Mata, Oaxaca, utilizando datos observacionales obtenidos del NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources. La validación se llevará a cabo a través de un análisis cuantitativo, utilizando varias métricas de error, así como la implementación de un recurso cualitativo adicional elaborado con datos de la plataforma NASA Giovanni y así proporcionar una evaluación integral de la precisión del modelo.

ANTECEDENTES. El WRF es un modelo numérico que ha sido ampliamente utilizado para la predicción meteorológica y la investigación atmosférica. Desde su creación, ha permitido avances significativos en la capacidad de predecir fenómenos atmosféricos complejos, como tormentas, ciclones y cambios en los patrones del viento. Sin embargo, como cualquier modelo numérico, su precisión depende en gran medida de los datos utilizados para inicializar el modelo y de los esquemas de parametrización que controlan los procesos atmosféricos internos. La base de Datos del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) es una plataforma en línea que proporciona acceso a una vasta cantidad de datos observacionales de alta resolución, los cuales son altamente utilizados como datos de reanálisis para generar los modelos de pronóstico con WRF. Por otro lado, para validar las predicciones generadas por modelos numéricos, NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources y NASA Giovanni ofrecen datos globales, incluyendo observaciones satelitales y productos derivados que permiten comparar los resultados del modelo con datos observacionales reales. Este enfoque ha sido probado en diversas investigaciones, demostrando su utilidad para mejorar la precisión de los modelos numéricos.

OBJETIVO. El objetivo principal de este estudio es validar las predicciones de velocidad del viento generadas por el modelo WRF utilizando datos observacionales de la NASA sobre los recursos energéticos mundiales y datos de NASA Giovanni. Los objetivos específicos son: Comparar las predicciones del WRF con datos observacionales de velocidad del viento a 10 metros de altura en La Mata, Oaxaca; y evaluar cuantitativamente la precisión del modelo utilizando métricas de error como MAE, RMSE y ACC.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Selección del Período de Estudio. El horizonte de pronóstico cubre tres períodos de 48 horas en los días seleccionados: del 1 al 3 de enero, del 1 al 3 de febrero y del 1 al 3 de marzo. Estos períodos fueron seleccionados debido a la disponibilidad de datos y su relevancia para el análisis de la dinámica del viento en la región.

Configuración del Modelo WRF. El WRF se configuró con datos de reanálisis del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR). La región de estudio se centró en La Mata, Oaxaca, con una resolución espacial de 3 km y resolución temporal de 1 hora. Se emplearon esquemas de parametrización para la dinámica del viento y otros procesos atmosféricos específicos de la región.

Acceso y Extracción de Datos. Los datos observacionales utilizados para la validación fueron extraídos de la plataforma NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources y de la plataforma NASA Giovanni. Estos datos incluyen mediciones satelitales de la velocidad del viento a 10 metros de altura, y fueron descargados en formatos NetCDF y CSV para su análisis.

Comparación y Análisis de Datos. La comparación entre las predicciones del WRF y los datos observacionales se realizó utilizando las siguientes métricas de error:

- Error Promedio Absoluto (MAE)
 - Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)
 - Coeficiente de Correlación de Anomalías (ACC)
- Los resultados fueron evaluados para identificar discrepancias y sesgos en el modelo.

RESULTADOS.

Comparación de Datos. La comparación entre las predicciones del WRF y los datos observacionales de la NASA sobre los recursos energéticos mundiales mostró un comportamiento un tanto similar y las diferencias significativas en algunas de las predicciones iniciales. Estas discrepancias se cuantificaron utilizando las métricas de error seleccionadas, como podemos observar en las Fig. 1, 2 y 3.



Figura 1. Modelo de pronóstico vs comportamiento real.



Figura 2. Modelo de pronóstico vs comportamiento real.



Figura 3. Modelo de pronóstico vs comportamiento real.

Análisis de Métricas de Error

Con las métricas de error se pueden otorgar etiquetas que van desde pobre hasta excelentes acordes a los resultados obtenidos para cada modelo de pronóstico, teniendo los resultados que se comparten en la Tabla 1 y con los cuales se validan los modelos generados.

Métrica	Enero	Febrero	Marzo
MAE	1.99230429	2.63975459	1.52858854
	<i>Excelente</i>	<i>Bueno</i>	<i>Excelente</i>
RMSE	2.13584446	3.33701594	1.73206417
	<i>Aceptable</i>	<i>Pobre</i>	<i>Excelente</i>
ACC	0.98116562	0.75164601	0.79239651
	<i>Excelente</i>	<i>Excelente</i>	<i>Excelente</i>

Tabla 1. Resultados de las métricas de error

Análisis del recurso cualitativo de NASA Giovanni. Para completar la validación cuantitativa realizada con las métricas de error, la propuesta de implementar este recurso cualitativo de manera visual nos permitió generar los siguientes mapas de comparación de velocidades promedio del viento, que en coincidencia en cuanto a mediciones del viento promedio para la zona de la Mata a las horas y días mencionados anteriormente no son muy diferentes, como se muestran en la Fig. 4, con lo que se valida el modelo de pronóstico generado.

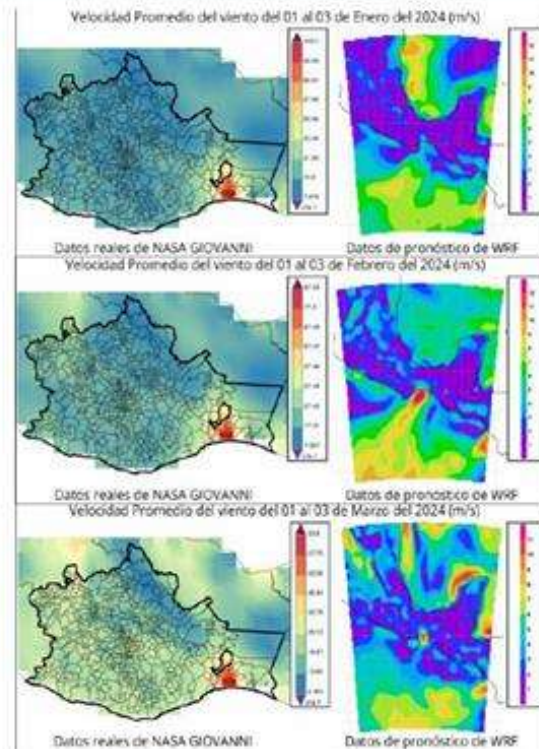


Figura 4. Mapas con velocidades de viento promedio.

CONCLUSIONES. Las métricas de error utilizadas proporcionaron una evaluación clara de la precisión del modelo en las coordenadas en específico de la región de estudio permitiendo obtener resultados con una mayor precisión. La implementación del recurso adicional de validación que proponemos utilizando datos de NASA Giovanni ha demostrado ser una metodología efectiva para obtener datos promedios regionales de la velocidad del viento. La capacidad de combinar análisis cualitativos y cuantitativos ofrece una visión más completa de la fiabilidad de los modelos numéricos, lo que es crucial para las aplicaciones industriales y de gestión de emergencias o para fines de despacho de energía eólica.

REFERENCIAS.

1. NASA Giovanni (2024). "Giovanni The Bridge Between Data and Science v 4.40". Consultado en: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
2. NASA (2024). "NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources". Consultado en: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
3. NCAR (2024). "Data for Climate & Weather Research". Consultado en: <https://rda.ucar.edu/>
4. <https://rda.ucar.edu/>

2. Milenaria, Ciencia y Arte

Evaluación de Modelos de Pronóstico de Viento creados con el modelo Weather Research and Forecasting

Autores: Damian Campuzano Milian, Erasmo Cadenas Calderón y Rafael Campos Amezcua



Actualmente se encuentra aceptado y en la fase de editorial, en espera de ser publicado en la edición del mes de junio del 2025.

A.6. Estancia de Investigación



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Mecánica

Cuernavaca, Mor., a 28 de febrero del 2025

Asunto: Carta de Liberación

**A QUIEN CORRESPONDA
PRESENTE**

La presente lleva el fin de informarle que el estudiante **Damián Campuzano Milian**, con número de matrícula **1423194h**, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica de la **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**, realizó una estancia académica relacionada con su proyecto de tesis titulado *"Conformación de un modelo a mesoescala para la predicción a mediano plazo de la velocidad del viento en La Mata, Oaxaca"*. La estancia se realizó en el Departamento de Ingeniería Mecánica del **Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico**, bajo el asesoramiento del Dr. Rafael Campos Amezcua, durante el periodo comprendido del 13 de enero al 28 de febrero del presente año.

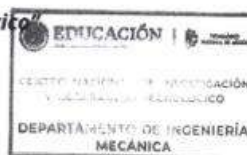
Se extiende la presente a solicitud del interesado para los fines que a él convengan. Sin otro particular, quedo a su disposición para cualquier información adicional.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"

RAFAEL CAMPOS AMEZCUA

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



RCA/mrsr



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 1408,
e-mail: dim@cenidet.tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



Bibliografía

- [1] Global Wind Energy Council, “Informe Global sobre Energía Eólica 2024”. Consultado: el 12 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://gwec.net/global-wind-report-2024/>
- [2] AMDEE, “Asociación Mexicana de Energía Eólica”. Consultado: el 12 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://amdee.org/es_es/
- [3] AMDEE, “En México, tan sólo 6% de la matriz energética renovable es eólica: AMDEE”. Consultado: el 12 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://amdee.org/es_es/noticias/en-mexico-tan-solo-6-de-la-matriz-energetica-renovable-es-eolica-amdee/
- [4] Secretaría de Energía, “Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2024-2038”. Consultado: el 24 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2024-2038>
- [5] Secretaría de Energía, “Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2022-2036 | Secretaría de Energía | Gobierno | gob.mx”. Consultado: el 28 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-para-el-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-304042>
- [6] Secretaría de Relaciones Exteriores, “Concluye participación de México en la COP28”. Consultado: el 13 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/sre/prensa/concluye-participacion-de-mexico-en-la-cop28>
- [7] DOF, “Manual de Pronósticos”. Consultado: el 28 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5505475&fecha=23/11/2017#gsc.tab=0
- [8] SENER Secretaría de Energía, “Mapa de Ruta Tecnológica Energía Eólica en Tierra”, <https://amdee.org/wp-content/uploads/mapa-ruta.pdf>.
- [9] Gobierno de México, “SEGUNDA SECCION PODER EJECUTIVO SECRETARIA DE ENERGIA ACUERDO por el que se emite el Manual de Pronósticos”, Consultado: el 28 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5505475&fecha=23/11/2017#gsc.tab=0
- [10] COMET MetEd, “COMET - Educación y Capacitación MetEd”. Consultado: el 29 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.meted.ucar.edu/education_training/lesson/262

- [11] E. Roque, A. Ferrer, I. Borrajero, y M. Sierra, "Elaboration of short-term energy forecast for wind farms.", *La Habana, Cuba. Energética vol.39 no.2. La Habana may.- ago. versión On-line ISSN 1815-5901*, 2018.
- [12] M. S.-M. Cong Feng, "Characterizing forecastability of wind sites in the United States.", *Renawable Energy*, 1-14., 2018.
- [13] D. A. Businger, "Wind power characteristics of Oahu, Hawaii.", *Renew Energy*, vol. 128, pp. 324–336, 2018.
- [14] E. S. R., "What model resolution is required in climatological downscaling over complex terrain", 203, pp. 68–82, 2018.
- [15] R. Le Roux, "Comparison of statistical and dynamical downscaling results from the WRF model", 100, pp. 67–73, 2018.
- [16] D. Zhenhua *et al.*, "Improving WRF model turbine-height wind-speed forecasting using a surrogate-based automatic optimization method.", *Atmospheric Research ISSN 0169-8095, (DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.04.011).*, vol. 226, pp. 1–16, 2019.
- [17] S. Fernández-González *et al.*, "Sensitivity analysis of WRF model: wind-resource assessment for complex terrain", *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol. 57, pp. 733–753, 2018.
- [18] E. Kalnay *et al.*, "The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project", *Renewable Energy: Four Volume Set*, vol. 1–4, pp. 146–194, dic. 2018, doi: 10.4324/9781315793245-16/NCEP-NCAR-40-YEAR-REANALYSIS-PROJECT-KALNAY-KANAMITSU-KISTLER-COLLINS-DEAVEN-GANDIN-IREDELL-SAHA-WHITE-WOOLLEN-ZHU-CHELLIAH-EBISUZAKI-HIGGINS-JANOWIAK-MO-ROPELEWSKI-WANG-LEETMAA-REYNOLDS-ROY-JENNE-DENNIS-JOSEPH.
- [19] Z. Liu, C. L. Shie, A. Li, y D. Meyer, "NASA Global Satellite and Model Data Products and Services for Tropical Meteorology and Climatology", *Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 2821*, vol. 12, núm. 17, p. 2821, ago. 2020, doi: 10.3390/RS12172821.
- [20] C. J. Willmott y K. Matsuura, "Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance", *Clim Res*, vol. 30, núm. 1, pp. 79–82, dic. 2005, doi: 10.3354/CR030079.
- [21] Planas Oriol, "Aerogenerador: qué es y cómo funciona un generador eólico". Consultado: el 18 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://solar-energia.net/energias-renovables/energia-eolica/aerogeneradores>
- [22] Editorial Etecé, "Atmósfera - Concepto, característica, capas e importancia". Consultado: el 1 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://concepto.de/atmosfera/>

- [23] COPE, “¿Cómo se produce el viento?” Consultado: el 21 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.cope.es/actualidad/vivir/noticias/como-produce-viento-20200421_686327
- [24] F. J. Torregrosa Ponce, “Viento y Circulación General de la Atmósfera”. Consultado: el 1 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://slideplayer.es/amp/5468829/>
- [25] I. Vonderková, “Los molinos de viento hacen recordar tiempos antiguos”. Consultado: el 2 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://espanol.radio.cz/los-molinos-de-viento-hacen-recordar-tiempos-antiguos-8088399>
- [26] S. Reed, “Los gigantes que convirtieron la energía eólica en una realidad - The New York Times”. Consultado: el 1 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.nytimes.com/es/2018/04/26/espanol/energia-eolica-turbinas.html>
- [27] P. Segui, “Parques eólicos: cómo funcionan, tipos, beneficios y desventajas”. Consultado: el 1 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ovacen.com/energias-renovables/eolica/parques-eolicos/>
- [28] Aerogeneradores.com, “Curvas de Potencia de los Aerogeneradores”. Consultado: el 2 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://aerogeneradores.com/curvas-de-potencia-de-los-aerogeneradores/>
- [29] J. M. Cortés, “Diferentes tipos del pronóstico del tiempo”. Consultado: el 1 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.meteored.mx/noticias/divulgacion/diferentes-tipos-del-pronostico-del-tiempo.html>
- [30] S. Al-Yahyai, Y. Charabi, y A. Gastli, “Review of the use of Numerical Weather Prediction (NWP) Models for wind energy assessment”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, núm. 9, pp. 3192–3198, dic. 2010, doi: 10.1016/J.RSER.2010.07.001.
- [31] J. Franklyn y R. Murcia, “ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO A DIFERENTES ALTURAS USANDO EL MODELO WRF”, 2012, Consultado: el 28 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://bart.ideam.gov.co/wrfideam/ATLAS/documentos/Modelamiento.pdf>
- [32] Secretaría de Energía, “Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias”. Consultado: el 24 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/articulos/atlas-nacional-de-zonas-con-alto-potencial-de-energias-limpias?idiom=es>
- [33] NSF NCAR, “Data for Climate & Weather Research”. Consultado: el 1 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://rda.ucar.edu/>

- [34] Deyimar A., “60 Comandos esenciales y populares de Linux”. Consultado: el 7 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.hostinger.es/tutoriales/linux-comandos#%C2%BFQu%C3%A9%20Es%20Un%20Comando%20Linux?>
- [35] OpenGrADS, “Sistema de Análisis y Visualización de Cuadrícula”. Consultado: el 3 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://opengrads.org/>
- [36] NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources, “POWER | DAV”. Consultado: el 3 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Damián Campuzano Milián

Conformación de un modelo a mesoescala para la predicción a mediano plazo de la velocidad del viento

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:458272289

Fecha de entrega

12 may 2025, 12:45 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

12 may 2025, 12:50 p.m. GMT-6

Nombre de archivo

Conformación de un modelo a mesoescala para la predicción a mediano plazo de la velocidad del....pdf

Tamaño de archivo

9.2 MB

142 Páginas

22.888 Palabras

128.885 Caracteres

20% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Top Sources

- 19%  Internet sources
- 8%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

1 Integrity Flag for Review



Replaced Characters

59 suspect characters on 14 pages

Letters are swapped with similar characters from another alphabet.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica	
Título del trabajo	CONFORMACIÓN DE UN MODELO A MESOESCALA PARA LA PREDICCIÓN A MEDIANO PLAZO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN LA MATA, OAXACA	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Damian Campuzano Milian	1423194h@umich.mx
Director	Erasmus Cadenas Calderón	ecadenas@umich.mx
Codirector	Víctor López Garza	
Coordinador del programa	Miguel Villagómez Galindo	miguel.villagomez@umich.mx

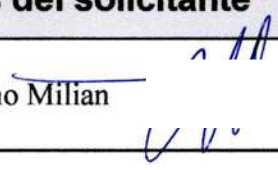
Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	NO	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	NO	
Traducción a otra lengua	NO	
Revisión y corrección de estilo	NO	
Análisis de datos	NO	
Búsqueda y organización de información	NO	
Formateo de las referencias bibliográficas	NO	
Generación de contenido multimedia	NO	
Otro	NO	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Damian Campuzano Milian 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a ,07 de abril de 2025