

# Potencial eólico en la provincia de Santa Cruz de Succhabamba - departamento Cajamarca 2023

## Wind Potential in the Santa Cruz de Succhabamba province - Cajamarca department 2023

Juan Deini Carrasco Díaz<sup>1</sup>

Recibido: 23/06/2023 - Aprobado: 16/08/2023 – Publicado: 15/12/2023

### RESUMEN

Frente a la preocupante curva de considerable pendiente que representa la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en las últimas décadas, la presente investigación apuesta por el aprovechamiento y consumo de energía proveniente de fuentes no convencionales que viene a ser el séptimo Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) por lo que, en aporte a su cumplimiento, se buscó cuantificar el potencial eólico presente en la cresta del cerro Cotorumi ubicado en el distrito de Santa Cruz de Succhabamba, provincia de Santa Cruz, departamento de Cajamarca, Perú. Se optó por aplicar el enfoque cuantitativo con diseño no experimental. A partir de la distribución estadística de Weibull se analizaron los datos satelitales de velocidad del viento a 50 metros de altura de la última década. Se encontró la presencia de un potencial de 94.48 watts por cada metro cuadrado que, teniendo presente el coeficiente de potencia de aerogeneradores comerciales de eje horizontal, la potencia extraíble se aproximaría al valor de 37.8 watts por metro cuadrado. El consumo promedio energético de la provincia de Santa Cruz de Succhabamba sería fácilmente cubierta por un aerogenerador de eje horizontal que posea un área de barrido mayor a los 5 767.7 metros cuadrados.

**Palabras claves:** Energía eólica, distribución de Weibull, perfil de viento, potencial eólico, rosa de los vientos.

### ABSTRACT

Faced with the worrying curve of considerable slope that represents the evolution of greenhouse gas emissions in recent decades, this research is committed to the use and consumption of energy from non-conventional sources, which is the seventh Development Goal. Sustainable Development (SDG) for which, in contribution to its compliance, it was sought to quantify the wind potential present on the crest of the Cotorumi hill located in the district of Santa Cruz de Succhabamba, province of Santa Cruz, department of Cajamarca - Peru. It was decided to apply the quantitative approach with a non-experimental design. From the Weibull statistical distribution, the satellite data of wind speed at 50 meters of height of the last decade were analyzed, finding the presence of a potential of 94.48 Watts for each square meter that, taking into account the power coefficient of wind turbines commercial with horizontal axis, the extractable power would approximate the value of 37.8 Watts per square meter. The average energy consumption of the province of Santa Cruz de Succhabamba would be easily covered by a horizontal axis wind turbine that has a swept area greater than 5,767.7 square meters.

**Keywords:** Compass rose, weibull distribution, wind potencial, wind power, wind profile.

1. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. Municipalidad Provincial de Santa Cruz, Cajamarca, Perú.

E-mail: [jackcadi18@gmail.com](mailto:jackcadi18@gmail.com) - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8000-6044>

## I. INTRODUCCIÓN

Santa Cruz de Suchabamba es la capital de la provincia de Santa Cruz, ubicada en el departamento de Cajamarca (Decreto Ley N.º 11328, del año 1950), con una población total de 9 640 habitantes proyectada al 30 de junio del año 2022, con una densidad poblacional de 27 habitantes por kilómetro cuadrado y una altitud promedio de 2 036 metros sobre el nivel del mar (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2022).

En base al Atlas eólico del Perú, las zonas costeras y zonas del oeste de la región Cajamarca presentan velocidades de viento altas en comparación al resto del territorio nacional (Ministerio de Energía y Minas, 2016) como se muestra en la Figura 1.

Santa Cruz de Suchabamba se ubica en la zona centro - oeste de la región Cajamarca y según el mapa de la Figura 1, esta ciudad se encontraría dentro del sector que presenta velocidades promedio mayores a 8 m/s a los cien metros sobre el nivel del suelo, lo que sustenta la viabilidad del estudio del potencial eólico y de esa manera impulsar propuestas de proyectos que se fundamentan en la extracción de energía por aerogeneradores para el abastecimiento de energía eléctrica en la ciudad.

La Asamblea General de las Naciones Unidas (2015) estableció 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible con el desafío de cumplirlos para el 2030. El aprovechamiento

de energía eólica para la producción de energía eléctrica comprende distintos objetivos de desarrollo sostenible, pero se resalta principalmente en el aporte para el cumplimiento del objetivo número siete en relación al uso de energía asequible y no contaminante. La importancia de este trabajo de investigación es dejar en evidencia la presencia de un alto potencial eólico en la cresta del cerro Cotorumi ubicado en el distrito de Santa Cruz de Suchabamba y, que a través de la autoridad edil, se plantee un proyecto técnico de un parque eólico para que sea presentado al gobierno regional de Cajamarca.

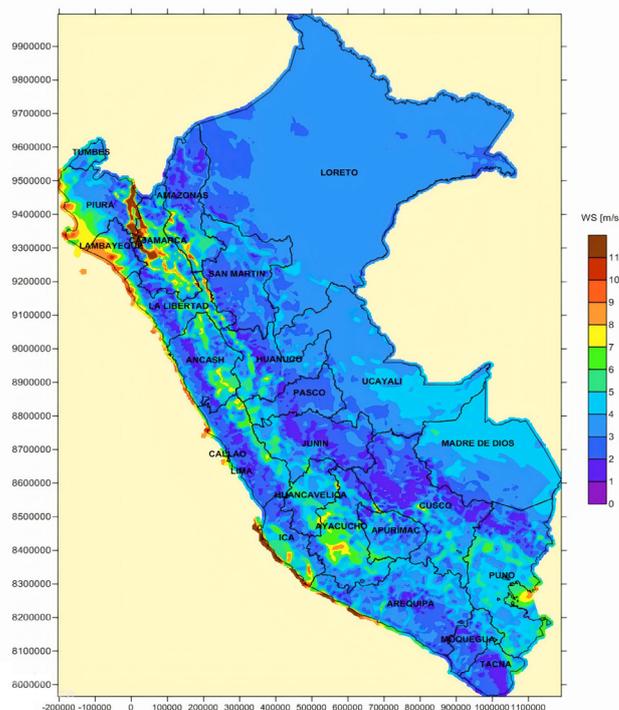
Electronorte S.A. (2023), encargada de suministrar servicio eléctrico a la provincia de Santa Cruz, para el desarrollo de esta investigación nos brindó la siguiente información: en Santa Cruz de Suchabamba, en el 2023 se consumió 159 924.47 KWh de energía en el mes de enero; 148 829.538, en febrero y 162 094.925, en marzo.

## II. METODOLOGÍA

El presente estudio fue cuantitativo debido a que el potencial eólico obtenido se representa numéricamente en la zona establecida a partir de datos meteorológicos. Además, fue de tipo aplicada dado que se fundamenta en el empleo del análisis Weibull para la distribución estadística de datos. Se fijó como diseño no experimental porque no se tenía el control de las variables, tanto como la velocidad del viento y el potencial eólico que depende de esta.

**Figura 1**

*Mapa de velocidad promedio del viento en Perú. Velocidad del viento a 100 metros sobre el nivel del suelo.*



*Nota:* Tomado del Atlas eólico del Perú (p.52), por el Ministerio de Energía y Minas, (2016), Vortex

En esta investigación, como técnica principal se utilizó el análisis documental de una amplia gama de datos meteorológicos, que fueron discretizados según su importancia. Se utilizó como instrumento principal el análisis de contenido en base al análisis Weibull, mediante el software Excel versión 2016.

El procesamiento de datos se realizó en el software Excel en base a los 36 552 datos de velocidad y dirección del viento obtenidos de la plataforma web NASA POWER y mediante el análisis estadístico se logró establecer un potencial eólico de 33.07 W por cada metro cuadrado a 50 metros sobre el nivel del suelo en la cresta del cerro Cotorumi, ubicado en el distrito de Santa Cruz de Suchabamba.

### III. RESULTADOS

Los resultados se sustentan en el análisis estadístico de los datos numéricos satelitales de la velocidad y dirección del viento que se importaron gratuitamente de la plataforma NASA POWER, para una mejor comprensión se desarrollaron los siguientes puntos:

#### 3.1. Representación del relieve

Santa Cruz de Suchabamba se encuentra entre formaciones montañosas, donde el cerro Cotorumi destaca por tener mayor altitud promedio a lo largo de su cresta y por su

fácil acceso, con una pendiente suave hacia el este como se muestra en la Figura 2.

La ruta tomada como referencia representa la cresta del cerro Cotorumi, en el sentido de norte a sur y el perfil de elevación generado (Figura 3) tiene una distancia horizontal de 2.46 km. Los puntos representativos se designaron en la zona con mayor altitud, es decir a 1.19 km de longitud horizontal. El punto más al norte del perfil marca el inicio de la ruta (lado izquierdo de la imagen) y el punto más al sur marca el final de la ruta (lado derecho de la imagen).

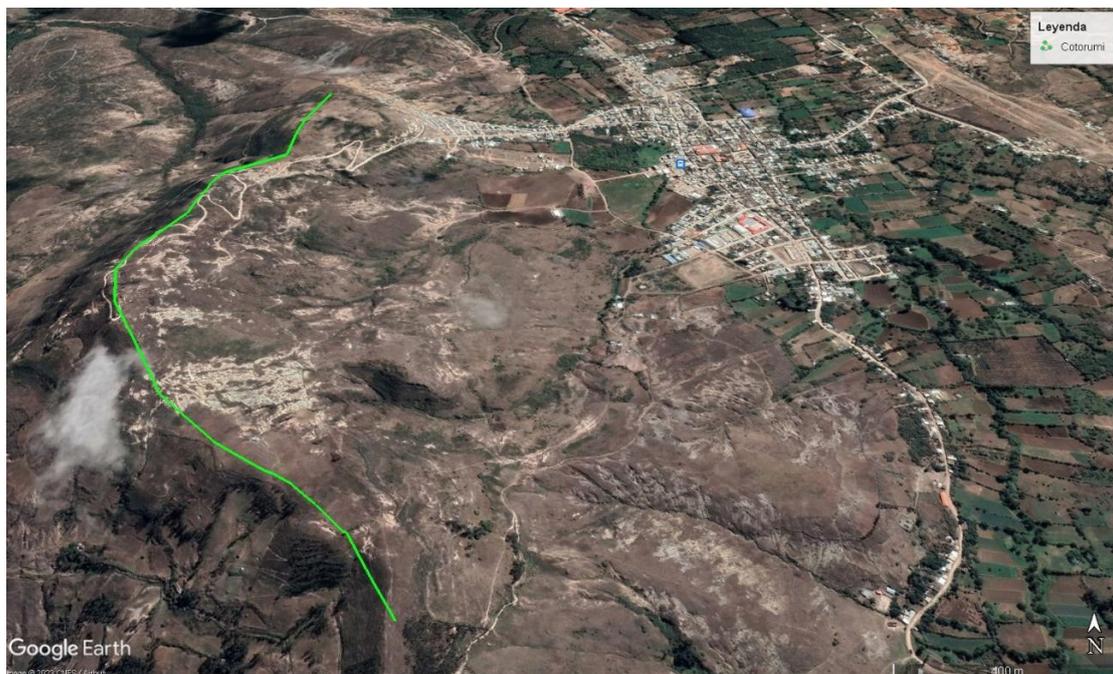
Las coordenadas geográficas obtenidas a partir de la ruta generada en Google Earth fueron en formato de grados-minutos-segundos (DMS) y se convirtieron a grados decimales (DD) para su ingreso a la plataforma de la NASA POWER. La Tabla 1 muestra los puntos representativos del perfil de elevación del cerro Cotorumi en su sector con mayor elevación.

#### 3.2. Distribución estadística de datos de dirección del viento

A partir de los 3 652 valores de dirección de viento importados por cada uno de los 7 puntos, se agruparon según las ocurrencias que se presentaron en un rango de 18°, entre 0° y 360°, en donde: 0° y 360° representaron el norte; 90° el este; 180° el sur y 270° el oeste. La representación de este proceso se muestra en la Figura 4 y se observa que la dirección predominante del origen del viento es del sentido noreste entre los 20° y 75°.

**Figura 2**

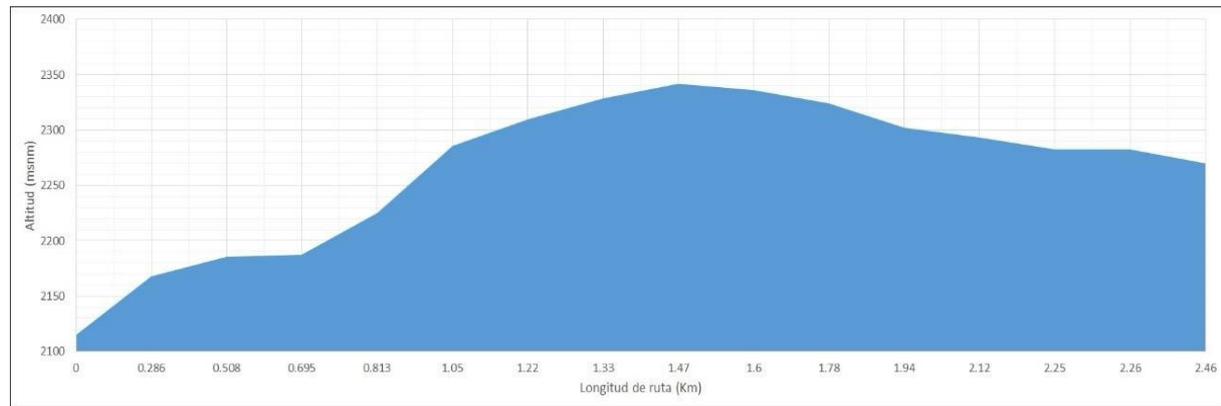
*Cresta del cerro Cotorumi, representada por la ruta generada de color verde.*



*Nota: Tomado de Google Earth (p.1), por Google, (2023)*

**Figura 3**

Perfil de elevación del cerro Cotorumi. Perfil con presencia de pendiente suave



**Tabla 1**

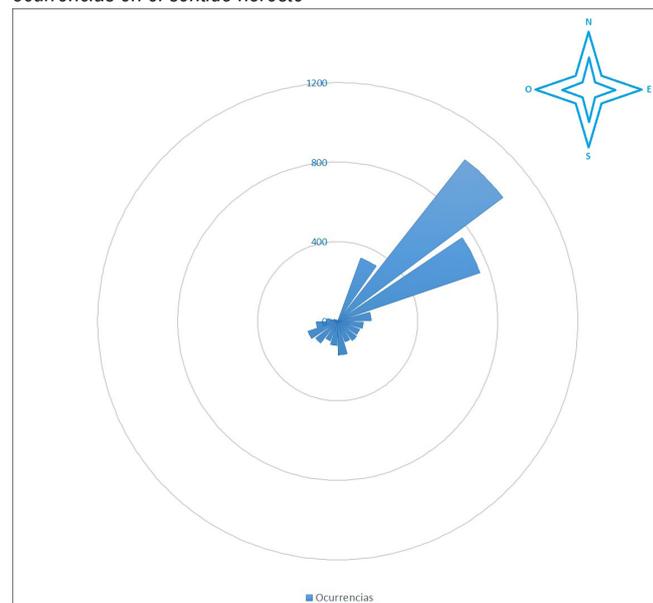
Coordenadas representativas de la cresta del cerro Cotorumi

Puntos	Coordenadas DMS			Coordenadas DD		Elevación (msnm)			
	Latitud sur	Longitud oeste		Latitud (°)	Longitud (°)				
1	6 °	37 '	57 "	78 °	57 '	27 "	-6.63255	-78.95763	2 282
2	6 °	38 '	1 "	78 °	57 '	29 "	-6.63362	-78.95796	2 302
3	6 °	38 '	5 "	78 °	57 '	29 "	-6.63474	-78.95812	2 322
4	6 °	38 '	11 "	78 °	57 '	27 "	-6.63649	-78.95746	2 342
5	6 °	38 '	18 "	78 °	57 '	22 "	-6.63846	-78.95613	2 322
6	6 °	38 '	21 "	78 °	57 '	19 "	-6.63924	-78.95516	2 302
7	6 °	38 '	27 "	78 °	57 '	10 "	-6.64086	-78.95286	2 282

Nota: El punto 4 es el de mayor altitud de la ruta creada. Cada punto fue seleccionado por su diferencia de elevación, y esta diferencia es de veinte (20) metros. Para cada uno de estos puntos se obtuvieron 3 652 datos de dirección y velocidad del viento en el período del 2013 al 2022, que fueron procesados en el software Excel 2016.

**Figura 4**

Rosa de vientos en cerro Cotorumi. Se da mayor cantidad numérica de ocurrencias en el sentido noreste



Nota: Se observa en el sentido predominante de la dirección del viento, no se evidenciaron obstáculos que distorsionen o perturben el viento en un radio de tres kilómetros y no fue necesario un estudio de resguardo.

**3.3. Distribución estadística de datos de velocidad del viento**

De los siete puntos definidos se obtuvieron 3 652 valores promedio de velocidad de viento que, numéricamente inicia en 1.93 y termina en 8.54. Para su distribución se partió en función de las tres primeras columnas resaltadas de la Tabla 2: La columna *i* representa la cantidad de datos, *RM* es el rango de mediana en función de la fórmula de Bernard como estimador de la función acumulada (ecuación 1) y *U* son los datos numéricos ordenados de menor a mayor de la velocidad del viento.

**Tabla 2**  
Procesamiento de datos *U*

<i>i</i>	<i>RM</i>	<i>U</i>	<i>x</i>	<i>y(RM)</i>	<i>f(U)/R(U)</i>	<i>R(U)</i>	<i>1-R(U)</i>	<i>f(U)</i>	<i>f(U)%</i>
1	0.00	1.93	0.66	-8.56	0.03	0.99	0.01	0.03	2.81
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
3 652	1.00	8.54	2.14	2.15	14.42	0.00	1.00	0.00	0.00

$$RM = \frac{i - 0.3}{3\ 652 + 0.4} \tag{1}$$

Con la función de Weibull (ecuación 2) se distribuyeron los 3 652 valores de velocidad de viento, en donde: *k* es el parámetro de forma, *c* es el parámetro de escala y *R(U)* la distribución acumulada superior.

$$f(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \cdot R(U) \leftrightarrow \{k; U\} > 0 \text{ y } c > 1 \tag{2}$$

Además, de la tercera ecuación, *F(U)* representa la distribución acumulada inferior que a continuación se desarrolla para expresarla como una ecuación lineal y así obtener los valores de los parámetros (ecuación 4).

$$F(U) = \int_0^y f(U) \cdot dU = 1 - R(U) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \tag{3}$$

$$F(U) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right]$$

$$1 - F(U) = \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right]$$

$$\ln(\ln(1 - F(U))) = k \ln(U) - k \ln(c) \leftrightarrow y(RM) = nx + m \tag{4}$$

Donde:

$$y(RM) = \ln(\ln(1 - F(U)))$$

$$n=k$$

$$x=\ln(U)$$

$$m= -k \ln \ln (c)$$

Con las ecuaciones anteriormente citadas se pueden establecer las demás columnas de la Tabla 2 para que faciliten su interpretación y cálculo. Entonces, al graficar *y(RM)* vs *x* se obtuvo la Figura 5 con un coeficiente de determinación (*R*<sup>2</sup>) de 95%.

De la Figura 5, la ecuación de la línea de tendencia representa la ecuación 4 y esta ecuación puede ser hallada mediante regresión o con el uso de una función de Excel. Los parámetros de Weibull están en función de los términos de la ecuación lineal, por lo que el término *k* es igual a 5.19 y el término *c* es igual a 4.64. Entonces, la función de distribución de Weibull quedó representada por la Figura 6 que equivaldría a *f(U)%* vs *U* según la Tabla 2.

La velocidad media, a partir de los parámetros de Weibull encontrados, se expresó según la ecuación 5 en razón a la función Gamma de Euler.

$$\bar{U} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \tag{5}$$

Donde:

$$\Gamma(k) = \int_0^\infty t^{k-1} e^{-t} dt$$

De la quinta ecuación, el valor de la función Gamma resultó 1.1562 que, multiplicado al parámetro de escala, resultó 5.36 m/s como el valor medio de velocidad del viento a 50 metros de altura. A partir de la ecuación 6, se obtiene la potencia del viento por metro cuadrado, siendo esta de 94.5 watts.

$$P = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^3 \tag{6}$$

Entonces, expresado en energía, equivale a 827.7 KWh/año por cada metro cuadrado a una altura de 50 metros sobre el nivel del suelo en la zona de mayor altitud del cerro Cotorumi.

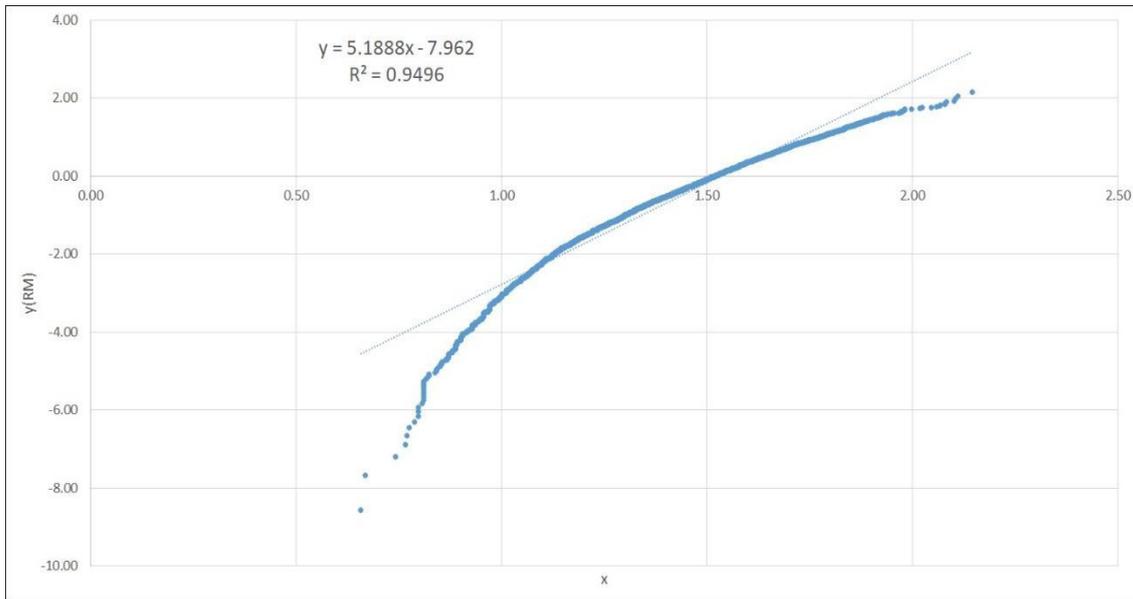
**3.4 Perfil de velocidades del viento**

Para la representación el perfil de velocidad sobre la cresta del cerro Cotorumi se utilizó el modelo logarítmico (ecuación 7), donde *K* es la constante de Von Kármán, *Z*<sub>0</sub> es el parámetro de aspereza del terreno y *h* la altura medida desde el nivel del suelo.

$$U_h = \frac{\bar{U}}{K} \ln\left(\frac{h}{Z_0}\right) \leftrightarrow K = 0.40 \tag{7}$$

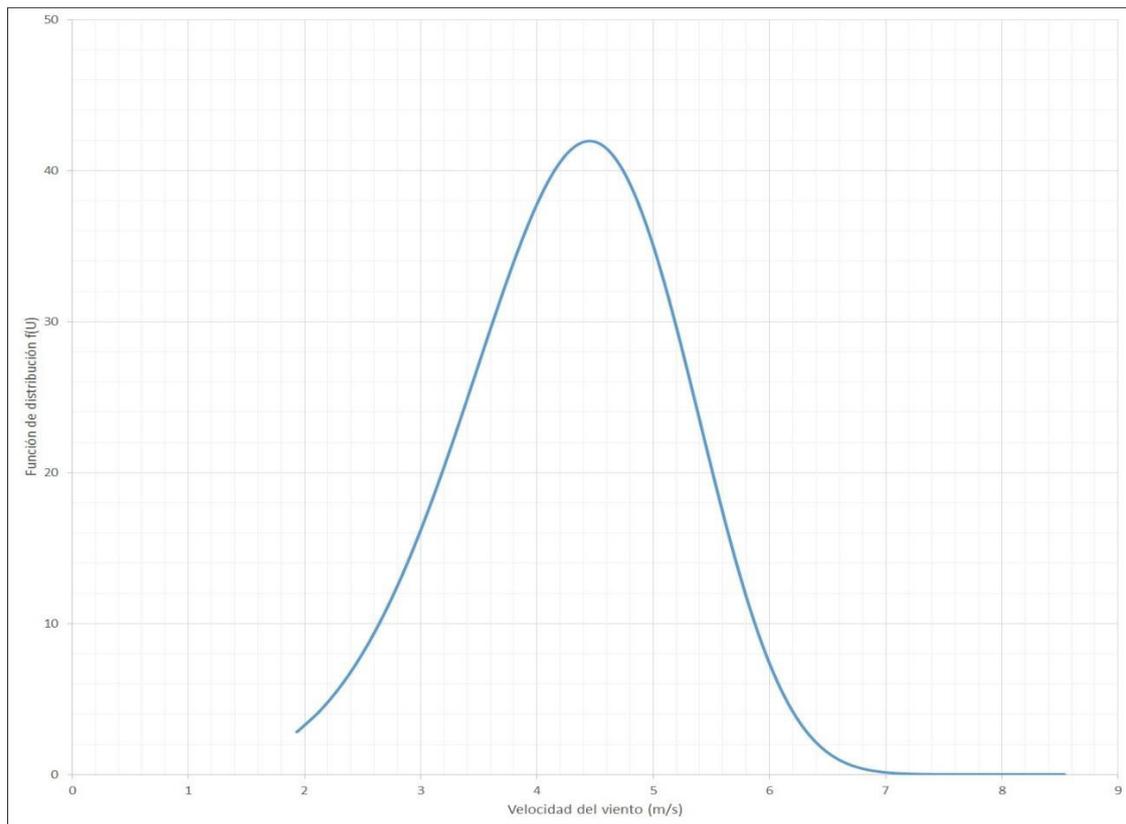
**Figura 5**

*Distribución lineal. Se buscó la ecuación de la línea de tendencia*



**Figura 6**

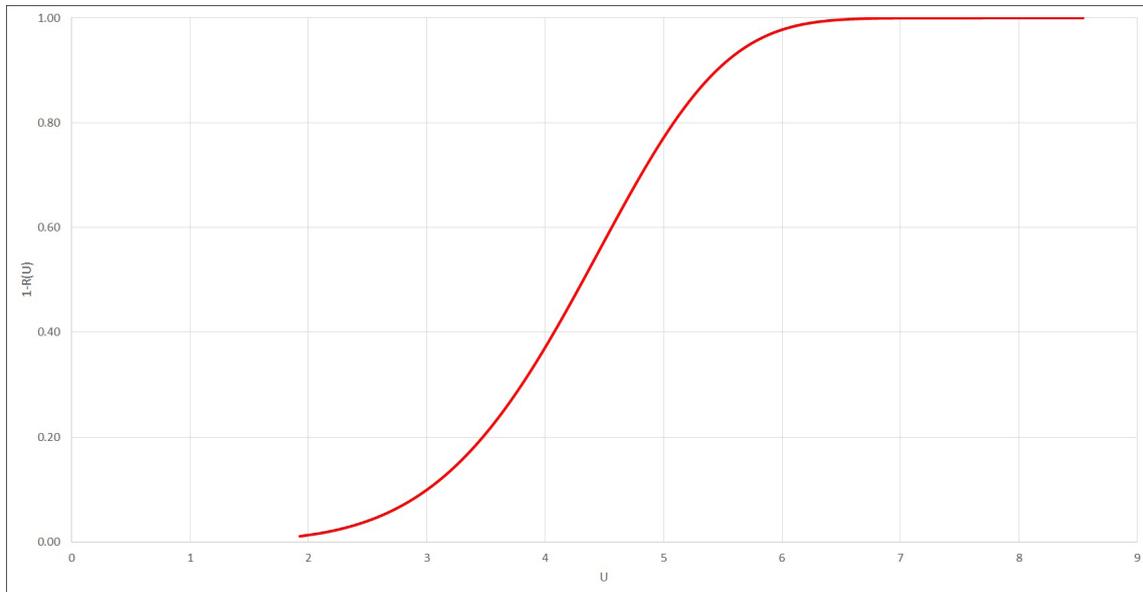
*Función de distribución de Weibull. Según k presenta aproximación a una curva normal*



*Nota:* De la Tabla 2, se grafica  $1-R(U)$  vs  $U$  para obtener la Figura 7 que representa el área bajo la curva de  $f(U)$  y que para un valor de  $U$  existe una probabilidad de no ocurrencia o falla.

**Figura 7**

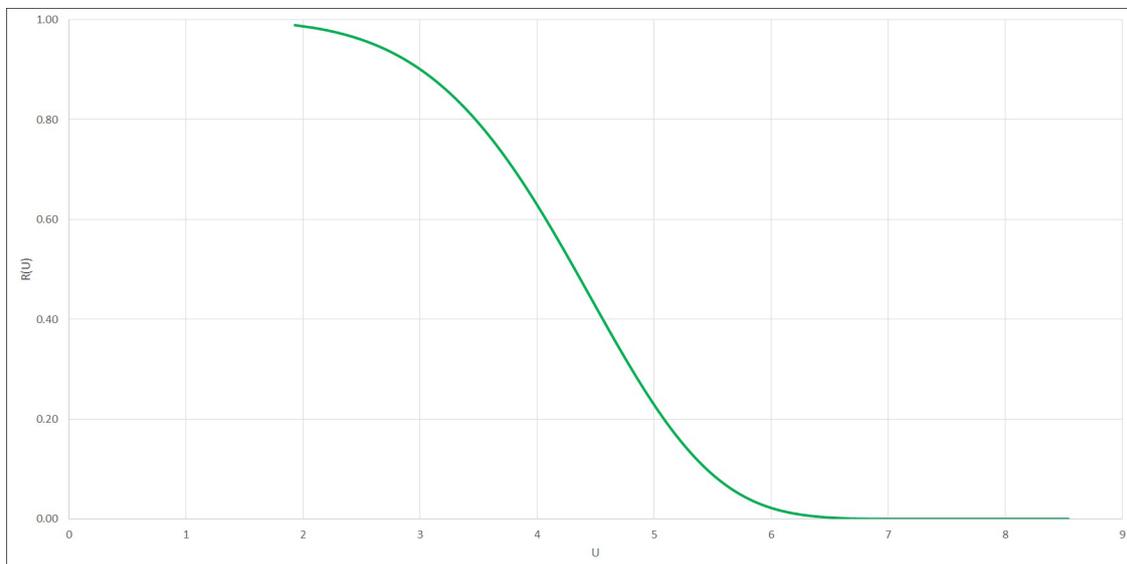
*Función de distribución acumulada inferior. Representa la probabilidad de falla*



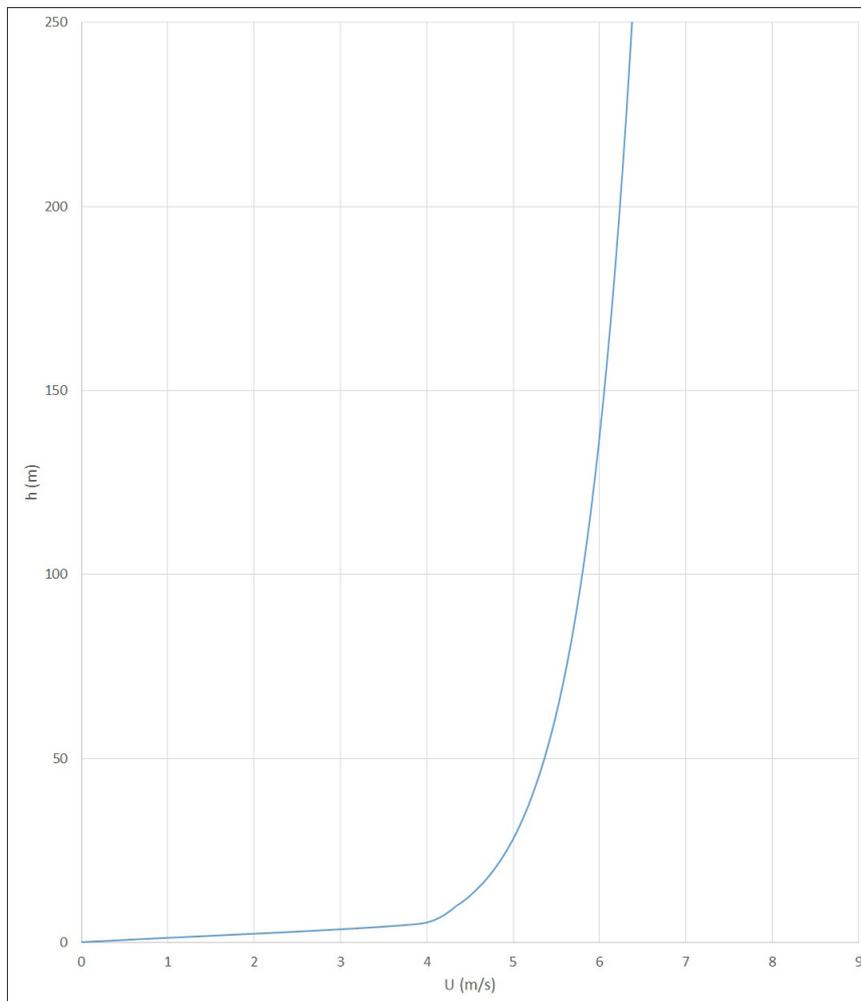
Nota: : De la Tabla 2, se grafica  $R(U)$  vs  $U$  para obtener la Figura 8, mostrando que para un valor de  $U$  existe una probabilidad de que sí ocurra el evento.

**Figura 8**

*Función de distribución acumulada superior. Representa la confiabilidad de ocurrencia*



**Figura 9**  
*Perfil de velocidad en función a la velocidad media del viento a 50 metros*



#### IV. DISCUSIÓN

La actualización de la matriz energética es un tema a priorizar en la política peruana en base a la creación de un marco regulatorio acorde con la necesidad de mitigar la emisión de gases de efecto invernadero. A corto y mediano plazo es necesario apostar por la explotación y uso de gas natural (Ego Aguirre, 2023), que sustente la ejecución de grandes proyectos en visión a la transformación de energía a partir de fuentes no convencionales para el abastecimiento de electricidad a la población.

La participación ciudadana cumple un rol importante si logramos incentivarlos para que consuman energía ecoamigable con el ambiente y podría cumplir tareas generales de mantenimiento con una adecuada capacitación profesional. La electrificación de zonas rurales no necesariamente comprende proyectos de alto presupuesto; existe una amplia gama de dispositivos que aprovechan la energía de fuentes no convencionales (Juanpera et al., 2021).

#### V. CONCLUSIONES

La dirección predominante del viento presente en la cresta del cerro Cotorumi se encuentra entre los  $20^\circ$  y  $75^\circ$ , esta dirección es ortogonal en la mayoría de puntos que representan la zona de mayor altitud de la cresta por lo que, si se instalan más de un aerogenerador, se podría decir que no existirá perturbaciones considerables del viento que se lleguen a generar entre ellas.

Se logró distribuir estadísticamente los datos numéricos de velocidad del viento mediante la distribución de Weibull en el software Excel 2016, obteniéndose el valor de 5.19 para el parámetro de forma; 4.64 para el parámetro de escala y un coeficiente de determinación de 95% que, a partir de esta parametrización, se afirmó una velocidad promedio del viento de 5.36 m/s a una altura de 50 metros sobre el nivel del suelo en la cresta del cerro Cotorumi.

Existe, a 50 metros sobre el nivel del suelo, una probabilidad del 100% de obtener velocidades mayores

a 2 m/s y una probabilidad del 0% de que esto no ocurra (velocidad del viento menor a 2 m/s). La góndola de un aerogenerador horizontal de diámetro mayor a 100 metros se encuentra sobre una torre de altura mayor a 100 metros por lo que, del perfil de velocidades, se valida un promedio de velocidad del viento de 5.8 m/s a esta altura.

El potencial eólico en la cresta del cerro Cotorumi es 94.48 Watts por cada metro cuadrado y el consumo energético promedio para los meses de enero a marzo del 2023 es de 156 949.64 KWh. Entonces, teniendo presente que un aerogenerador comercial de eje horizontal con diámetro mayor a 100 metros posee un valor de coeficiente de potencia entre el 40% y 50%, se valida que es necesario un barrido de 5 767.7 metros cuadrados para cumplir con el consumo energético promedio siendo cubierto fácilmente por un aerogenerador de eje horizontal con diámetro mayor a 100 metros.

## VI. AGRADECIMIENTOS:

Principalmente a Dios por estar presente siempre en mi familia, con mención especial a mis queridos padres Juan Jacobo y María René que han representado la perseverancia en mi vida, a mis abuelitos que siempre los tengo presente en el trajinar de mi existencia y a mis hermanos por su apoyo incondicional.

A la Dra. Nora Malca Casavilca por fomentar la investigación en las aulas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, y a la empresa Electronorte S.A. por su disposición a colaborar y brindar la información requerida a la brevedad

## VII. REFERENCIAS

- Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- Ego Aguirre, M. M. (2023). Energy demand and the role of hydrocarbons in Peru. *Social Sciences and Humanities Open*, 8(1), 100519. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2023.100519>
- Electronorte S.A. (2023). Consumo de energía eléctrica de servicio público, distrito de Santa Cruz, por mes, ene.-mar.2023 (kwh).
- Google. (2023). Google Earth. Google. <https://earth.google.com/web/@-6.63170628,-78.95056727,2094.36930825a,8941.37492091d,35y,0h,0t,0r>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2022). Compendio Estadístico, Cajamarca 2022. <https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/4132216-compendio-estadistico-cajamarca-2022>
- Juanpera, M., Domenech, B., Ferrer-Martí, L., Garzón, A., & Pastor, R. (2021). Renewable-based electrification for remote locations. Does short-term success endure over time? A case study in Peru. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111177>
- La Junta Militar de Gobierno. (1950). Creó la provincia de Santa Cruz, en el departamento de Cajamarca, cuya capital es

la ciudad de Santa Cruz de Succhabamba. -- Elevando a la categoría de distritos a los caseríos de Catache, Pulan, Ninabamba y Yauyucán, de la misma provincia. - - Deroga. <https://spij.minjus.gob.pe/spij-ext-web/detallenorma/H701058>

Ministerio de Energía y Minas. (2016). Atlas eólico del Perú. Ministerio de Energía y Minas, 1–262. [https://www.minem.gob.pe/\\_publicacion.php?idSector=6&idPublicacion=537](https://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=6&idPublicacion=537)

## Conflictos de intereses

El autor declara no tener conflictos de interes