

MODELO DE AJUSTE ENERGÉTICO PARA OPTIMIZAR EL USO DE ENERGÍA SOLAR Y EÓLICA EN ZONAS MINERAS DE ZARUMA, ECUADOR

Energy adjustment model to optimize the use of solar and wind energy in mining areas of Zaruma, Ecuador

 ¹ Daniel Torres *

 ² Mariela Moreno Palacios

 ² Arquimides Haro

¹ Investigador independiente; Riobamba, Ecuador.

² Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Grupo de Energías Alternativas y Ambiente (GEAA), Riobamba, Ecuador.

* danydemera750@gmail.com

RESUMEN

El estudio propone un modelo de ajuste energético orientado a optimizar el uso de energía solar y eólica en zonas mineras del cantón Zaruma. Se utilizaron datos recopilados entre 2017 y 2020, considerando 8.760 registros anuales de radiación solar y velocidad del viento. La metodología empleada fue de carácter cuantitativo, combinando información proveniente de modelos globales, estaciones meteorológicas y datos satelitales. Se aplicó un mallado geográfico en el área de estudio y se utilizó interpolación espacial mediante el método IDW para generar mapas de predicción del potencial energético. Los resultados muestran que Zaruma posee un potencial eólico constante a lo largo del año, lo que favorece la implementación de turbinas eólicas. Asimismo, la zona central del cantón presenta niveles de radiación solar superiores a 4 W/m², adecuados para la instalación de paneles solares. Se calculó además la rentabilidad de ambos recursos, destacando su viabilidad para proyectos de energía renovable a futuro.

Palabras claves: *Energías renovables, Contaminación, Zaruma, Sostenibilidad, Potencial energético.*

ABSTRACT

The study proposes an energy adjustment model aimed at optimizing the use of solar and wind energy in mining areas of the Zaruma canton. Data collected between 2017 and 2020 were used, considering 8,760 annual records of solar radiation and wind speed. The methodology employed was quantitative in nature, combining information from global models, meteorological stations, and satellite data. A geographic grid was applied to the study area, and spatial interpolation using the IDW method was used to generate predictive maps of energy potential. The results show that Zaruma has a consistent wind potential throughout the year, favoring the implementation of wind turbines. Likewise, the central area of the canton presents solar radiation levels above 4 W/m², suitable for the installation of solar panels. The profitability of both resources was also calculated, highlighting their feasibility for future renewable energy projects.

Keywords: *Renewable energy, Pollution, Zaruma, Sustainability, Energy potential.*

I. INTRODUCCIÓN

El Ecuador posee una ubicación estratégica y clima privilegiado, lo cual favorece al desarrollo de las actividades económicas en general, entre ellas la minería. Asimismo presenta gran riqueza geológica, encontrándose en su territorio depósitos minerales que albergan económicamente elementos tales como oro, plata, cobre, molibdeno, hierro y titanio, los mismos que están dispuestos principalmente en las provincias de Pichincha, Bolívar, Esmeraldas, Imbabura, Zamora Chinchipe, Napo y Sucumbios (1).

El Gobierno Nacional decidió apoyar el desarrollo de la industria minera y atraer capitales hacia este sector considerando que el Ecuador es un país con potencial minero, que tiene reservas de oro, plata y cobre, además de una variada oferta de productos mineros(2). En el país se ha desarrollado la minería, sólo a nivel de minería artesanal y de pequeña minería (3).

La industria minera en el cantón Zaruma, Ecuador, enfrenta importantes desafíos de sostenibilidad energética, social y ambiental, exacerbados por el uso predominante de combustibles fósiles en la generación de energía (4).

Se apoya la lucha contra el cambio climático promoviendo un mayor uso de energías limpias, mejorar la planificación energética y la red gestión y aumento de la eficiencia energética (5). Ecuador es rico en recursos alternativos como el sol, viento, pequeñas vertientes, etc, lo que hace factible el desarrollo de energías no convencionales en distintos puntos topográficos (6). Prácticas de extracción de minerales han llevado a niveles significativos de emisiones de CO₂, afectando tanto la salud ambiental como las comunidades locales. Sin embargo, la ubicación estratégica de Ecuador, próxima a la línea ecuatorial, ofrece un elevado potencial para la implementación de energías renovables, particularmente solar y eólica(7).

La falta de un modelo ajustado para evaluar y aprovechar estos recursos energéticos en áreas específicas ha limitado el avance hacia una transición energética en sectores críticos como la minería. Este estudio se centra en el desarrollo y validación de un modelo de ajuste para evaluar con precisión el potencial energético solar y eólico, utilizando datos satelitales locales y técnicas de interpolación y modelado geoespacial como IDW. Los resultados pretenden no solo optimizar

el uso de fuentes de energía limpia en Zaruma, sino también establecer un marco de referencia replicable para otras regiones mineras en Ecuador y el mundo. La investigación muestra que el uso de energías renovables podría reemplazar los combustibles fósiles, reducir las emisiones de CO₂ y beneficiar a la industria minera y otras áreas. Este enfoque promueve la energía sostenible y la protección del medio ambiente(8).

El presente artículo constituye un esfuerzo significativo por caracterizar el potencial energético solar y eólico en el cantón Zaruma, una región con una fuerte tradición minera y una alta dependencia histórica de los combustibles fósiles. Aunque el uso de modelos empíricos como Bristow-Campbell y Weibull es ampliamente conocido, su aplicación en esta zona específica, complementada con la generación de mapas interpolados mediante técnicas geoespaciales, representa un aporte relevante para la planificación energética regional. La comparación entre los datos observados y los estimados a través del modelo de Bristow-Campbell permite evaluar su precisión y viabilidad para ser replicado en otras regiones del Ecuador. Este modelo, al proporcionar estimaciones promedio de radiación solar diaria a partir de la latitud y datos de temperatura, facilita la construcción de bases de datos energéticos, incluso en zonas con información limitada. Además, ajustando el parámetro de transmitancia atmosférica, su aplicación podría extenderse a distintas regiones del mundo.

Los datos utilizados en este estudio fueron extraídos de System Advisor Model (SAM)(9), una herramienta avanzada que permite analizar la viabilidad técnica y económica de proyectos de energía renovable, incluyendo la estimación de la radiación solar. SAM es ampliamente reconocida por su capacidad para simular el comportamiento de sistemas solares fotovoltaicos y térmicos, lo que la convierte en una opción confiable para obtener información precisa sobre la disponibilidad de recursos solares en diferentes regiones.

La integración de estos datos con los modelos empíricos empleados en este estudio fortalece la evaluación del potencial energético de la región, brindando una visión más completa y detallada sobre la factibilidad de implementar proyectos de energía renovable en el cantón Zaruma y áreas similares. Además, la posibilidad de ajustar el parámetro de transmitancia atmosférica según las características locales de cada región amplía aún

más la aplicabilidad del modelo, permitiendo su uso en estudios globales de potencial energético renovable. Los resultados del estudio nos demuestran que el cantón Zaruma tiene potencial eólico constante en todo el año lo que permitiría la implementación de turbinas eólicas y en la zona central existe potencial solar aprovechable lo que facilitaría la implementación de paneles solares.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio

Zaruma, una ciudad en el altiplano de la provincia de El Oro, al sureste de Ecuador y al suroeste de la provincia de El Oro, se encuentra en el Callejón Interandino, a una altitud que varía de 900 a 3500 metros sobre el nivel del mar. Sus coordenadas geográficas son 3°26'0" S de latitud y 79°36'0" W de longitud, con coordenadas UTM 9620395 655523. Esta se encuentra al norte con la provincia del Azuay, al sur con el cantón Piñas, al este con el cantón Portovelo, y al oeste con los cantones Chilla y Atahualpa, abarcando una superficie total de 643,5 km².

Determinación de puntos de muestreo y monitoreo

Para determinar los puntos de estudio se realizó un mallado geográfico para obtener una mejor distribución de los puntos en toda el área del Cantón Zaruma. Donde los puntos fueron utilizados para descargar datos satelitales de diferente software y crear una base de datos tanto para la radiación solar como para la velocidad del viento, donde los resultados obtenidos fueron usados para la creación de mapas de radiación y velocidad.

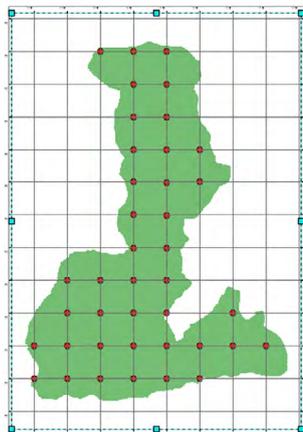


Figura 1. Mallado del Cantón Zaruma para los puntos de muestreo

La interpolación IDW es un método de interpolación espacial utilizado para predecir valores en ubicaciones desconocidas basándose en la proximidad y los valores de puntos conocidos. Este método asume que los puntos cercanos tienen valores más similares entre sí que los puntos más alejados(10). IDW calcula el valor de una variable en un punto desconocido como una media ponderada de los valores en puntos conocidos cercanos. El peso asignado a cada punto conocido es inversamente proporcional a la distancia a la ubicación desconocida. Esto significa que los puntos más cercanos tienen un mayor peso en la estimación que los puntos más lejanos(11).

La energía mínima de radiación solar debe ser de 4 [Kwh/m²] para que las aplicaciones derivadas de colectores solares térmicos, módulos fotovoltaicos y viviendas bioclimáticas sean rentables (12).

El viento debe alcanzar una velocidad mínima, que varía según el aerogenerador, pero generalmente comienza entre 3 m/s y 4 m/s, conocida como "velocidad de arranque " y no debe exceder los 25 m/s, denominada "velocidad de corte " (13).

Se realizó la interpolación IDW de enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y diciembre teniendo en cuenta que la radiación mínima debería de ser de 166.67 W/m², entonces para valores mayores o iguales tendrán colores predominantes en la ilustración.

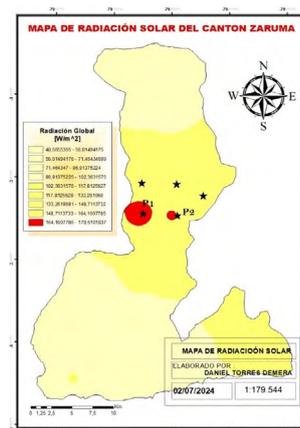


Figura 2. Mapa de radiación solar del Cantón Zaruma en el cual realizaremos el modelo de Bristow Campbell en el punto "P1"

Se ejecutó una base de datos de los últimos cuatro años de la velocidad del viento del cantón Zaruma con datos descargados de la base Global Atlas. Se tomaron los 40 puntos para la interpolación esto

nos indicará los lugares con mayor velocidad del viento y respectivamente los de menor velocidad, con una gama de color azul predominante a las localidades donde la velocidad del viento es mayor, esto lo podemos apreciar en las siguientes ilustraciones.

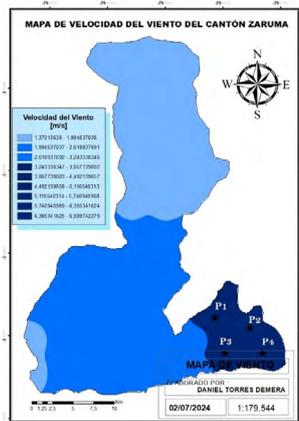


Figura. 3. Mapa de la velocidad del Viento donde se realizará el modelo de Weibull

Recolección de Datos

Software SAM para la recolección de datos de radiación solar.

El software SAM recopila datos meteorológicos a nivel global y está más enfocado a la creación de sistemas fotovoltaicos por lo cual fue la opción para recolectar de su base de datos, para ellos tuvimos que ingresar cada coordenada geográfica en el software el cual nos da un archivo .CVS con 8760 datos tomando 24 datos por día en un total de 365 días que tiene un año, también obtuvimos la elevación en metro de cada punto, se procedió a realizar un promedio mensual de todos los puntos y así obtener una tabla en la cual tenemos la radiación solar directa por mes y de cada punto con su elevación.

Global Atlas para la recolección de datos de la velocidad del viento

Para ello ingresamos cada punto geográfico y procedimos a la descarga de los datos, esta base de datos nos daba la velocidad del viento a una altura de 60 y 120 metro de altura sobre la superficie terrestre de cada punto para el caso de este trabajo solo utilizamos a la altura de 60 metros, esta base de datos ya nos da la velocidad del viento en promedio mensual de los últimos 4 años en un archivo .CVS de 12 datos a 60 metros y 12 datos para 120 metros por cada punto.

Modelo de ajuste de Bristow-Campbell

El modelo Bristow-Campbell es ampliamente utilizado para estimar la irradiancia solar debido a la facilidad de obtener las variables necesarias para su cálculo. Originalmente, fue aplicado en las localidades de Pullman, Great Falls y Tacoma, donde demostró ser eficiente, explicando entre el 70% y el 90% de la variación en la radiación solar. En este modelo, se utilizan la diferencia entre la temperatura máxima y mínima (amplitud térmica) y la precipitación diaria como variables de entrada (13).

$$H_g = H_o \alpha (1 - e^{-b(T_{max} - T_{min})^c}) \quad (1)$$

H_g = Radiación solar Wh/m²

H_o = Radiación solar extraterrestre Wh/ m²

T_{max} = Temperatura máxima promedio mensual °C

T_{min} = Temperatura mínima promedio mensual °C

a, b y c = Coeficientes atmosféricos.

Aunque los coeficientes A (a), B (b) y C (c) son de naturaleza empírica, poseen algún significado físico. El coeficiente A indica la radiación máxima esperada en un día despejado que se asocia a la transmitancia de la atmosfera(14). Los coeficientes B y C determinan la velocidad con la que A se alcanza a medida que aumenta la diferencia de temperatura. Los valores comúnmente reportados para estos coeficientes son 0,7 para A, un rango de 0,004 a 0,010 para B, y 2,4 para C (13).

Para determinar los coeficientes b y c existen algunas ecuaciones prácticas para encontrar los valores de estos coeficientes:

$$C = 2.116 - 0.072 (T_{max} - T_{min}) + 57.574 e^{\theta} \quad (2)$$

$$B = 0.107 c^{-2.6485} \quad (3)$$

Las celdas solares son interesantes por generar electricidad con energía solar. Sin embargo, esta tecnología está limitada, y se requiere investigación continua de materiales y sus características ópticas para su uso eficiente(15).

Modelo de ajuste de Weibull

Para predecir y lograr una buena aproximación estadística de la distribución anual del viento en un lugar determinado, se suele utilizar la distribución de Weibull, la función de Weibull presenta varias

ventajas sobre otras funciones de densidad de probabilidad (16,17). Permite estimaciones precisas de la asimetría en la distribución de densidad de probabilidad. La función de Weibull se caracteriza por dos parámetros: uno de escala y otro de forma. El parámetro de escala determina la dispersión de la distribución, mientras que el parámetro de forma define su configuración (18).

función de densidad de probabilidad de Weibull está dada por ecuación (4):

$$f(v) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(v/\lambda)^k} \quad (4)$$

V= velocidad del viento
El factor de escala, λ, medido en m/s
El factor de forma, k, adimensional.

La función de probabilidad de la distribución de la velocidad del viento puede normalizarse a través del análisis de Weibull. Los parámetros para este análisis se obtuvieron mediante regresión lineal entre los valores de la variable y su probabilidad acumulada, utilizando la transformada logarítmica y el método de mínimos cuadrados (18). La función de distribución acumulativa se presenta en la ecuación (5) que no es más que la integral de la ecuación (4).

$$F(V) = 1 - e^{-(v/\lambda)^k} \quad (5)$$

Rentabilidad

Es importante realizar la rentabilidad de la radiación solar global y de la velocidad de viento para la aplicación de dispositivos de generación de energía eólica y solar en una zona, en este estudio se analiza la rentabilidad de estos parámetros para concretar la aplicabilidad de proyectos renovables.

Para evaluar la viabilidad de un proyecto de energía solar, es esencial contar con datos precisos sobre la radiación solar, ya que esta información permite la concreción de dichos proyectos. La energía mínima de radiación solar debe ser de 4 [KWh/m²] para que las aplicaciones derivadas de colectores solares térmicos, módulos fotovoltaicos y viviendas bioclimáticas sean rentables(19). Se transforma 4 [KWh/m²] a [W/m²] y se lo divide por el número de horas en un día para determinar la rentabilidad y correcto funcionamiento de los paneles solares.

En el caso del viento hay que recordar que es un recurso intermitente y debe alcanzar una velocidad mínima, que varía según el aerogenerador, pero generalmente comienza entre 3 m/s (10 km/h) y 4 m/s (14,4 km/h), conocida como "velocidad de arranque" y no debe exceder los 25 m/s (90 km/h), denominada "velocidad de corte"(14), entonces tomamos en cuenta estos valores para realizar la interpolación y el diseño de mapas de velocidad de viento, para analizar la operación óptima de un aerogenerador en esta zona.

III. RESULTADOS

Las características físicas para la biomasa utilizada de Cannabis sativa L. (cáñamo) se resumen en la Tabla 1.



Figura 4. Mapa de radiación solar del Cantón Zaruma en el cual realizaremos el modelo de Bristow Campbell en el punto "P1"

En el método de estimación Bristow Campbell se determinó la irradiación solar del día 15 de cada mes. Hge representa la radiación solar estimada con el modelo y Hgr representa la radiación real que fue tomada de las bases de datos del SAM. Podemos observar en la ilustración (4) que ambas líneas siguen una tendencia similar a lo largo de tiempo con varios picos y varios valles, donde los picos son días en donde la radiación solar es mayor y los valles días donde es menor.



Figura 4. Mapa de radiación solar del Cantón Zaruma en el cual realizaremos el modelo de Bristow Campbell en el punto "P1"

En términos de tendencias generales, ambas líneas muestran un comportamiento similar, lo que indica que el modelo es capaz de capturar fluctuaciones estacionales en la radiación solar con una precisión razonable. La coincidencia en las gráficas nos indica que el modelo desarrollado tiene una gran fiabilidad ya que se aproxima bastante a los datos reales, pero las variaciones en la gráfica en periodos específicos del año con son en el día 15, 105 y 349, podemos observar que la radiación es notablemente superior a la que está prediciendo nuestro modelo, pero alrededor de día 166 la radiación estimada supera y valor real. Esto podría indicar que el parámetro “a” necesitaría ser ajustado para tener un mayor nivel de precisión en esos días.

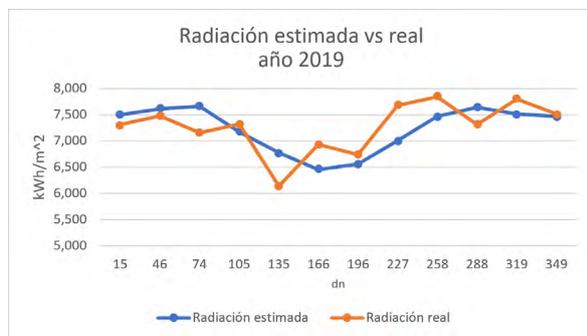


Figura 6. Radiación real vs radiación estimada con el modelo de Bristol Campbell para el año 2019

En determinados lapsos se pueden observar cambios muy drásticos como lo son en los días 166, 227 y 258 podemos ver que la radiación real es mayor que la radiación estimada, mientras que en los días 74, 135 y 288 la radiación estimada es mayor que la radiación real, estas diferencias podrían ser ocasionadas por variaciones del clima, errores en la base de datos ya que son datos satelitales y no datos de una estación, o también que el modelo requiera un ajuste en el parámetro “a” para que sea más preciso en ciertos días.



Figura 7. Radiación real vs radiación estimada con el modelo de Bristol Campbell para el año 2020

Podemos observar que las líneas son muy simétricas entre sí, no existe mucha variación pero también en ciertos puntos las líneas se alejan mucho unas de otras como lo es en los días 15, 288 y 319 donde la radiación estimada es mucho mayor que la radiación real lo que nos indica que el modelo no se está complementado adecuadamente a los valores reales, pero también podría ser un error en la base de datos del SAM ya que en general se puede observar que existe gran precisión en otros días del año, mientras que en los días 135, 227 y 349 la radiación real es mayor que la estimada pero no tiene un desfase abismal lo que nos indica que el modelo utilizado se acopla de muy buena manera a las condiciones de la región estudiada.

Análisis método de estimación con el Modelo de Weibull

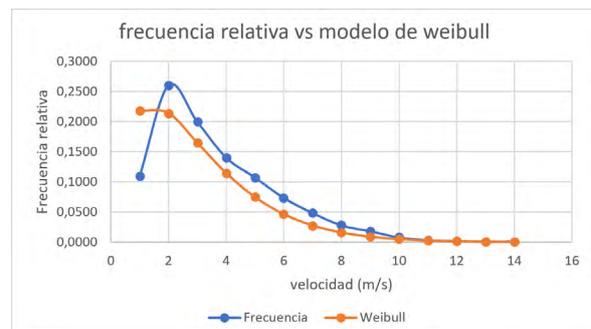


Figura 8. Frecuencia relativa vs estimación del modelo de Weibull en m/s a una altura de 60 m

La curva azul muestra que la velocidad del viento más común es alrededor de 2 m/s, con una disminución gradual de la frecuencia relativa a medida que aumenta la velocidad. El parámetro de forma $k < 2$ indica una distribución más ancha con una cola más larga hacia la derecha, mientras que el parámetro de escala λ sitúa el valor medio cerca de 3.22 m/s. Las diferencias entre las curvas sugieren que el modelo de Weibull no captura todas las variaciones específicas de los datos observados, pero sigue siendo útil para modelar la distribución del viento y hacer predicciones. La curva de Weibull, ajustada según los parámetros dados, representa una función de distribución de probabilidad que simplifica el análisis y permite estimaciones prácticas, aunque puede haber desajustes en ciertas velocidades específicas. En aplicaciones prácticas, como la energía eólica, el modelo de Weibull es fundamental para estimar la producción de energía y diseñar turbinas eólicas, proporcionando una base para decisiones informadas. Las diferencias entre las curvas azul y roja pueden deberse a la

variabilidad en los datos reales que el modelo de Weibull no capta completamente, lo que sugiere que podría ser necesario ajustar los parámetros. Sin embargo, el modelo de Weibull sigue siendo una herramienta valiosa y ampliamente aceptada en el estudio de la velocidad del viento, debido a su capacidad para representar la tendencia general de los datos y su aplicabilidad en el diseño y análisis de sistemas eólicos.

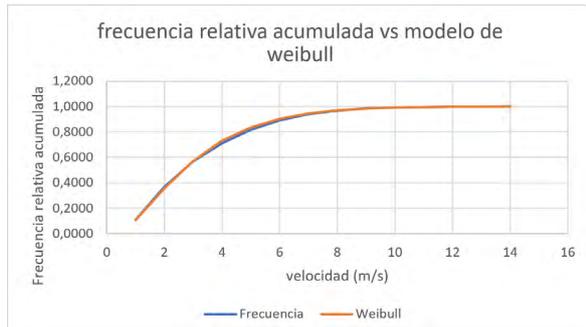


Figura 9. Frecuencia relativa acumulada vs estimación del modelo de Weibull acumulado en m/s a una altura de 60 m

La gráfica muestra que la línea naranja, que representa el modelo de Weibull acumulado, se ajusta bastante bien a la línea azul, que representa la frecuencia acumulada de la velocidad del viento, especialmente en el rango de valores entre 2 y 14 m/s. Este ajuste indica que el modelo de Weibull es una buena aproximación para describir la distribución de los datos de frecuencia acumulada de la velocidad del viento. Observando las pequeñas desviaciones, se puede notar que, al principio, la curva azul está ligeramente por debajo de la naranja, lo que podría indicar que los datos reales tienen una menor frecuencia acumulada en los valores más bajos en comparación con el modelo. Sin embargo, en el rango intermedio, ambas curvas coinciden muy bien, reforzando la idea de un buen ajuste del modelo. En los valores más altos, ambas curvas se nivelan y alcanzan un valor cercano a 1, como es esperado en funciones de distribución acumulativa. En resumen, la Figura 9 sugiere que el modelo de Weibull proporciona un buen ajuste para la distribución de frecuencia acumulada de los datos de velocidad del viento, con diferencias iniciales que parecen no ser significativas en comparación con el ajuste general.

IV. DISCUSIÓN

Los modelos utilizados, especialmente el Bristow-Campbell para radiación solar y la distribución de Weibull para velocidad del viento

son ampliamente aceptados en la literatura para estimar el recurso energético cuando no se cuenta con estaciones de medición directa. Sin embargo, la articulación entre estos modelos y el concepto de “optimización energética” no está claramente desarrollada, ya que no se abordan aspectos técnicos como el rendimiento de sistemas fotovoltaicos o eólicos, curvas de potencia, análisis de carga o criterios de eficiencia energética. Pero conociendo los picos de la radiación solar y velocidad del viento podemos asumir si existe un potencial óptimo para estos potenciales, teniendo en cuenta que el mínimo para que un panel solar funcione es de “4 [Kwh/m²]” y el mínimo para un aerogenerador funcione es de “3 m/s” con una velocidad máxima del viento de “25 m/s”.

Los resultados obtenidos con el modelo de Bristow-Campbell reflejan una correlación razonable entre la radiación solar estimada y los datos reales extraídos del System Advisor Model (SAM) para el período 2017–2020. En general, se observan patrones estacionales bien definidos, y el modelo muestra una capacidad aceptable para replicar las tendencias de variación mensual. Sin embargo, en varios días del año como los días 135 y 258 de 2017, o los días 288 y 319 de 2019 se presentan discrepancias notables, con diferencias superiores a 1 kWh/m² entre los valores reales y los estimados. Estas divergencias podrían explicarse por diversos factores: errores en la parametrización del modelo, especialmente en el coeficiente A, presencia de nubosidad no contemplada, o incluso inexactitudes en la base de datos satelital utilizada como referencia en la región(20). Cabe destacar que la validación del modelo se realizó tomando datos del día 15 de cada mes, lo cual puede introducir un sesgo si existen variaciones significativas dentro del mes que no son capturadas con esa única muestra temporal.

A pesar de estas limitaciones, estudios previos avalan la efectividad del modelo de Bristow-Campbell en contextos similares. Por ejemplo, en el norte de Brasil(21) y zonas tropicales(22), este modelo ha mostrado ser más preciso que otros métodos basados en temperatura, con valores de RMSE por debajo de 3.0 kWh/m²/día, lo que también se ha replicado parcialmente en este trabajo. Además, los coeficientes utilizados son comparables con los reportados en la literatura(23), lo que da soporte a la validez del modelo en la región de Zaruma. Sin

embargo, sería recomendable ampliar el análisis incorporando otras métricas de validación como el Error Medio Absoluto (MAE) y el coeficiente de determinación (R^2), para fortalecer cuantitativamente la comparación entre datos reales y estimados.

El modelo de Weibull aplicado a la distribución de velocidad del viento presentó una forma característica con parámetro $k < 2$, lo que sugiere una curva ancha y una alta variabilidad del recurso eólico(24). Aunque el modelo logra capturar la tendencia general de los datos, las diferencias observadas entre la curva de Weibull ajustada y los datos empíricos indican que no se logra reflejar completamente la complejidad del comportamiento del viento en Zaruma. Esto puede deberse a factores como la topografía irregular del cantón, efectos de microclima o la limitada resolución temporal y espacial de la base de datos Global Atlas utilizada.

Estudios similares realizados en Colombia(25) y Etiopía(26) muestran que, si bien la distribución de Weibull es una herramienta estándar para caracterizar el recurso eólico, su precisión puede verse comprometida en regiones de alta variabilidad atmosférica, lo que refuerza la necesidad de considerar otras técnicas de ajuste como Máxima Verosimilitud o distribuciones mixtas.

La estimación del recurso energético y la planificación de sistemas de generación, aunque este estudio identifica zonas con alto potencial solar y eólico en Zaruma, no se traduce en propuestas concretas sobre cómo estos recursos podrían ser aprovechados tecnológicamente. Por ejemplo, se podría evaluar la generación estimada con paneles fotovoltaicos o turbinas específicas para cada zona, así como su impacto en la reducción de emisiones de CO_2 o ahorro económico frente al uso de combustibles fósiles. De esta manera, se avanzaría hacia un enfoque de optimización energética real, más allá de la caracterización del recurso, aportando directamente a la formulación de políticas energéticas sostenibles para zonas mineras.

El uso de modelos empíricos para estimar el potencial renovable en regiones donde no existen estaciones meteorológicas permanentes sigue siendo una estrategia válida y necesaria. No obstante, este estudio evidencia que la precisión de tales modelos depende fuertemente

de la calidad de los datos y del ajuste fino de sus parámetros. Por ello, se recomienda la implementación de estaciones locales de medición, la validación de los modelos con series más extensas y el uso de herramientas de análisis estadístico más robustas para evaluar el comportamiento del clima local. De este modo, será posible fortalecer la confiabilidad de las estimaciones y avanzar en la implementación efectiva de sistemas de energía limpia adaptados a las condiciones específicas de Zaruma.

V. CONCLUSIONES

- El análisis de los datos meteorológicos obtenidos del satélite ha proporcionado una visión detallada de los patrones de radiación solar y viento en la región de Zaruma, fundamentales para evaluar el potencial energético de las fuentes renovables. Mediante la interpolación IDW en el software ArcMap, se ajustaron datos de velocidad del viento y radiación solar de 40 puntos, generando mapas mensuales que identifican zonas con mayor potencial eólico y solar.
- Los modelos de Weibull y Bristow-Campbell, utilizados para ajustar la distribución del viento y la radiación solar respectivamente, mostraron alta precisión frente a los datos reales del SAM y Global Atlas.
- Los resultados indican que la región sureste del cantón Zaruma posee un potencial eólico favorable para turbinas durante todo el año, mientras que el centro del cantón es apto para paneles solares. Aunque el modelo de Bristow-Campbell demostró ser efectivo en general, se identificaron desviaciones atribuibles a errores en la parametrización y las bases de datos, destacando la necesidad de ajustes y datos locales para mejorar su precisión.
- Este estudio establece una base sólida para el desarrollo de futuros proyectos de energías renovables en la región, al destacar la importancia de integrar parámetros climáticos más variados y utilizar datos de mayor resolución. Estas mejoras permitirán una planificación más precisa y eficiente, contribuyendo al diseño de soluciones energéticas sostenibles adaptadas a las características específicas del entorno local.

VI. REFERENCIAS

1. Empresa Nacional Minera del Ecuador. Informe anual 2020. Quito: Enami EP; 2020.
2. Banco Central del Ecuador. Cartilla de minería. Quito: Banco Central del Ecuador; 2020.
3. Toapanta R, Ricardo A. Mining policy and environmental sustainability in Ecuador. Quito: s.n.; 2017 Jun.
4. Machuca-González D, Suqui-Romero Y. Reflexiones criminológicas y victimológicas del delito de minería ilegal en el cantón Zaruma. *Cienc Téc Aplicadas*. 2022;70(11):1494-1514. Disponible en: <http://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es>
5. Heim J. Ecuador environment and energy fact sheet [Internet]. Quito: s.n.; 2024 Mar [citado 10 abr 2025].
6. Almeida W. Generación distribuida y su potencial aplicación en Ecuador. Quito: s.n.; 2003 Feb.
7. Murillo Carrión R. Zaruma, historia minera e identidad en Portovelo. 1.ª ed. Machala: s.n.; 2000.
8. Loayza Galarza CB, Pastor Toala JA. The capital effect in heritage cities: case Zaruma. Machala: s.n.; 2019 Jan.
9. System Advisor Model (SAM) [Internet]. Golden (CO): National Renewable Energy Laboratory; 2024 Dec 12 [citado 10 abr 2025]. Disponible en: <https://sam.nrel.gov/citing-sam.html>
10. Escudero AI, Recalde CG, Haro SM, Meneses MA. Spline cúbico para el tratamiento funcional de la radiación solar global. *Inf Technol*. 2016;27(2):153-162.
11. ArcGIS Pro resources [Internet]. Redlands (CA): Esri; 2024 [citado 22 jul 2024]. Disponible en: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
12. Castillo T, García F, Mosquera L, Rivadeneira T, Segura K, Yujato M. Panorama energético de América Latina y el Caribe. 1.ª ed. Quito: OLADE; 2022. p. 11-283.
13. Luque A, Hegedus S, eds. Handbook of photovoltaic science and engineering. 1st ed. Chichester: Wiley; 2003. p. 45-1138.
14. Recalde C, Cisneros C, Vaca D, Ramos C. Relación de la transmitancia atmosférica con la heliofanía y la diferencia de temperaturas extremas diarias en la zona ecuatorial andina. *Inf Technol*. 2015;26(1):143-150.
15. Huerta Mascotte E, Mata Chávez RI, Estudillo Ayala JM, Sierra Hernández JM, Guryev I, Lizárraga Morales RA. Solar cell characteristics study for solar energy efficient use. *Acta Univ*. 2016 Mar;26(NE-1):30-34.
16. José V, Silva D, Carvalho J, Cláudio C, Da Silva R, et al. Solar radiation estimated from empirical models for the north of Minas Gerais, Brazil. *Biosci J*. 2016 Feb;32(1):1-10.
17. Maldonado Ayala D, Chaidez JN. Ajuste y predicción de la distribución Weibull a las estructuras diamétricas de plantaciones de pino de Durango, México. *Madera Bosques*. 2002;8(1):47-56.
18. Villarrubia López M. Ingeniería de la energía eólica. 1.ª ed. Barcelona: Marcombo; 2011. p. 23-104.
19. Alfredo PSJ. La energía solar, una alternativa para la generación de energía renovable [Internet]. MW; 2016 [citado 30 jun 2025]. Disponible en: <http://www.ecorfan.org/spain>
20. Martínez M. Radiación solar: conceptos y aplicaciones [Internet]. 2016 May 8 [citado 30 jun 2025].
21. José V, Silva D, Carvalho J, Cláudio C, Da Silva R, et al. Solar radiation estimated from empirical models for the north of Minas Gerais, Brazil. *Biosci J*. 2016 Feb;32(1):1-10.
22. Dhanya AS, Rao BB, Pramod VP, Rao VUM. Delineation of air temperature based models for estimation of global solar radiation. *J Agrometeorol*. 2013 Dec;15(2):112-118.
23. Acosta Suasnabar EH, Valle Basualdo MT, Quijano Pacheco WS, Lizaraburu Aguinaga DA, Olivera CC, Benites-Alfaro E. Solar radiation as a source of clean energy: calculation by Bristow-Campbell thermal

- amplitude model and validation. In: Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology; 2020 Oct 15-17; Buenos Aires. Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions; 2023.
24. Constante J, Cuesta A, Jijón D. Fitting methods of two-parameter Weibull of wind series and electric-wind potential estimation. *Renew Energy*. 2021;164:746-755.
 25. Corte D, Sierra F, Valencia G. Validación del modelo matemático función de densidad de probabilidad (pdf) de Weibull, evaluando el recurso eólico en la zona del Caribe colombiano: caso estudio. *Prospectiva*. 2015;13(2):38.
 26. Geletaw B, Gebregziabher K. Statistical analysis of wind speed for energy potential estimation in Bahir Dar, Ethiopia using Weibull. *Am J Phys Educ [Internet]*. 2022;16(4):55-60 [citado 30 jun 2025]. Disponible en: <http://www.lajpe.org>