

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), marzo-abril 2025,
Volumen 9, Número 2.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2

EVALUACIÓN DE LA POTENCIA EÓLICA DISPONIBLE, MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN BOCA DEL RIO, DURANTE EL AÑO 2024

**ASSESSMENT OF AVAILABLE WIND POWER USING
ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN BOCA DEL RIO, DURING
THE YEAR 2024**

José Alfredo Inclán Barragán

Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales (FIMCN).

Armando Campos Domínguez

Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales (FIMCN).

Adrián Vidal Santo

Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales (FIMCN).

Francisco Ortiz Martínez

Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales (FIMCN).

Armando Campos Domínguez

Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales (FIMCN).

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2.17485

Evaluación de la potencia eólica disponible, mediante Inteligencia Artificial en Boca del Río, durante el año 2024

José Alfredo Inclán Barragán¹

jinclan@uv.mx

<https://orcid.org/0009-0009-0351-0851>

Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería
Mecánica y Ciencias Navales (FIMCN).

Armando Campos Domínguez

acampos@uv.mx

<https://orcid.org/0009-0006-8393-1493>

Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería
Mecánica y Ciencias Navales (FIMCN).

Adrián Vidal Santo

avidal@uv.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3133-4332>

Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería
Mecánica y Ciencias Navales (FIMCN).

Francisco Ortiz Martínez

franortiz@uv.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3722-7658>

Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería
Mecánica y Ciencias Navales (FIMCN).

Josué Domínguez Márquez

jdominguez@uv.mx

<https://orcid.org/0009-0001-8611-9656>

Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería
Mecánica y Ciencias Navales (FIMCN).

RESUMEN

Se realizó un estudio del potencial eólico disponible en Boca del Río, Veracruz, utilizando datos de una estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). En total, se recopilaron 8546 registros horarios del año 2024, que fueron analizados mediante Inteligencia Artificial, usando Python y librerías como Pandas, SciPy y Matplotlib. Se elaboró una estadística descriptiva con histograma de frecuencias, para caracterizar el comportamiento del viento, incluidas medidas como media, moda, mediana, máximo y desviación estándar. Así como una distribución de Weibull. Además, se evaluó el potencial eólico disponible mensual y se generó un resumen anual, facilitando la elección del aerogenerador adecuado para el sitio de estudio. El análisis reveló dos períodos estacionales de viento: de mayo a octubre y de noviembre a abril.

Palabras clave: potencial eólico, distribución weibull, potencia eólica disponible, inteligencia artificial, energía renovable

¹ Autor principal

Correspondencia: jinclan@uv.mx

Assessment of available wind power using Artificial Intelligence in Boca del Río, during the year 2024

ABSTRACT

A study of the available wind potential in Boca del Río, Veracruz, was conducted using data from a meteorological station of the National Meteorological Service (SMN). A total of 8,546 hourly records from the year 2024 were collected and analyzed using Artificial Intelligence, Python, and libraries such as Pandas, SciPy, and Matplotlib. Descriptive statistics with a frequency histogram were developed to characterize wind behavior, including measures such as mean, mode, median, maximum, and standard deviation, as well as a Weibull distribution. In addition, the monthly available wind potential was evaluated, and an annual summary was generated, facilitating the selection of the appropriate wind turbine for the study site. The analysis revealed two seasonal wind periods: from May to October and from November to April.

Keywords: wind potential, weibull distribution, available wind power, artificial intelligence, renewable energy

Artículo recibido 15 febrero 2023

Aceptado para publicación: 15 marzo 2023



INTRODUCCIÓN

La energía eólica es aquella que se puede obtener de la energía cinética del viento, está relacionada con la energía solar (Barzola, y otros, 2016). El viento es consecuencia de movimientos de masas de aire a diferentes temperaturas, presiones y humedad, se da por la diferencia de presión entre dos puntos y la rotación de la tierra. El aprovechamiento de la energía del viento no es nuevo y se conoce desde la navegación a vela y los primeros molinos de viento. La energía del viento es un recurso energético que está en auge, debido a la tendencia de uso de energías renovables (Enríquez García & Moreno Avilés, 2020). Se considera una energía limpia que ayuda en la disminución de gases de efecto invernadero, al no quemar combustibles fósiles, debido a esto se han realizado estudios para evaluar su aprovechamiento en diferentes partes del país. Este estudio de potencial eólico disponible se realizó para la ciudad de Boca del Rio, Veracruz, México, aprovechando que cuenta con una estación meteorológica oficial del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), se utilizaron los registros horarios del año 2024, estos son: fecha, hora, velocidad y dirección del viento, temperatura y presión atmosférica. Se obtuvieron un total de 8546 registros horarios, a los cuales se les realizó tratamiento y análisis estadístico mediante herramientas de Inteligencia Artificial, se utilizó el asistente DeepSeek, para generar código en Python el cual proporcionó el tratamiento de datos, la ejecución de los modelos estadísticos y las gráficas de los modelos. El lenguaje utilizado fue Python y se utilizó la librería Pandas para realizar el tratamiento de datos, realizar la base de datos del 2024 de las variables necesarias, SciPy para realizar el modelo de distribución de Weibull y la librería Matplotlib para generar los gráficos de los modelos estadísticos. Se presenta la estadística descriptiva anual del 2024 del comportamiento del viento, para caracterizarla, estos son: la media, la moda, mediana, máximo y desviación estándar. Se genera y presenta un histograma de frecuencias para dar una idea más precisa del comportamiento del viento. Así mismo con la estadística realizada, se realiza el estudio del potencial eólico disponible, esta evaluación se realiza mensual y se proporciona un resumen anual, esto para poder tener una orientación del posible aprovechamiento eólico, y poder tomar una decisión sobre que aerogenerador es más recomendable en el sitio de estudio. Se finaliza con una gráfica de tendencia del comportamiento de las velocidades del viento durante el año, ésta demuestra que el viento presenta dos periodos estacionales, de mayo a octubre y de noviembre a abril.



METODOLOGÍA

La ciudad de Boca del Río, Veracruz cuenta con una estación meteorológica perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), y este pertenece a la Organización Mundial de Meteorología (OMM). Dicha estación cumple con las normas de medición de datos meteorológicos de la OMM. La estación es administrada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y está registrada ante la OMM con el número 76692, se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas Latitud 19 grados 08' 34.76" N y longitud 96 grados 06' 40.73" W (CONAGUA, Centro Hidrometeorológico Regional "Boca del Río - Veracruz", s.f.). La estación cuenta con un anemocinemógrafo que mide velocidad y dirección del viento a 25 metros sobre el nivel medio del mar, estos instrumentos son un anemómetro de cazuelas que mide la velocidad en m/s y una veleta que proporciona la dirección con base a la rosa de los vientos (De la Cruz Ángel, Inclán Barragán, González Mejía, Grajeda Rosado, & Diaz Abascal, 2024). Además, la estación cuenta con una garita meteorológica que contiene un psicrómetro para medir temperatura seca y húmeda en grados centígrados a nivel de superficie y un barómetro de mercurio de cubeta fija que mide la presión atmosférica en hecto pascales a 12 metros sobre el nivel medio del mar. Los datos se obtuvieron de la página oficial del SMN (CONAGUA, Servicio Meteorológico Nacional, s.f.). Los registros de vientos se obtuvieron en un formato de archivo de Excel, donde están organizados en libros mensuales y estos conforman un año, los registros se encuentran en archivos .xlsx que contienen 12 hojas y estas integran un año. Los datos obtenidos son horarios, estos representan un promedio de cuatro mediciones que corresponden a lecturas de cada 15 minutos, de estas cuatro lecturas se obtiene los promedios que definen tres tipos de vientos: dominante, promedio y máximo. Estos son vectores que representan magnitud y dirección, este procedimiento está establecido en el manual teórico práctico del observador meteorológico de superficie (Agua, 2010). Además de vientos, se utilizó la presión atmosférica y la temperatura ambiente, para calcular la densidad del aire. Estos registros son horarios, se toman cada hora, la presión de un barómetro de mercurio, y la temperatura de una garita meteorológica. Se tienen un total de 8760 de los cuales se obtuvieron 8546 registros, ya que 214 registros no se cuentan por diversos factores. Realizar la estadística de una base de datos tan amplia, es un trabajo fuerte y de tiempo, para lo cual se realizó mediante Inteligencia Artificial, primero el tratamiento de datos, el cual consiste en obtener las variables que se necesitan; del archivo Excel original, estos son la

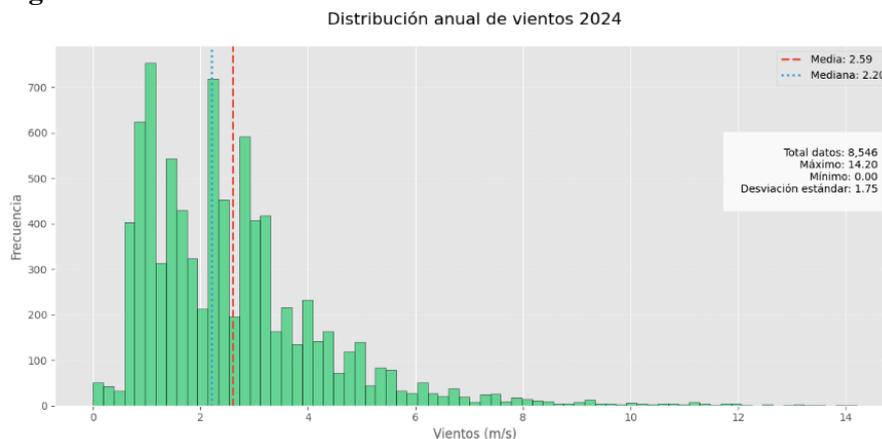


Tabla 1 Estadística descriptiva del viento 2024.

Mes 2024	Número de datos	Moda	Velocidad Promedio (m/s)	Desviación Estándar	Velocidad máxima (m/s)
Enero	743	0.80	3.18	2.62	13.30
Febrero	672	2.20	2.89	2.07	11.10
Marzo	743	1.10	2.88	1.79	10.97
Abril	719	2.20	2.84	1.70	10.35
Mayo	743	2.80	2.61	1.26	6.70
Junio	715	2.80	2.59	1.33	7.20
Julio	739	1.10	2.09	1.03	6.40
Agosto	737	2.20	2.06	0.97	5.00
Septiembre	710	2.20	2.17	1.35	9.52
Octubre	743	2.20	3.12	2.04	10.67
Noviembre	719	1.10	2.39	1.58	9.37
Diciembre	563	1.10	2.17	2.00	14.20

La tabla 1 muestra el número de registros mensuales, la moda, la velocidad promedio, desviación estándar y la velocidad máxima promedio de los registros de cada mes. El promedio de velocidad anual es 2.59 (m/s) y la desviación estándar anual de 1.75, el histograma de distribución de vientos anual del 2024 se presenta en la figura 3.

Figura 3 Grafico de distribución anual de vientos 2024.



En el histograma se observa una mediana de 2.20, un promedio de 2.59 y una desviación estándar de 1.75.

La potencia que suministra un aerogenerador depende de la energía cinética que origina el viento, al barrer la superficie de las palas, y ésta depende de su longitud y masa del aire en movimiento (Eraso Checa, Escobar Rosero, Fernando Paz, & Morales, 2018). En la ecuación 1, se define la energía cinética del viento.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad Ecu. (1)$$

Donde m es la masa del aire en (kg), y v es la velocidad del viento en (m/s), donde la masa se define en la ecuación 2.

$$m = \rho V \quad Ecu. (2)$$

Donde ρ es la densidad del aire en (kg/m³), y V es el volumen del cilindro de barrido en (m³). La densidad del aire se define por la ecuación 3, donde P_{atm} es la presión atmosférica, está dada en (kg/ms²), R_o la constante del aire seco 287.05 (J/kg/K), esta fórmula se propone en la IEC 61400 (Ramírez & Saavedra Montes, 2012).

$$\rho = \frac{P_{atm}}{R_o T_{abs}} \quad Ecu. (3)$$

V es el volumen de paso por las palas y se define por la ecuación 4.

$$V = AL \quad Ecu. (4)$$

Donde A es la superficie en (m²), L es la longitud del cilindro en (m), y considerando el tiempo t , se obtiene la ecuación 5.

$$L = vt \quad Ecu. (5)$$

De esta forma resulta la ecuación 6, que define la energía cinética del viento.

$$E_c = \frac{1}{2}\rho Av^3 t \quad Ecu. (6)$$

Con la energía cinética se puede obtener la potencia teórica del aerogenerador, definida en la ecuación 7.

$$P = \frac{E_c}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad Ecu. (7)$$

El área de paso por las palas es circular, siendo así, en las maquinas eólicas circulares, entonces el área se define en función del diámetro de las palas y resulta la ecuación 8.

$$A = \rho \frac{D^2}{4} \quad Ecu. (8)$$

Resumiendo, la potencia disponible del viento se presenta en la ecuación 9.

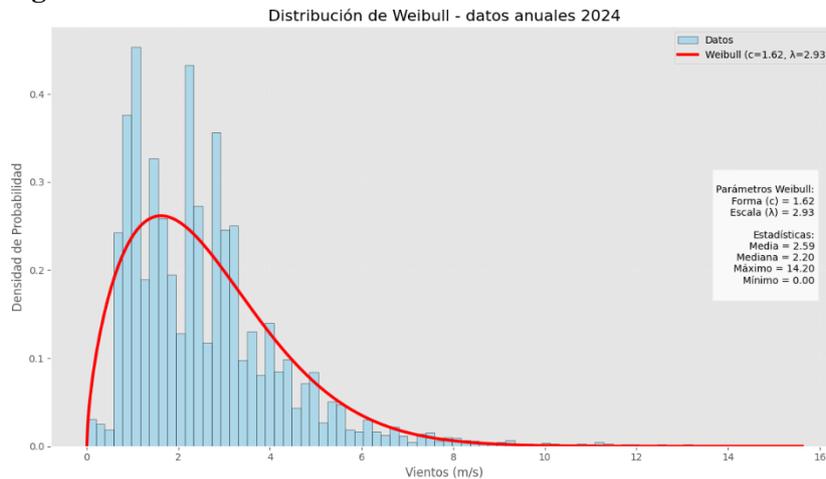
$$P = \frac{\pi}{8}\rho D^2 v^3 \quad Ecu. (9)$$

Para realizar un análisis más profundo se realizó una gráfica de distribución de Weibull de los datos



anuales del 2024, esta función presenta un excelente ajuste de los datos, con lo cual se puede obtener la densidad de potencia con un buen ajuste determinado por los parámetros de forma (c) y escala (λ), estos valores se obtuvieron mediante Python con la librería SciPy, se utilizaron los datos de velocidad del viento horarios del año 2024 para elaborar la gráfica y obtener la función, representada en la figura 4.

Figura 4 Grafico de distribución Weibull de vientos.



En la figura 4, se presentan los resultados del análisis estadístico de los vientos, los cuales son: media 2.59, mediana 2.20, factor de forma 1.62 y factor de escala 2.93.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La energía disponible del viento, no se puede aprovechar en su totalidad. Albert Betz, en su teorema demostró que, al extraer la energía del viento, esta reduce su velocidad, y por tanto su aprovechamiento. La máxima energía que se puede aprovechar del viento es del 59% (Mendoza Uribe, 2018), que es el rendimiento máximo de la energía cinética disponible del viento. La potencia que extrae un aerogenerador está definida por la ecuación 10.

$$P = C_p \cdot \frac{\varnothing}{2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot v^3 \quad Ecu. (10)$$

Donde C_p es el coeficiente de potencia que es el límite aprovechable en (%), expresado en la ecuación 11.

$$C_p = \frac{P_a}{P_d} \quad Ecu. (11)$$

El C_p está determinado por la razón de la potencia aprovechable P_a y la potencia disponible P_d , la densidad del aire \varnothing , D es el diámetro de las palas y v la velocidad del viento. La fórmula muestra dos

características importantes, las cuales definen la potencia, la primera las características del viento que son la densidad del aire y su velocidad, la segunda son las características del generador, donde se define su rendimiento y el diámetro de las palas. En la tabla 2 se presentan las características del viento y densidad mensuales.

Tabla 2 Propiedades del aire.

Mes 2024	Velocidad Promedio (m/s)	presión atmosférica promedio (hPa)	Temperatura ambiente (°C)	Densidad del aire (kg/m ³)
Enero	3.18	1014.27	22.86	1.19
Febrero	2.89	1013.47	23.42	1.19
Marzo	2.88	1009.87	26.20	1.18
Abril	2.84	1009.85	27.71	1.17
Mayo	2.61	1004.96	30.79	1.15
Junio	2.59	1006.84	29.78	1.16
Julio	2.09	1012.14	28.66	1.17
Agosto	2.06	1012.81	28.86	1.17
Septiembre	2.17	1008.48	29.09	1.16
Octubre	3.12	1013.49	26.97	1.18
Noviembre	2.39	1011.91	26.50	1.18
Diciembre	2.17	1016.44	24.15	1.19

En la tabla 2 se presenta los valores promedios mensuales de presión atmosférica y temperatura ambiente, que definen la densidad del aire calculadas con la ecuación 3, ésta varía de 1.15 a 1.19 y el promedio anual fue de 1.17; el valor es mayor de uno, lo cual aplica mayor empuje en las palas. Con el valor de la densidad del aire para la ubicación de estudio, donde se encuentra la estación meteorológica, y se obtuvieron valores horarios de temperatura, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, se obtiene la potencia disponible del viento del lugar de estudio, definida en la ecuación 12.

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad Ecu. (12)$$

En donde P/A es la densidad de potencia disponible en (W/m²), ρ la densidad del aire promedio de la ubicación en (kg/m³) y v la velocidad en (m/s).

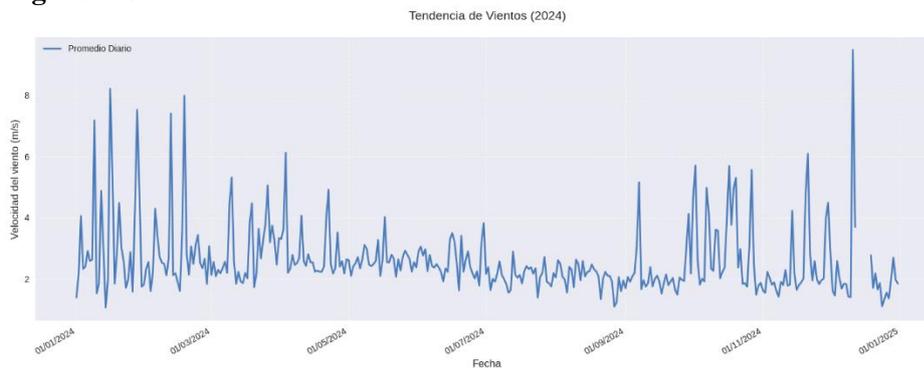


Tabla 3 Potencia disponible del viento.

Mes 2024	Velocidad Promedio (m/s)	Densidad del aire (kg/m ³)	Potencia disponible del viento (W/m ²)
Enero	3.18	1.19	19.20
Febrero	2.89	1.19	14.37
Marzo	2.88	1.18	14.04
Abril	2.84	1.17	13.39
Mayo	2.61	1.15	10.24
Junio	2.59	1.16	10.06
Julio	2.09	1.17	5.33
Agosto	2.06	1.17	5.11
Septiembre	2.17	1.16	5.94
Octubre	3.12	1.18	17.87
Noviembre	2.39	1.18	8.03
Diciembre	2.17	1.19	6.09

La potencia disponible en el año 2024, calculada con la ecuación 12, se presentan mes a mes en la tabla 3, se presenta en las columnas las dos variables de las que depende la potencia disponible, la velocidad y la densidad del aire.

Figura 5 Grafico de tendencia anual de vientos.



La figura 5 muestra el comportamiento anual de la velocidad promedio diaria del año 2024, donde se observa la tendencia del viento, los picos de velocidades se deben a la estacionalidad del año, causada por el fenómeno de frentes fríos del golfo de México (González Mejía, De la Cruz Ángel, Inclán Barragán, Pacheco Martinez, & Ponce Ávila, 2025).

CONCLUSIONES

Un estudio estadístico de los registros horarios anuales de las características del viento, como son: la velocidad y dirección del viento, temperatura y presión atmosférica, son fundamentales para realizar un estudio del potencial eólico disponible. A partir de las estadísticas de la ubicación de la zona de estudio se puede iniciar un análisis del posible aprovechamiento de la energía eólica del lugar, tomando los

datos que se encuentran en la estación meteorológica. La estadística descriptiva mostrada en la tabla 1, realizada a 8546 registros, muestra un promedio anual de 2.59 m/s en la velocidad del viento, esta varía de 0 conocido como calmas hasta 14.20 m/s como viento promedio horario máximo, la desviación estándar anual es de 1.75, lo cual nos recomienda realizar un estudio de variabilidad de la velocidad del viento; el mes con menor promedio es agosto con 2.06 m/s y el de mayor promedio es enero con 3.18 m/s, debido a la mayor frecuencia de eventos de frentes fríos en este mes. En la figura 3, en el histograma anual de vientos realizado, se observa que los vientos se encuentran mayormente entre 1.0 y 3.0 m/s, ahí se encuentra la mayor frecuencia, los valores obtenidos mediante la ejecución de los modelos estadísticos con Python y la librería Pandas nos da una media de 2.59, una mediana de 2.20 y una desviación estándar de 1.75, el histograma muestra una excelente distribución de los registros de vientos en el año 2024. En la figura 4 del gráfico de distribución de Weibull, se muestra la distribución de vientos, el factor de forma (c), describe el comportamiento del viento, mientras que el factor de escala (λ), indica la velocidad media del viento, el factor de forma es 1.62, la cual se refiere a las velocidades más probables, y el factor de escala de 2.93 nos dice que este valor es el que se aproxima más a la velocidad media anual; este gráfico junto con el histograma de frecuencias es el inicio para un estudio de potencial eólico y la selección de un aerogenerador en sitio. En la tabla 2, de propiedades del aire se muestra las características de densidad del aire, obtenidas a partir de la temperatura ambiente y la presión atmosférica y calculadas con la ecuación 3. Se muestra que los meses con menos densidad es junio y septiembre con 1.16 y los meses con mayor densidad son enero, febrero y diciembre con 1.19, el promedio anual de la densidad del aire es de 1.17, lo cual es normal para una zona costera, ya que a mayor altura y menor presión atmosférica hay menor densidad del aire, en energía eólica una densidad arriba de 1 del aire provoca mayor empuje en las palas de los aerogeneradores, ya que hay más masa de aire por unidad de volumen, esto se traduce en mayor empuje. En la tabla 4 se presenta la potencia disponible del viento en (W/m^2), esta potencia teórica está limitada al rendimiento del aerogenerador, está calculada con la ecuación 12, con base a la velocidad promedio y la densidad de aire mensuales, el promedio anual de velocidad es 2.59 y la densidad promedio anual es 1.17. Se observa que el mes con menor disponibilidad es agosto con 5.11 y el de mayor disponibilidad es enero con 19.20, se observa una variación muy alta, debido a la variabilidad estacional de los vientos de la zona de estudio. El



potencial disponible promedio anual en promedio es de 10.66 W/m². En la figura 5 de tendencia de vientos en el año 2024, se observa que los vientos tienen dos periodos estacionales muy marcados, de vientos de menor velocidad de los meses de mayo a octubre y de vientos más fuertes de noviembre a diciembre, el aprovechamiento depende del mes del año, esto debido a la climatología de la zona de estudio, y hay que considerar esta situación en la selección del aerogenerador, ya que también en la figura 5 se observa picos de velocidades altas, debido a los eventos de frentes fríos, los cuales muestran una variabilidad de los eventos y a su vez mostrada en la gráfica de tendencia de vientos, de la figura 5.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agua, C. N. (2010). *Manual Teórico Práctico del Observador Meteorológico de Superficie*. Ciudad de México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Barzola, J., Espinoza, M., Vera, Á., Valencia, Á., Cabrera, F., & Briones, C. (2016). Análisis del potencial de energía eólica a partir de mediciones in situ en Atahualpa - Santa Elena. *YACHANA*, 5(3), 103-112.
- CONAGUA, S. . (s.f.). *Centro Hidrometeorológico Regional "Boca del Río - Veracruz"*. Recuperado el 30 de Marzo de 2025, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/centro-hidrometeorologico-veracruz-boca-del-rio>
- CONAGUA, S. . (s.f.). *Servicio Meteorológico Nacional*. Recuperado el 30 de Marzo de 2025, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/>
- De la Cruz Ángel, E. J., Inclán Barragán, J. A., González Mejía, G., Grajeda Rosado, R. M., & Díaz Abascal, P. (2024). Estudio de Comportamiento de Velocidad del Viento en Boca del Río Mediante Distribución Weibull. *Ingeniantes*, 2(1), 23-28.
- Enríquez García, L. A., & Moreno Avilés, H. O. (2020). Características del viento y potencia eólica disponible en la región andina de la provincia de Chimborazo. *Dominio de las ciencias*, 6(3), 1077-1093.
- Eraso Checa, F., Escobar Rosero, E., Fernando Paz, D., & Morales, C. (2018). Metodología para la determinación de características del viento y evaluación del potencial de energía eólica en Túquerres - Nariño. *Científica*, 31(1), 19-31.



González Mejía, G., De la Cruz Ángel, E. J., Inclán Barragán, J. A., Pacheco Martínez, C., & Ponce Ávila, J. (2025). EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO A DIFERENTES ALTURAS: ESTUDIO TEMPORAL Y ESPACIAL EN BOCA DEL RÍO, VERACRUZ. *Ciencia Latina*, 9(1), 6245-6255.

Google. (s.f.). *Google Colaboratory*. Recuperado el 30 de Marzo de 2025, de

https://colab.research.google.com/?hl=es#scrollTo=5fCEDCU_qrC0

High-Flyer. (s.f.). *DeepSeek*. Recuperado el 30 de Marzo de 2025, de <https://www.deepseek.com/>

Mendoza Uribe, I. (2018). Valoración del viento como fuente de energía eólica en el estado de Guerrero. *Ingeniería*, 22(3), 30-46.

Ramírez, C., & Saavedra Montes, A. J. (2012). Cálculo de parámetros del modelo de una turbina eólica (160 w). *IEEE*.

