

# Simulación CFD de una superficie colindante a la Minera Yanacocha

Juan Deini Carrasco Díaz  
Nora Rosa Concepcion Malca Casavilca  
Douglas Donal Sarango Julca  
Luis Miguel Soto Juscamayta  
Juan Jacobo Carrasco Vega



# **SIMULACIÓN CFD DE UNA SUPERFICIE COLINDANTE A LA MINERA YANACOCHA**

## **AUTORES**

Juan Deini Carrasco Díaz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8000-6044>

Nora Rosa Concepcion Malca Casavilca

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2625-9008>

Douglas Donal Sarango Julca

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7963-1507>

Luis Miguel Soto Juscamayta

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7861-8296>

Juan Jacobo Carrasco Vega

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4379-1362>

Copyright © 2025

Juan Deini Carrasco Díaz

Nora Rosa Concepcion Malca Casavilca

Douglas Donal Sarango Julca

Luis Miguel Soto Juscamayta

Juan Jacobo Carrasco Vega

Todos los derechos reservados.

ISBN: 978-9942-696-08-3

La presente obra fue revisada por 2 pares académicos externos ciegos conforme al proceso editorial del Centro de Investigación Latinoamericano para el Desarrollo e Innovación CILADI.

Los rigurosos procedimientos editoriales de CILADI garantizan la selección de manuscritos por sus aportes significativos al conocimiento y cualidades científicas. Todas las obras publicadas por CILADI cuentan con ISBN y se encuentran disponibles en la web ([www.ciladi.org](http://www.ciladi.org))



Centro de Investigación Latinoamericano  
para el Desarrollo e Innovación  
Guayaquil- Ecuador  
<https://ciladi.org/>

# PRÓLOGO

El presente libro se erige como una aportación significativa a la literatura académica y técnica dedicada al aprovechamiento sostenible de los recursos naturales en entornos de alta complejidad geográfica y operativa. La investigación aborda con rigor metodológico la simulación computacional del comportamiento del viento en una zona colindante a una de las principales operaciones mineras del Perú, proponiendo una alternativa energética que armoniza la eficiencia industrial con el respeto al medio ambiente. En una coyuntura donde la transición energética constituye una prioridad global, este tipo de estudios resultan fundamentales para fundamentar decisiones basadas en evidencia.

Uno de los aportes más relevantes de esta obra es la integración de herramientas de modelado tridimensional, cartografía digital y dinámica de fluidos computacional (CFD) para evaluar el potencial eólico en zonas andinas, tradicionalmente marginadas en los mapas de inversión energética. Esta aproximación permite no solo validar escenarios teóricos, sino también proponer soluciones concretas que pueden ser implementadas por actores tanto públicos como privados, en especial en el sector minero. La claridad con la que se articulan conceptos técnicos, contextos ambientales y resultados de simulación, hacen del texto una referencia valiosa para investigadores, ingenieros y planificadores energéticos.

**PhD. Antonio Poveda G.**

**Editor**

## **RESUMEN**

Este libro presenta un estudio riguroso sobre el potencial eólico en una zona colindante a la mina Yanacocha, empleando técnicas avanzadas de simulación CFD y modelado topográfico digital. A través del uso de herramientas como ArcGIS, Google Earth, Civil 3D y RWIND, se construye un sólido geográfico detallado para evaluar el comportamiento del viento y su aprovechamiento energético. La investigación busca demostrar la viabilidad de implementar soluciones energéticas renovables en el contexto minero, atendiendo tanto criterios técnicos como ambientales y estratégicos.

La publicación se inscribe dentro de un marco de creciente interés por las energías renovables en América Latina, y resalta la necesidad de conjugar el desarrollo tecnológico con una ética de responsabilidad socioambiental. En tal sentido, esta investigación no solo ofrece resultados cuantificables, sino que también plantea un modelo replicable para otras regiones y sectores. Su contribución se extiende así más allá del caso particular estudiado, convirtiéndose en un ejemplo de cómo la ciencia aplicada puede ser motor de innovación y sostenibilidad territorial.

# Índice general

CAPÍTULO 1: VISIÓN GENERAL.....	1
CAPÍTULO 2: REFERENTES TEÓRICOS .....	6
2.1. Cuenca hidrográfica.....	7
2.2. Vertientes hidrográficas del Perú.....	9
2.3. Unidades mineras del Perú.....	12
2.4. Viento .....	15
2.5. Influencia de los obstáculos .....	18
2.6. Ecuación Navier-Stokes para la simulación mediante CFD .....	19
CAPÍTULO 3: RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	22
3.1. Del emplazamiento y la dirección del viento .....	22
3.1.1. Irregularidad del terreno .....	22
3.1.2. Dirección del viento.....	26
3.2. De la Energía Cinética.....	27
3.2.1. Distribución estadística.....	27
3.2.2. Perfil de velocidad del viento .....	33
3.2.3. Potencial eólico.....	35
3.3. Diseño a escala de la minera Yanacocha.....	36
3.3.1. Curvas de nivel usando Google Earth Pro .....	36
3.3.2. Curvas de nivel usando ArcGIS 10.8.....	38
3.3.3. Generación del sólido en Civil 3D.....	40
3.4. Simulación del sólido mediante CFD .....	40

3.4.1. Parámetros de simulación .....	41
3.4.2. Proceso de simulación.....	43
3.5. Análisis e Interpretación .....	50
3.5.1. Análisis del estudio de emplazamiento .....	50
3.5.2. Análisis del estudio de potencial eólico .....	51
3.5.3. Análisis del proceso de diseño .....	52
3.5.4. Análisis del proceso de simulación .....	53
3.6. Evaluación crítica de los resultados .....	54
CONCLUSIONES .....	56
RECOMENDACIONES .....	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	60
ANEXOS .....	64

## **CAPÍTULO 1: Visión General**

El cambio climático es consecuencia del actuar irresponsable del hombre el cual está originando el despliegue científico para poder paliar esta debacle universal que a la larga traería consecuencias nefastas a la humanidad. La actualización de la matriz energética nacional merece principal preocupación por las autoridades gubernamentales para la apuesta por la explotación de recursos no convencionales de energía, solo de esta manera se podrá aportar al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que velan por una mejor calidad de vida y conservación del ambiente.

Actualmente los gobiernos se centran principalmente en la mitigación y no en la prevención por lo que es necesario el estudio de proyectos que caractericen posibles zonas en las que se pueda aprovechar recursos renovables. En Egipto, se realizó el estudio de potencial eólico en el que se verificó que la ciudad de Ras El-Hekma presenta un alto potencial eólico respecto a las ciudades contiguas a esta (Farafra, Nuweba y Aswan); y la principal dificultad vendría a ser el costo que significaría la instalación de un parque eólico en función de la altura del buje del aerogenerador (Alham, 2022). La actualización de la matriz energética de cada país hacia un consumo de energía a partir de fuentes con convencionales depende de este tipo de investigaciones que brinde alternativas que sean amigables con el medio ambiente.

La energía eólica esta disponible para todos nosotros y la manera en como aprovecharla se limita por el costo que resultaría implementar un dispositivo que convierta la energía eólica en energía eléctrica, es por tal motivo que se buscan

propuestas de costos bajos para que resulte accesible para una familia. En República Dominicana, Vallejo Díaz et al. (2022) proponen la implementación de sistemas de energías de baja potencia en sitios urbanos destacando el aprovechamiento de la energía eólica que existe en los techos de edificios, la metodología se aplicó en un total de 275 edificios de las ciudades de San Cristóbal y Santo Domingo dando como resultado la producción de energía anual de 317 MWh pero la mencionada propuesta resultaría difícil de implementar si no hubiese un estudio de prefactibilidad previo y concientización en la población por lo que es necesario programas que instruyan a la sociedad sobre la importancia de invertir en la utilización del potencial eólico existente.

Los procesos burocráticos exponen una preocupante realidad referente a la ejecución de proyectos ecoamigables con el ambiente, en Lima, en el distrito de Huacho, la empresa WINDX obtuvo la concesión temporal para llevar a cabo el estudio de factibilidad respecto a la propuesta del parque eólico Huacho Sur que se espera que tenga una capacidad de 168MW pero se ve afectada por las distintas demoras en el proceso burocrático al que este proyecto se expone (Gestión, 2022). Entonces, el estudio de factibilidad de un proyecto afianzaba la viabilidad de este mismo pero es detenida por el tiempo en el que este suele pasar para su aprobación. La eficiencia de cada organismo del estado es cuestionable en lo que respecta al tiempo de proceso de evaluación y aprobación de proyectos que aerogeneración.

El presupuesto nacional destinado a la inversión en proyectos de electrificación renovable es confuso e indefinido. En Cajamarca, en los distritos de Alto Perú, Campo Alegre, Chorro Blanco, Morowisha, Pucará y Suro Antivo; se realizó proyectos de

electrificación renovable por microrredes que tuvo que ser impulsado por la participación ciudadana en base a las dimensiones técnicas, sociales, económicas y ambientales de los objetivos de sostenibilidad confirmando que este tipo de proyectos son viables en las zonas rurales por la facilidad de instalación y la aceptación por parte de la población ante este tipo de propuestas que tendrían que ser principalmente impulsados por el gobierno (Juanpera et al., 2021). El principal impulso hacia el consumo de energías limpias depende del apoyo de las comunidades y la facilidad de adaptabilidad que estas presentan hacia este cambio en donde el principal impulsador deberían ser los gobiernos regionales y locales, pero actualmente no se evidencia una buena comunicación entre estas entidades edilicias.

Los parques eólicos instalados actualmente necesitan estar en constante evaluación para propuestas de mejoras o ampliaciones. En la provincia de Chota, perteneciente al departamento de Cajamarca, se ejecutó el proyecto eólico Duna y Huambos conformado por aerogeneradores de eje horizontal que a las condiciones evaluadas en la zona generan 36 megavatios de energía eléctrica al sistema interconectado que a su vez, deberían ser evaluados en un periodo definido para establecer la existencia de modificaciones en su eficiencia y la evaluación continua del estado estructural para garantizar la inversión de 54 millones de dólares que costó el proyecto (El Peruano, 2021).

Con el fin de aplicar el razonamiento crítico para el desarrollo de tecnologías amigables al medio ambiente, esta investigación buscará validar el potencial eólico en la cuenca de la mina Yanacocha, que evaluado mediante simulación computacional en base a análisis analíticos de los diferentes factores geográficos que intervienen, se verá

el comportamiento del aire en la cuenca mencionada y las principales zonas con altas velocidades de viento que se relaciona directamente a un alto potencial eólico presente.

Este estudio no solo se justifica desde una perspectiva ambiental y social, sino también desde un punto de vista económico y estratégico. La adopción de esta iniciativa por parte de la empresa minera no solo reflejará su compromiso con la sostenibilidad, también fortalecerá su posición en el mercado como líder en prácticas ambientalmente responsables y sentará las bases para un futuro más limpio y sostenible tanto para la industria como para las comunidades en las que opera. Un estudio de potencial eólico dentro de una minera representa una oportunidad única para innovar y liderar en el sector, La energía eólica no solo ofrece una alternativa limpia y renovable a las fuentes de energía convencionales, sino que también puede brindar una solución económica y eficiente para las operaciones mineras. La ubicación geográfica de muchas minas proporciona condiciones ideales para la generación de energía eólica, con vientos consistentes y fuertes que pueden ser aprovechados para alimentar las operaciones mineras de manera sostenible. Además de reducir las emisiones de carbono y disminuir la dependencia de fuentes de energía no renovables, la implementación de energía eólica en una mina puede ofrecer beneficios adicionales, como la reducción de costos a largo plazo, la diversificación de la cartera energética y una mayor resiliencia ante fluctuaciones en los precios de los combustibles fósiles.

También, la investigación está justificada a través de los siguientes considerandos: Se pondrá en evidencia la ley de conservación de masa, la ley de Betz, distribución de Weibull y conceptos importantes en la simulación del comportamiento del viento basadas en las ecuaciones de Navier-Stokes. De acuerdo al desenlace de la

investigación se tendrá noción del porcentaje a cubrir del consumo energético de la mina Yanacocha y de las localidades contiguas y de esa manera generar mayor concientización hacia el consumo de energía limpia tanto por el lado de la mina Yanacocha como en la población colindante. Según los resultados que se obtendrá, se propondrá alternativas de solución para el aprovechamiento de la energía eólica y poner en conocimiento a la minera Yanacocha para su evaluación, lo que incentivará el uso de energía a partir de fuentes no convencionales. Los resultados obtenidos también serán de importancia para pequeñas comunidades aledañas a la cuenca. Además, El presente trabajo es de importancia para la incentivación de la minera Yanacocha para el desarrollo de proyectos que ayuden a cambiar de manera gradual la fuente de abastecimiento de energía eléctrica con el uso de aerogeneradores, y así contribuir a disminuir la huella de carbono, favoreciendo un mejor cuidado del medio ambiente. Entonces, con el presente trabajo se busca en la comunidad científica y universidades mayor investigación para nuevas propuestas de dispositivos que puedan generar energía a partir de fuentes renovables en zonas específicas y delimitadas. Evidenciar económicamente que para el estudio del potencial eólico en una zona no se necesita un alto presupuesto, pero si un nivel destacable en el uso de softwares referentes al proceso.

## **CAPÍTULO 2: Referentes Teóricos**

Es necesario adoptar principios éticos ambientalistas frente a los preocupantes cambios que viene sufriendo la naturaleza ante el incontenible desarrollo social, económico y cultural del ser humano. Taylor (1986) resalta dos posturas ambientales principales; las antropocéntricas y las no antropocéntricas, estas son dos grandes ramas que define el comportamiento humano con su entorno: En las teorías antropocéntricas, solo se le brinda un valor moral propio a la comodidad humana y el resto solo posee un valor instrumental. En las teorías no antropocéntricas se incluye, además del bienestar del hombre, el bienestar de los seres y entidades no humanas como los animales, ecosistemas, etc. Por lo que se establece la evaluación moral del comportamiento del hombre con la naturaleza, a su vez, las éticas ambientales no antropocéntricas se dividen resaltantemente en la defensa inexorable de la ecología, del otro extremo la defensa de las vivencias sensibles de los seres vivos y entre ambas se tiene a los biocentristas.

Taylor (1986) destaca las éticas ambientales no antropocéntricas, entre las teorías éticas que abordan temas del comportamiento entre el ser humano y el medio ambiente. Desde esta forma de pensar, tanto los seres humanos y los ecosistemas con sus complejos sistemas, se someten a una evaluación moral sin colocar a alguno en una postura privilegiada.

Además, Naess et al. (2008) proponen desarrollar la admiración hacia la naturaleza en las distintas instituciones educativas, principalmente en la enseñanza infantil. La admiración hacia la naturaleza genera una moral proteccionista en el

individuo y así poder expresar su curiosidad con respeto al ambiente. El consumo de energía no convencional también supone un impacto en el ecosistema, pero no es muy significativo en comparación a los demás recursos explotados puesto que, el área de instalación de un aerogenerador es pequeño comparado al área de barrido que posee para la generación de energía. Los proyectos de aerogeneración tienen que ser ejecutados con respeto al ecosistema y a las poblaciones colindantes, exigiendo cooperación en el ámbito social para la comprensión ciudadana del impacto local que puede suponer el proyecto y la preocupación por desarrollar la admiración hacia el entorno natural de cada individuo involucrado.

Igualmente, Rozzi (2014) establece la ética biocultural relacionada en los hábitats y los hábitos, sin tratar de obstaculizar el desarrollo humano en todos los ámbitos siempre y cuando sea responsable. Los hábitos se sustentan en el autocontrol racional de un individuo en las ejecuciones de sus acciones que este realice y modifique su entorno, está ligado directamente con la preservación de los hábitats ocupados.

## **2.1. Cuenca hidrográfica**

De acuerdo con Chereque Morán (2010), una cuenca hidrográfica representa un área superficial en donde el agua que cae por precipitación tiende a confluir en un punto de esta, formadas por el proceso de erosión de miles de años, se caracterizan por tres zonas principales: Cuenca alta, que presenta las más altas cotas de nivel por lo que generalmente son áreas montañosas; cuenca media, en donde el río principal tiene un

curso más regular y de terreno con pendiente suave; y cuenca baja, en donde el río principal desemboca. En la Figura 1 se puede visualizar lo mencionado.

**Figura 1:** Partes de una Cuenca Hidrográfica



*Fuente.* El gráfico evidencia el cambio de pendiente que es el principal factor para que exista esta división. Tomado del *Manual de Manejo de Cuencas* (p.19) , por World Vision, 2014, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

En los límites de una cuenca suele existir vientos con altas velocidades por no haber grandes obstáculos a grandes distancias, esto es más visible en la zona de cuenca alta en las laderas, por lo que el estudio del potencial eólico resalta estas zonas para futuros proyectos de aerogeneración, el desafío es su difícil accesibilidad en tramos.

***División de la cuenca hidrográfica:*** Una cuenca hidrográfica puede ser dividida por los afluentes a su río principal, a su vez, cada uno de estos pueden representar microcuencas tal y como se muestra en la Figura 2.

**Figura 2:** División de una Cuenca Hidrográfica



*Fuente.* El gráfico evidencia el cambio de pendiente que es el principal factor para que exista esta división. Tomado del *Manual de Manejo de Cuencas* (p.20) , por World Vision, 2014, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Existe un orden que puede representar un río en una cuenca, este se representa por número naturales enteros, en donde los números más cercanos a 1 simbolizan a los ríos de menor orden, mientras que los números más alejados del 1 representan los ríos de mayor orden. Los ríos de menor orden suelen ser los ríos principales de las microcuencas y de forma antagónica el de mayor orden puede representar el río principal de la cuenca (World Vision, 2014).

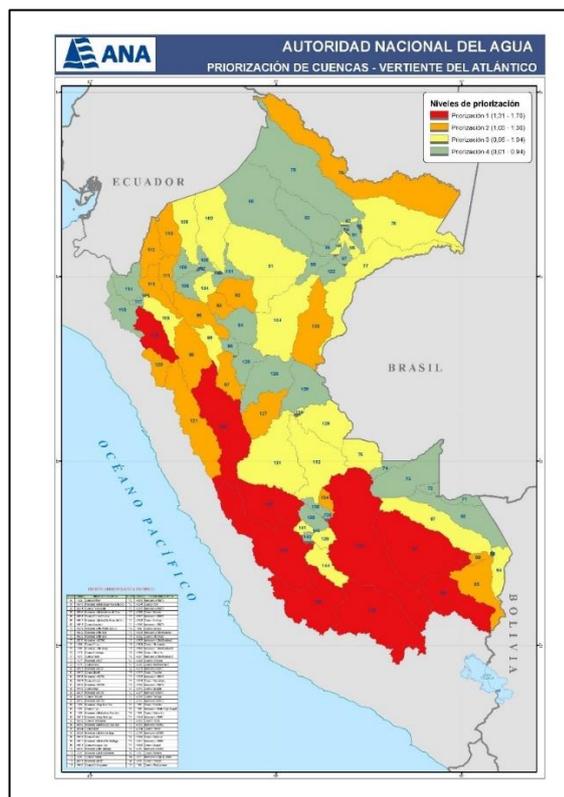
## **2.2. Vertientes hidrográficas del Perú**

De acuerdo con la Autoridad Nacional del Agua (2016) en el Perú existen tres grandes vertientes que son caracterizadas según hacia qué océano (si los ríos formados son exorreicos) o laguna (si los ríos formados son endorreicos) se drena el agua en las cuencas hidrográficas, estas vertientes serían: La vertiente del Atlántico, la vertiente

del Pacífico y la vertiente del Titicaca. Los nombres establecidos se basaron según el destino que tienen los ríos formados por la precipitación.

**Vertiente del Atlántico:** Esta vertiente drena las aguas de los ríos formados en las cuencas en sentido hacia el oriente, abarcando la selva y la sierra oriental. En la Figura 3 se muestra el mapa de priorización de cuencas de esta vertiente según Autoridad Nacional del Agua (2016) en donde se encuentran 44 cuencas hidrográficas y 40 intercuenas abarcando un gran porcentaje del territorio nacional.

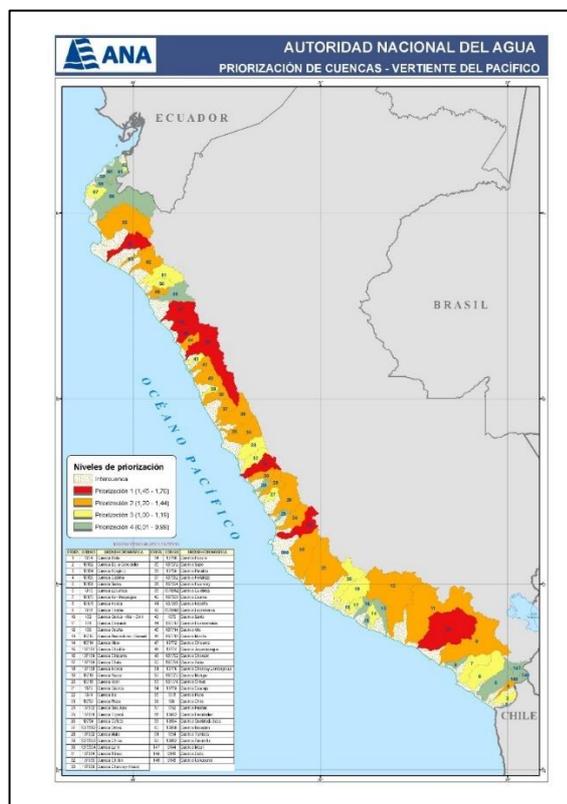
**Figura 3:** Mapa de priorización de cuencas de la vertiente del Atlántico



*Fuente.* El gráfico muestra el mapa de los ítems que representan las cuencas hidrográficas de la vertiente del Atlántico. Tomado de la *Colección de Mapas y Planos* (p.1), por la Autoridad Nacional del Agua, 2016, Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.

**Vertiente del Pacífico:** Representa lo antagónico a la vertiente del Atlántico porque esta vertiente drena las aguas hacia el océano pacífico, abarca las costa y sierra occidental. Según Autoridad Nacional del Agua (2016) si se hace un análisis más específico, se encontrarían 65 cuencas hidrográficas formando esta vertiente como se muestra en la Figura 4.

**Figura 4:** Mapa de priorización de cuencas de la vertiente del Pacífico

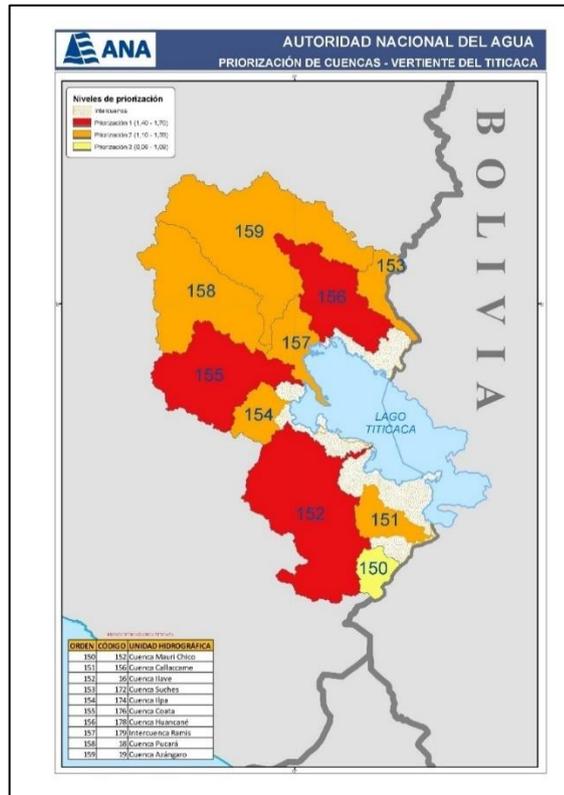


*Fuente.* El gráfico muestra el mapa de los ítems que representan las cuencas hidrográficas de la vertiente del Pacífico. Tomado de la *Colección de Mapas y Planos* (p.1), por la Autoridad Nacional del Agua, 2016, Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.

**Vertiente del Titicaca:** Es la vertiente más pequeña ocupando un pequeño sector del territorio nacional, las aguas de sus ríos desembocan en el lago Titicaca. En

la Figura 5 se revela que está conformada por 9 cuencas y una intercuenca (Autoridad Nacional del Agua, 2016).

**Figura 5:** Mapa de priorización de cuencas de la vertiente del Titicaca



*Fuente.* El gráfico muestra el mapa de los ítems que representan las cuencas hidrográficas de la vertiente del Titicaca. Tomado de la *Colección de Mapas y Planos* (p.1), por la Autoridad Nacional del Agua, 2016, Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.

### 2.3. Unidades mineras del Perú

En el Perú, alrededor del 14% del Producto Bruto Interno (PBI) nacional está representado por la actividad minera. Para que el proceso de extracción funcione correctamente, las operadoras necesitan un alto consumo de energía eléctrica

(OSINERGMIN, 2019). En la Figura 6 muestra el mapa de: Concesiones minera, que ocupan 14 891 470 hectáreas representando un 11.62% de la superficie nacional; Unidades en producción, que ocupa 891 367 hectáreas representando un 0.89% de la superficie nacional; y Proyectos en exploración, que ocupa 813 626 hectáreas representando un 0.63% de la superficie nacional.

**Figura 6:** Mapa minero del Perú

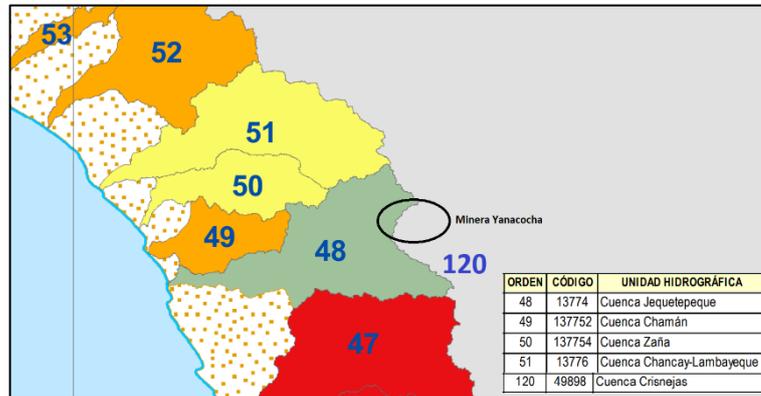


Fuente. El gráfico muestra el mapa minero del 2010. Tomado del MAPA MINERO 2010 - Unidades mineras en producción y proyectos de exploración (p.1), por el Ministerio de Energía y Minas, 2010, Ministerio de Energía y Minas.

De lo expuesto se resalta la mina Yanacocha que se encuentra en el norte de la provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca. Geográficamente, también se

encuentra dentro de la vertiente del pacífico, en el límite de las cuencas Jequetepeque y Crisnejas, específicamente en cabecera de cuenca como se muestra en la Figura 7.

**Figura 7:** *Minera Yanacocha en la vertiente del Pacífico*



En la Figura 8 muestra la vista de la mina Yanacocha con el uso de Google Earth, se puede divisar la cresta de las cuencas Jequetepeque y Crisnejas, desarrollándose en sentido este y oeste siendo muy visible por ser una zona boscosa y verdosa.

**Figura 8:** *Mina Yanacocha por Google Earth*

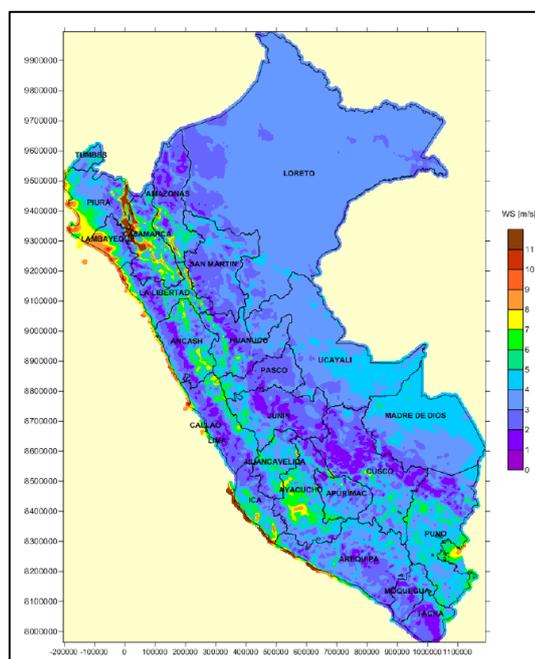


*Fuente.* La figura representa el entorno geográfico de la minera Yanacocha. Tomado de *Google Earth* (p.1), por Google,(2023).

## 2.4. Viento

La tropósfera es la capa que limita con la superficie terrestre y consta con una altura de diez kilómetros (10 km) en donde ocurren los fenómenos meteorológicos como la lluvia, vientos, formación de nubes, etc. El movimiento del aire se produce por la existencia de diferenciales de presión, y estos a su vez son perturbaciones de diferencia de temperaturas a consecuencia de la radiación solar, a gran escala se toma como referencia a la diferencia de temperaturas entre el ecuador y los polos de la tierra (Ministerio de Energía y Minas, 2016). En la Figura 9 se pone en evidencia la presencia de altas velocidades de viento a 100 metros del suelo en la región de Cajamarca.

**Figura 9:** Mapa de velocidad media del viento



*Fuente.* El gráfico muestra el mapa de velocidades del territorio del Perú. Tomado del *Atlas Eólico del Perú* (p.54), por el Ministerio de Energía y Minas, 2016, Vortex.

**Ley de Betz:** Se centra en cuantificar la potencia que puede ser posible extraer del viento a partir de diferentes dispositivos por lo que Betz (1920) menciona que:

Debe haber un cambio de velocidad del viento de aguas arriba a aguas abajo para extraer energía del viento, de hecho, frenándolo. Si no se produce ningún cambio en la velocidad del viento, no se extrae energía del viento. Ninguna máquina de viento puede llevar el aire al reposo total y, para una máquina giratoria, siempre habrá algo de flujo de aire a su alrededor. Por lo tanto, una máquina de viento solo puede extraer una fracción de la energía cinética del viento. La velocidad del viento en los rotores a la que la extracción de energía es máxima tiene una magnitud entre las velocidades del viento aguas arriba y aguas abajo (p.130).

De forma numérica se puede expresar con la Ecuación 1, en donde P representa la potencia del viento incidente sobre el rotor,  $C_p$  representa el coeficiente de potencia del dispositivo,  $\rho$  representa la densidad del viento, A representa el área barrida por el dispositivo y V representa la velocidad del viento sin perturbación.

$$P = C_p \left( \frac{1}{2} \rho A V^3 \right) \quad (1)$$

**Distribución de Weibull:** Es un método estadístico muy utilizada para que, a partir de una lista de datos numéricos de la velocidad del viento tomadas en campo, se pueda tener un porcentaje de certeza de que exista la ocurrencia de una velocidad determinada de viento a cierta altura del suelo, y de este modo conocer el potencial eólico (Ministerio de Energía y Minas, 2016). La Ecuación 2 representa analíticamente

lo mencionado, donde  $P(U)$  representa la probabilidad de que ocurra que la velocidad del viento sea  $U$ , “ $c$ ” representa el parámetro de escala y “ $k$ ” representa el parámetro de forma.

$$P(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

De la expresión anterior se deduce la que se muestra en la Ecuación 3, que representa la probabilidad de que existan velocidades mayores respecto a una velocidad establecida  $U_x$ .

$$P(U_x \leq U) = \exp\left[-\left(\frac{U_x}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

La velocidad media ( $\bar{U}$ ) se calcula mediante la expresión de la Ecuación 4 con el uso de la función Gamma de Euler ( $\Gamma$ ).

$$\bar{U} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4)$$

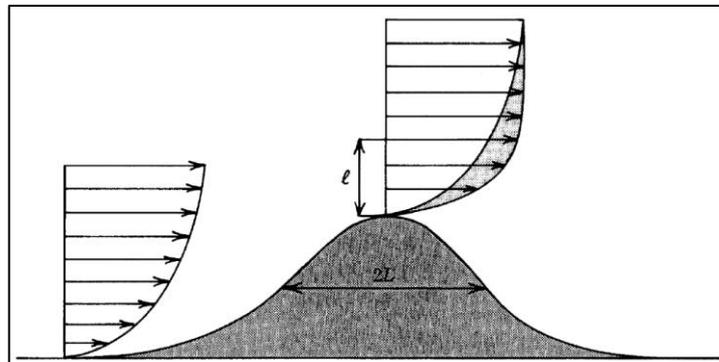
De igual manera para la distribución estándar según la Ecuación 5.

$$\sigma^2 = c^2 \cdot \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right] \quad (5)$$

## 2.5. Influencia de los obstáculos

Según Cucó Pardillos (2017) afirma que existen diferentes obstáculos que alteran el recorrido de las líneas de corriente del viento generando diferentes efectos como el efecto de una casa aislada y efecto de edificio en bloque en zonas urbanas. Además, Troen & Lundtang Petersen (1990) adiciona el efecto de un desfiladero y el de una colina ideal, cada uno con parámetros que los caracterizan; De los efectos mencionados, el efecto de una colina ideal se acerca más a la realidad que se presenta en la cuenca de la Minera Yanacocha, este efecto se puede evidenciar en la Figura 10, en donde existe una relación entre la rugosidad del terreno ( $z_o$ ), la longitud característica de la colina ( $2L$ ) y la altura de codo del perfil de velocidades en la cima (1).

**Figura 10:** Efecto de una colina ideal



*Fuente.* El gráfico muestra la zona ideal para la instalación de un aerogenerador. Tomado de *El Atlas Eólico Europeo* (p.50), por Troen & Lundtang Petersen, (1990), Risø National Laboratory.

La Ecuación 6 muestra la relación de las variables presentes en este modelo, esta fórmula tiene mayor aceptación si la dimensión de la colina, perpendicular a la longitud característica de esta ( $2L$ ), es mucho mayor que  $L$ .

$$l \cong 0.3z_0 \left(\frac{L}{z_0}\right)^{0.67} \quad (6)$$

## 2.6. Ecuación Navier-Stokes para la simulación mediante CFD

Frei (2017) hace mención a las ecuaciones modificadas basadas en las ecuaciones de la continuidad y Navier-Stokes como se muestra en la Ecuación 7, estas ecuaciones intentan describir el comportamiento del fluido en un volumen de control determinado.

$$\begin{cases} \rho \frac{dk}{dt} + \rho u \cdot \nabla k = P - \rho \beta_0^* k \omega + \nabla \cdot ((\mu + \sigma_k \mu_T) \nabla k) \\ \rho \frac{d\omega}{dt} + \rho u \cdot \nabla \omega = \frac{\rho Y}{\mu_T} - \rho \beta \omega^2 + \nabla \cdot ((\mu + \sigma_\omega \mu_T) \nabla \omega) + 2(1 - f_{v1}) \frac{\rho \sigma_\omega \omega^2}{\omega} \nabla \omega \cdot \nabla k \end{cases} \quad (7)$$

En donde  $P$  se define como:

$$P = \min(P_k, 10\rho\beta_0^*k\omega)$$

En donde  $P_k$  se define como:

$$P_k = \mu_T \left( \nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u)^2 \right) - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot u$$

En donde la viscosidad turbulenta ( $\mu_T$ ) se define como:

$$\mu_T = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1, S f_{v2})}$$

En donde la magnitud característica de los gradientes medios de velocidad (S) se define como:

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

En donde las constantes del modelo se definen mediante la interpolación de los valores internos y externos apropiados y se define como:

$$\begin{cases} \phi = f_{v1}\phi_1 + (1 - f_{v1})\phi_2 \\ \phi = \beta, \gamma, \sigma_k, \sigma_\omega \end{cases}$$

Y las funciones de interpolación ( $f_{v1}; f_{v2}$ ) se definen como:

$$\begin{cases} f_{v1} = \tanh(\theta_1^4) \\ \theta_1 = \min \left[ \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta_0^* \omega l_w}, \frac{500\mu}{\rho \omega l_w^2} \right), \frac{4\rho\sigma_\omega k}{CD_{k\omega} l_w^2} \right] \\ CD_{k\omega} = \max \left( \frac{2\rho\sigma_\omega \nabla \omega \cdot \nabla k}{\omega}, 10^{-10} \right) \\ f_{v2} = \tanh(\theta_2^2) \\ \theta_2 = \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta_0^* \omega l_w}, \frac{500\mu}{\rho \omega l_w^2} \right) \end{cases}$$

Además,  $l_w$  representa la distancia a la pared más cercana.

La identificación preliminar del fluido, entre otros parámetros, se realiza en base al número de Mach: El número de Mach (M) se puede representar según la Ecuación 8, depende de la razón que existe entre la velocidad de un objeto (U) y de la velocidad del sonido (C), siendo el resultado obtenido un valor adimensional que caracteriza el flujo, siendo incompresible si es menor a 0.3, subsónico si el valor se encuentra entre 0.7 y 1.2, supersónico de encontrarse entre 1.2 y 5, e hipersónico si es mayor a 5 (Del Río Sánchez, 2017).

$$M = \frac{U}{C} \tag{8}$$

## CAPÍTULO 3: Resultados Experimentales

### 3.1. Del emplazamiento y la dirección del viento

#### 3.1.1. Irregularidad del terreno

La accidentalidad del terreno se ha definido según Troen & Lundtang Petersen (1990) como se muestra en la Tabla 1, en donde  $z_0$  es el parámetro de irregularidad definido según la presencia de obstáculos y subdividido en clases.

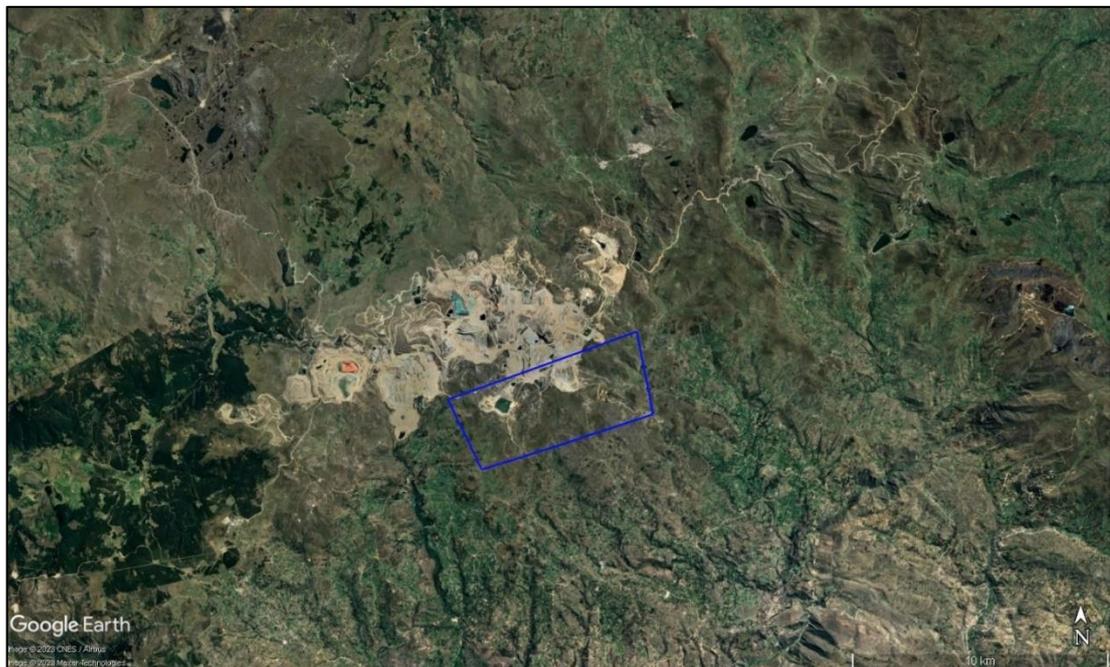
**Tabla 1:** *Parámetro de irregularidad*

$z_0$ (m)	Características superficiales del terreno	Clase
1.00	ciudad bosque	
0.50	suburbios	
0.30	zonas resguardantes	3
0.20	muchos árboles y/o arbustos	
0.10	campos de apariencia cerrada	2
0.05	campos de apariencia abierta	
0.03	campos con muchos edificios, árboles etc. zonas de aeropuertos con árboles y edificios	1
0.01	zonas lejos de aeropuertos césped segado	
$5 \cdot 10^{-3}$	suelo desnudo (liso)	
$10^{-3}$	superficies nevadas (lisas)	
$3 \cdot 10^{-4}$	superficies de arena (lisas)	
$10^{-4}$	zonas de agua (lagos, fiordos, mar abierto)	0

*Fuente.* El gráfico muestra las características del terreno según el parámetro  $z_0$  y la clase. Tomado de *El Atlas Eólico Europeo* (p.44), por Troen & Lundtang Petersen, (1990), Risø National Laboratory.

Usando Google Earth se estableció la zona de estudio según el polígono mostrado en la Figura 11 con un perímetro de 20.6 Km y área de 22 Km. La zona de estudio se caracterizó por su fácil acceso, presentar el mayor promedio de altitud (3 850 msnm) en las zonas próximas a la mina, no presentar obstáculos representativos en un radio de 7 Km y no contar con abundante vegetación por lo que el parámetro de irregularidad se definió con un valor igual a 0.01 según la Tabla 1.

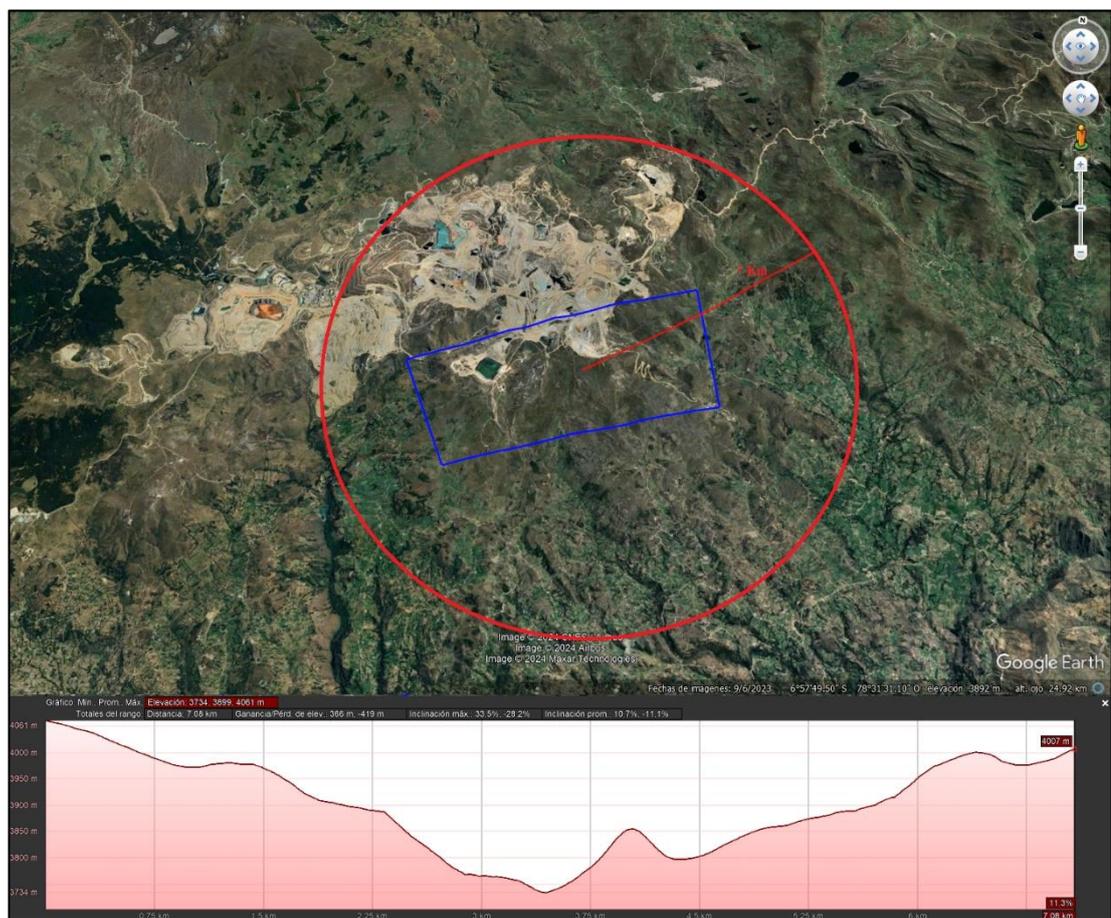
**Figura 11:** Zona de estudio



*Fuente.* Polígono de color azul que envuelve a la zona de estudio realizado en Google Earth. Tomado de *Google Earth* (p.1), por Google,(2023).

Además, en la Figura 12 se define en un radio de siete kilómetros (7 km) a partir del centro de la zona de estudio que no evidencie obstáculos con mayor altitud que la altitud media de la zona de estudio como se corrobora en el perfil de elevación del radio trazado por el perímetro de la zona de estudio de mayor altitud como se evidencia en la parte inferior de la imagen.

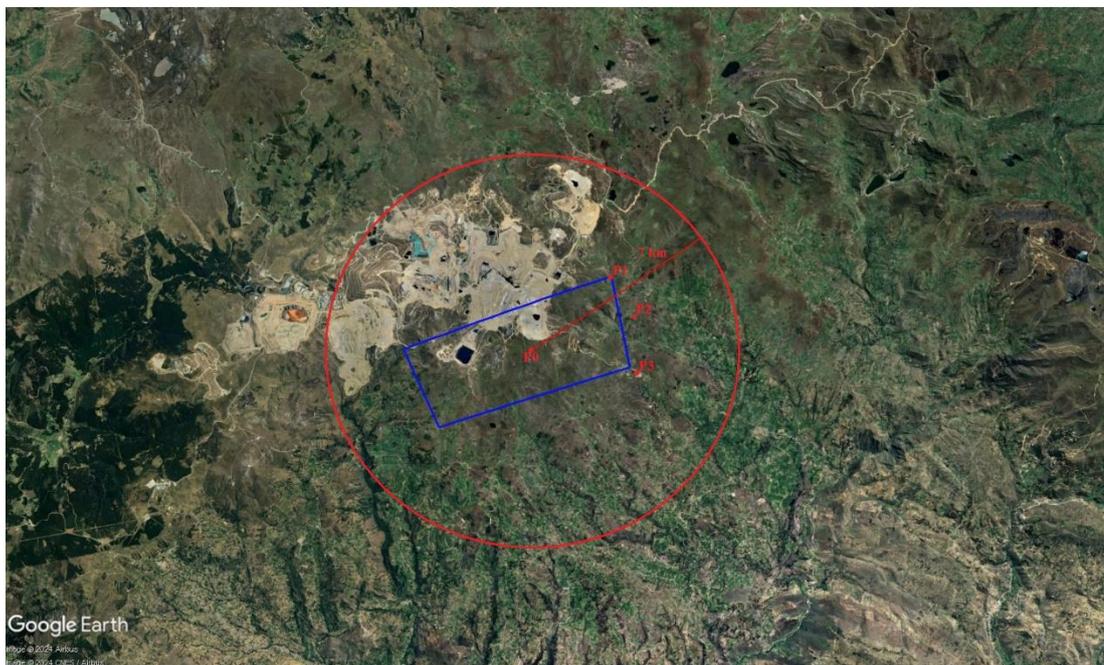
**Figura 12:** *Efecto de una colina ideal*



*Fuente.* Representación del área circular que se puede trazar sin encontrar zonas más altas que la zona de estudio en Google Earth. Tomado de *Google Earth* (p.1), por Google,(2023).

**Puntos geográficos para la toma de datos:** Para la toma de datos se realizó según los puntos que se muestra en la Figura 13. El punto P0 (Latitud -6.9962; Longitud -78.5148) se estableció como punto de referencia para la toma de datos de dirección del viento por estar en un punto referencialmente céntrico de la zona de estudio. El punto P1 (Latitud -6.9838; Longitud -78.4594), P2 (Latitud -6.9945; Longitud -78.4508) y P3 (Latitud -7.0116; Longitud -78.4520) se localizan sobre la misma cota de nivel a 3 550 msnm y se establecieron en sentido de la dirección predominante del viento para que posteriormente se promedien y se desarrolle la velocidad del viento como un mismo perfil de viento. Este proceso se pensó puesto que el software RWIND 2.02 permite simular bajo un único perfil de viento a la vez.

**Figura 13:** Puntos geográficos para la toma de datos



*Fuente.* Puntos geográficos para la toma de datos. Tomado de *Google Earth* (p.1), por Google,(2023).

### 3.1.2. Dirección del viento

De la plataforma POWER Data Access Viewer se exportaron 3 652 datos de dirección del viento y se ordenaron según la tabla de frecuencias (Tabla 2) que muestra la cantidad de valores de dirección del viento en un rango de 18°.

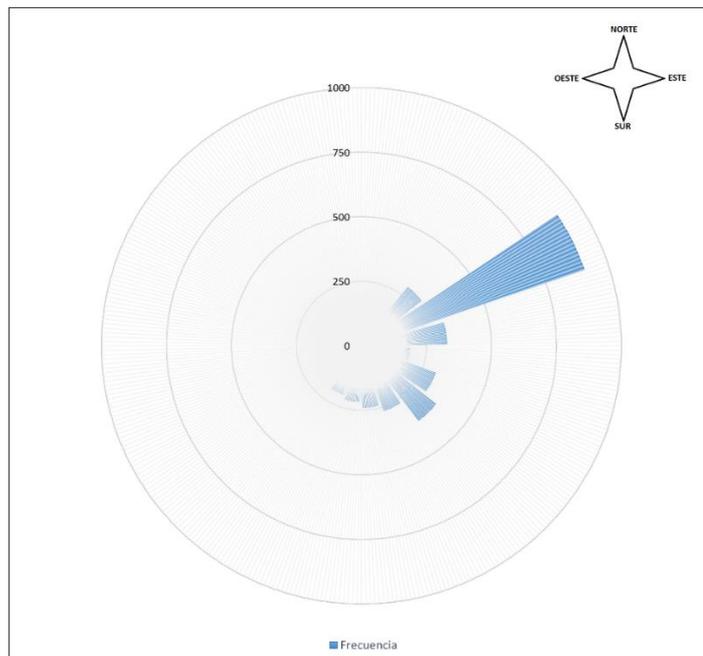
**Tabla 2:** *Tabla de frecuencias*

<b>Punto Cardinal</b>	<b>Rango (°)</b>		<b>Frecuencia</b>
N	0	18	0
NNE	18	36	10
NE	36	54	288
ENE	54	72	906
E	72	90	328
E	90	108	187
ESE	108	126	303
SE	126	144	363
SSE	144	162	266
S	162	180	239
S	180	198	217
SSW	198	216	199
SW	216	234	164
WSW	234	252	106
W	252	270	50
W	270	288	18
WNW	288	306	7
NW	306	324	1
NNW	324	342	0
N	342	360	0

*Fuente.* Elaboración propia

La tabla anterior se representó según la Figura 14. Evidencia una dirección predominante, en el sentido noreste, en el rango de 54° y 72° NE.

**Figura 14:** *Rosa de vientos*



*Fuente.* Rosa de vientos realizada en el software Excel. Elaboración propia

## **3.2. De la Energía Cinética**

### **3.2.1. Distribución estadística**

Para el estudio y procesamiento de datos de velocidad del viento se utilizó la función de distribución de Weibull. Entonces, de la plataforma POWER Data Access Viewer se descargaron 3 652 datos de la velocidad del viento a 50 metros sobre el nivel del suelo en la zona de estudio que se agruparon de menor a mayor según la columna 2 de la Tabla 3.

**Tabla 3:** *Distribución de datos U*

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	Columna 7	Columna 8	Columna 9
ítem	U	RM	x	y	f(U)/R(U)	R(U)	1-R(U)	f(U)%
1	0.98	0.0	-0.02	-8.56	0.045	9.9E-01	0.013	4.4057
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
3 652	8.80	1.0	2.17	2.15	8.371	3.5E-10	1.000	3.0E-07

*Fuente.* Elaboración propia

A continuación, se profundiza en lo que representa cada columna de la tabla anterior:

**Columna 3 (Tabla 3):** Representa la aplicación de la fórmula de Bernard como estimador del rango mediana según la Ecuación 9.

$$RM = \frac{\text{ítem}-0.3}{3\ 652+0.4} \quad (9)$$

**Columna 4 (Tabla 3):** Representa los valores de las abscisas según la aproximación a una ecuación lineal de la distribución acumulada de Weibull (Ecuación 10).

$$x = \ln(U) \quad (10)$$

**Columna 5 (Tabla 3):** Representa los valores de las ordenadas en base a la adaptación de la distribución acumulada de Weibull a una ecuación lineal (Ecuación 11).

$$y = \ln(\ln(1 - F(U))) \quad (11)$$

**Columna 6 (Tabla 3):** Representa la función de distribución de Weibull dividida entre la distribución acumulada superior  $R(U)$ , donde  $c$  es el parámetro escala,  $k$  el parámetro según la Ecuación 12.

$$\frac{f(U)}{R(U)} = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \quad (12)$$

**Columna 7 (Tabla 3):** Representa la distribución acumulada superior (Ecuación 13).

$$R(U) = \exp \left[ - \left( \frac{U}{c} \right)^k \right] \quad (13)$$

**Columna 8 (Tabla 3):** Representa la distribución acumulada inferior (Ecuación 14).

$$F(U) = \int_0^y f(U).dU = 1 - R(U) \quad (14)$$

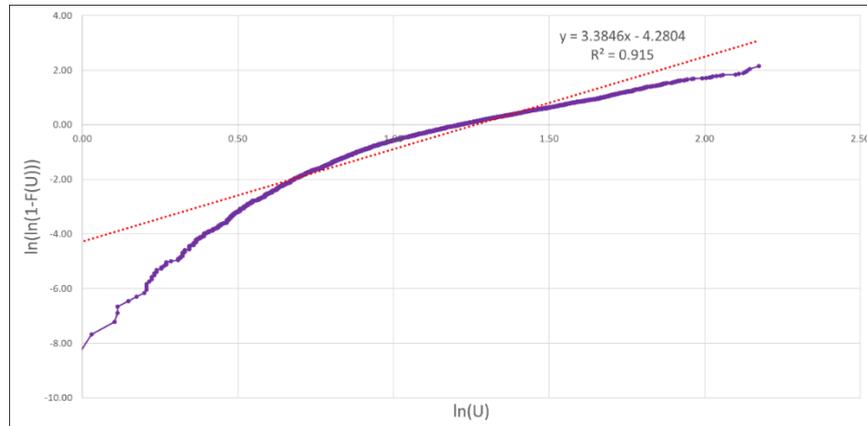
**Columna 9 (Tabla 3):** Representa la función de distribución de Weibull porcentual (Ecuación 15).

$$f(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{U}{c} \right)^k \right] \quad (15)$$

Las columnas de la Tabla 3 se definieron en el orden necesario para poder definir numéricamente cada parámetro. A partir de graficar  $y$  vs  $x$  (Figura 13) se

obtuvo la Figura 15, donde el parámetro forma (k) resultó 3.3846 y el parámetro escala (c) resultó 3.5419 con un 91.5% de coeficiente de determinación.

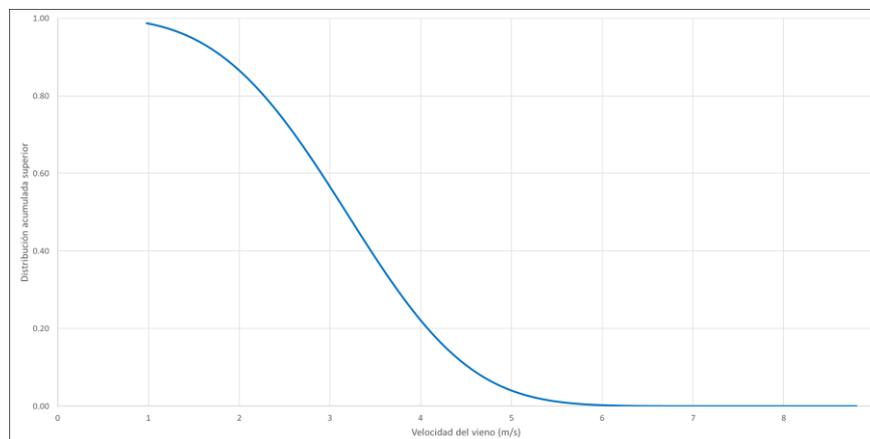
**Figura 15:** Aproximación a una ecuación lineal



*Fuente.* La ecuación de la lineal representa la línea de tendencia que siguen los datos numéricos de velocidad del viento. Elaboración propia

De la Tabla 3, al graficar  $R(U)$  vs  $U$  (Figura 16) se obtiene la gráfica de distribución acumulada superior en la que se evidencia una probabilidad del 98.72% de que se presenten valores mínimos de velocidad de viento de 0.98 m/s.

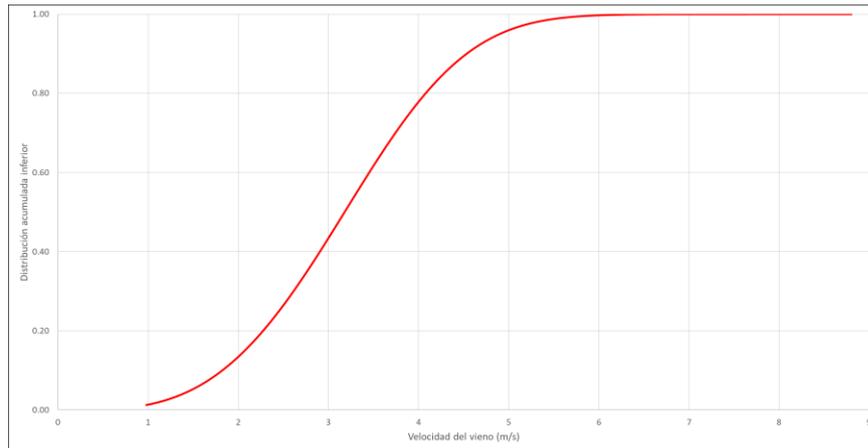
**Figura 16:** Confiabilidad



*Fuente.* Elaboración propia

De la Tabla 3, al graficar  $1-R(U)$  vs  $U$  (Figura 17) se obtiene la gráfica de distribución acumulada inferior en la que se evidencia una probabilidad del 0.013% de que no se presenten valores mínimos de velocidad de viento de 0.98 m/s.

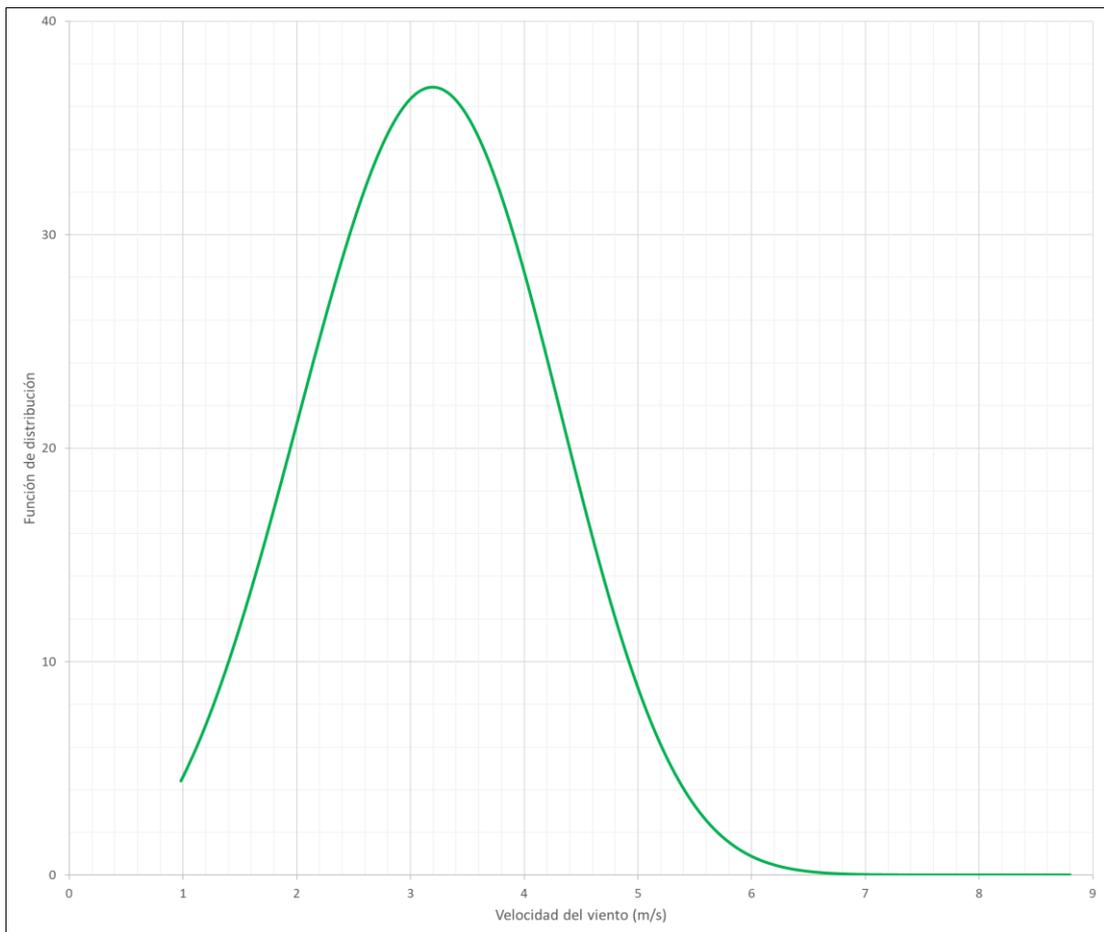
**Figura 17:** Probabilidad de falla



*Fuente.* Elaboración propia

De la Tabla 3, al graficar  $f(U)\%$  vs  $U$  se obtiene la gráfica de la distribución estadística de datos según Weibull que se acerca, por la forma geométrica, a una distribución normal (Figura 18).

**Figura 18:** *Distribución de Weibull*



*Fuente.* Elaboración propia

Considerando la función Gamma de Euler y los parámetros que se definieron a partir de la función de Weibull (Ecuación 16), se logró cuantificar la velocidad media, resultando el valor de 4.5723 m/s.

$$\bar{U} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \leftrightarrow \Gamma(k) = \int_0^{\infty} t^{k-1} e^{-t} dt \quad (16)$$

### 3.2.2. Perfil de velocidad del viento

El Modelo logarítmico se representa por la Ecuación 17, en función de la constante adimensional  $k$  de Von Karman que se sustituye por el valor numérico de 0.40,  $u^*$  es la velocidad de corte que se estima a partir de una velocidad a cierta altura ya conocidas,  $z_0$  sería el parámetro de irregularidad y  $U_h$  sería la velocidad del viento a una altura  $h$ .

$$U_h = \frac{u^*}{k} \ln \frac{h}{z_0} \quad (17)$$

Para la altura de 50 metros ( $h$ ) se tiene una velocidad media de 4.572 m/s ( $U_h$ ) con un parámetro de irregularidad de 0.01 ( $z_0$ ), por lo que la velocidad de corte resulta 0.215 m/s ( $u^*$ ), con estos parámetros definidos se genera la Tabla 4 desde una altura inicial al nivel del suelo (cero metros) hasta los 100 metros.

**Tabla 4:** *Datos numéricos del perfil de vientos*

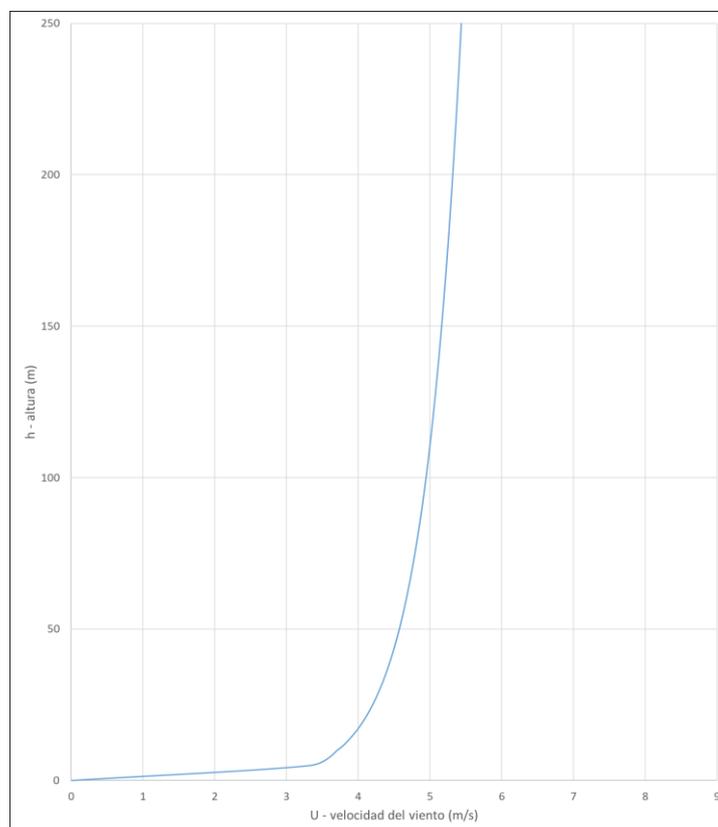
h (m)	U (m/s)
0	0.00
5	3.34
10	3.71
15	3.93
20	4.08
25	4.20
30	4.30
35	4.38
40	4.45
45	4.52
<b>50</b>	<b>4.57</b>
55	4.62
60	4.67
65	4.71
70	4.75
75	4.79

80	4.82
85	4.86
90	4.89
95	4.92
100	4.94

*Fuente.* Elaboración propia

Al graficar la tabla anterior se obtiene la Figura 19 que representa el perfil de velocidades presente en la zona de estudio colindante con la mina Yanacocha.

**Figura 19:** Perfil de vientos – mina Yanacocha



*Fuente.* Comportamiento de la velocidad del viento en relación a la altura respecto al suelo. Elaboración propia

De la figura anterior se confirmó que, a partir del Modelo logarítmico, se confirma una velocidad del viento de 4.94 m/s a una altura de 100 metros respecto al nivel del suelo en la zona de estudio.

### 3.2.3. Potencial eólico

Sin tener presente una densidad del aire de 0.738 Kg/m<sup>3</sup> presente en la zona de estudio, se obtiene un potencial de 35.27 W presente por cada metro cuadrado según la Ecuación 18.

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A \bar{U}^3 = \frac{1}{2} (0.738)(1)(4.572)^3 W/m^2 = 35.27 W/m^2 \quad (18)$$

Además, si se tiene en cuenta el coeficiente de potencia ( $C_p$ ) de los aerogeneradores, se obtiene la siguiente ecuación:

$$P_e = C_p \frac{1}{2} \rho A \bar{U}^3 \quad (19)$$

Para un coeficiente de potencia del 40% se obtiene un potencial de 14.11 W por cada metro cuadrado que, multiplicado por 24 horas del día y 30 días del mes, se obtuvo una energía de 423.28 Wh por metro cuadrado en cada mes:

$$E = (0.4) \frac{1}{2} \rho A \bar{U}^3 = (0.4) \frac{1}{2} (0.738)(1)(4.572)^3 W/m^2 = 14.11 W/m^2 \quad (20)$$

Para un coeficiente de potencia del 50% se obtiene un potencial de 17.64 W por cada metro cuadrado que, multiplicado por 24 horas del día y 30 días del mes, se obtuvo una energía de 529.10 Wh por metro cuadrado en cada mes:

$$E = (0.5) \frac{1}{2} \rho A \bar{U}^3 = (0.5) \frac{1}{2} (0.738)(1)(4.572)^3 W/m^2 = 17.64 W/m^2 \quad (21)$$

En adición, si se considera las características de un Aerogenerador Onshore SG 2.6-114 a condiciones normales que posee una velocidad de arranque de 2 m/s (**Anexo 5**) se tiene que la potencia mínima generada sería mayor que 1.31 W por metro cuadrado.

$$P_e = C_p \frac{1}{2} \rho A \bar{U}^3 = (0.45) \frac{1}{2} (0.738)(1)(2.00)^3 W/m^2 = 1.3284 W/m^2 > 1.31 W/m^2 \quad (22)$$

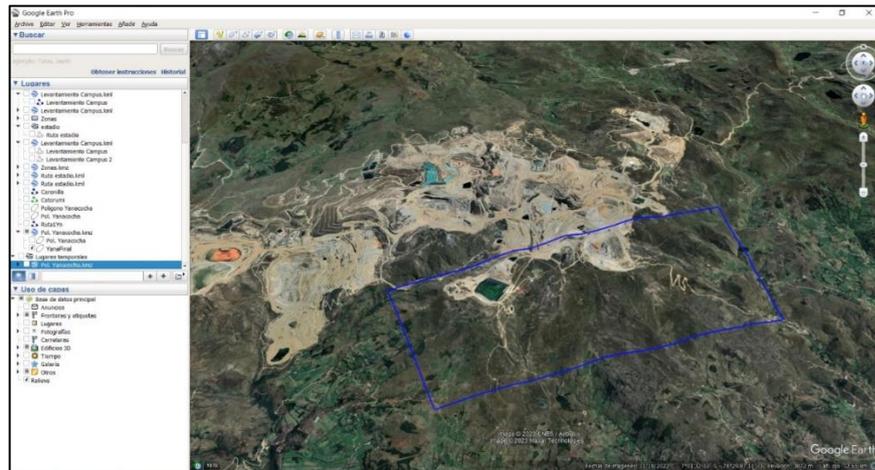
### **3.3. Diseño a escala de la minera Yanacocha**

La representación geográfica de la zona mediante un sólido fue de principal importancia para su posterior simulación y se definió a partir de las curvas de nivel como se valida en el proceso siguiente:

#### **3.3.1. Curvas de nivel usando Google Earth Pro**

La Figura 20 muestra el polígono, según el software Google Earth Pro, que incluye la zona colindante más alta de la mina Yanacocha correspondiente al lado sur.

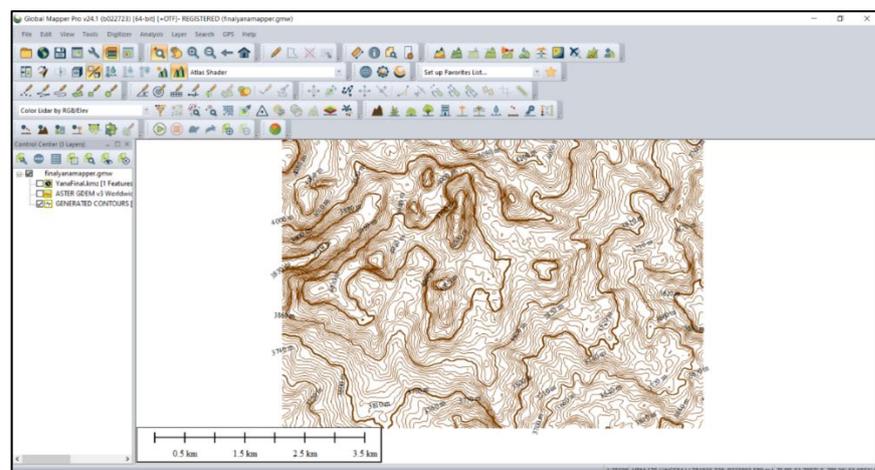
**Figura 20:** *Polígono en Google Earth Pro*



*Fuente.* Elaboración propia

**Generación de la superficie:** El polígono generado en Google Earth Pro se exportó al software Global Mapper, en donde se definió las curvas de nivel para generar la superficie de la Figura 21. Para una mayor precisión en la representación y teniendo presente el costo computacional, se definieron las curvas principales con una diferencia de 100 metros de altitud y entre ellas la presencia de diez curvas secundarias.

**Figura 21:** *Cotas en Global Mapper*



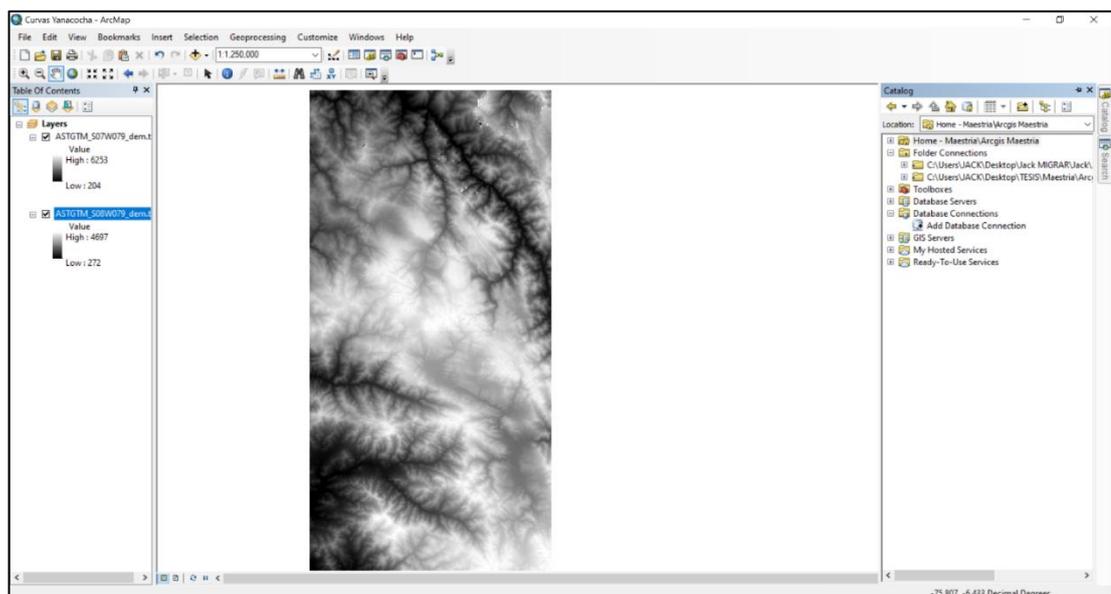
*Fuente.* Elaboración propia

Al exportar en formato de texto las curvas de nivel de la figura anterior, se representaron por coordenadas UTM, cada una con su altitud correspondiente y a estas coordenadas se definieron como puntos representativos de la zona de estudio. Entonces, a partir de Google Earth Pro, la zona de estudio se representó por 366 438 puntos representativos (**Anexo 4**).

### 3.3.2. Curvas de nivel usando ArcGIS 10.8

Para este proceso es importante tener un archivo base que incluya la zona de estudio y pueda ser exportado al software ArcGIS 10.8. Se prosiguió por obtener un modelo digital de elevación (DEM) que vendría a ser una conceptualización ráster de la superficie geográfica que incluye a la zona de estudio (Figura 22). La mina Yanacocha se encuentra entre las zonas S07W79 y S08W79.

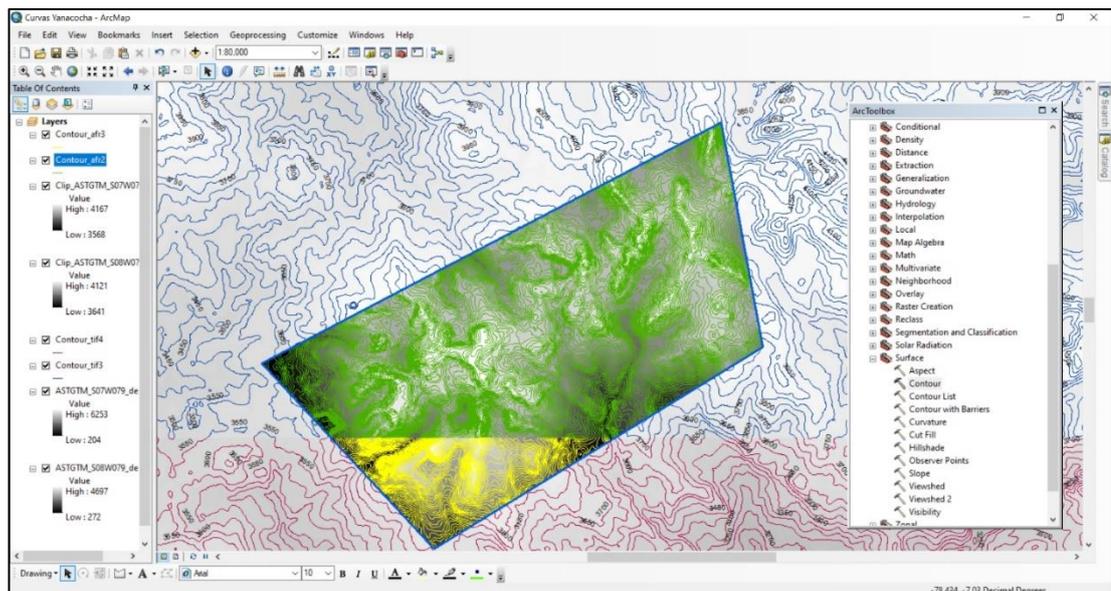
**Figura 22:** DEM que incluyen la minera Yanacocha



*Fuente.* Elaboración propia

De la Figura 23 se observa las zonas bien definidas por colores, donde las curvas de nivel de color azul y verde representan la zona S07W79 y las de color rojo y amarillo representan la zona S08W79. El intervalo de las curvas de nivel fue de 10 metros para el polígono generado que incluye la zona de estudio.

**Figura 23:** Curvas de nivel generadas en ArcGIS 10.8



*Fuente.* Elaboración propia

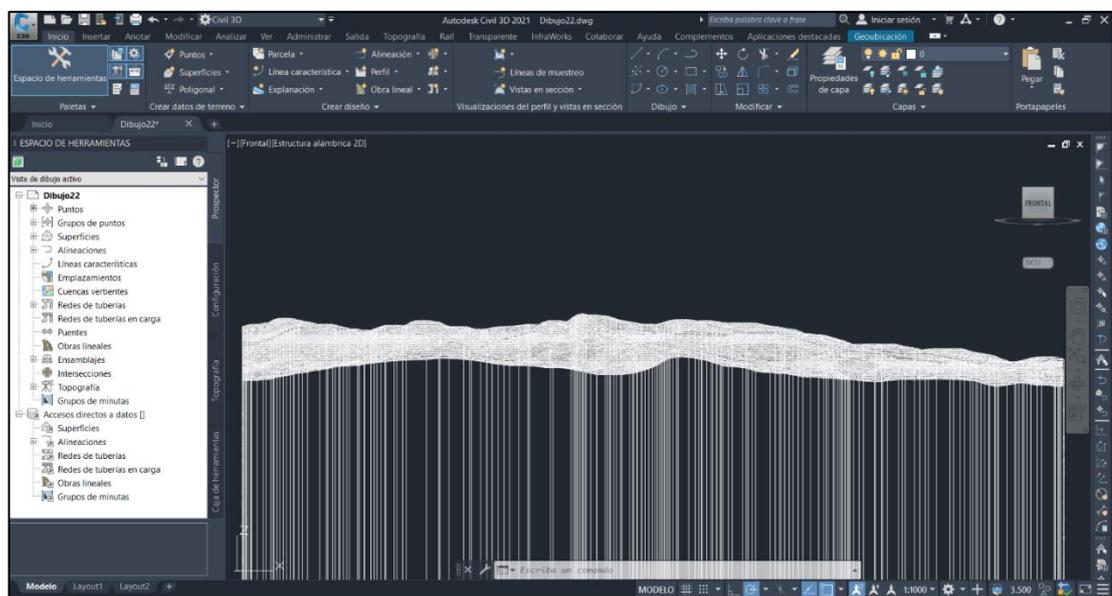
**Generación de la superficie:** El polígono generado en ArcGIS se exportó en formato CAD que facilitó la lectura en Civil 3D y se representó como una superficie.

Al convertir las curvas de nivel de la figura previa a formato de texto, se utilizaron coordenadas UTM para representar cada punto junto con su altitud asociada. Estos puntos se identificaron como puntos representativos del área de estudio. Entonces, en base a ArcGIS 10.8, la zona de estudio se representó por 748 462 puntos representativos (**Anexo 4**).

### 3.3.3. Generación del sólido en Civil 3D

La superficie generada anteriormente, mediante el software ArcGIS 10.8, se exportó al software Civil 3D para extraer un sólido a partir de una superficie, la Figura 24 muestra el resultado.

**Figura 24:** *Sólido en Civil 3D*



*Fuente.* Elaboración propia

### 3.4. Simulación del sólido mediante CFD

El sólido generado, que representa la zona geográfica de estudio, fue exportado al software RWIND para la simulación fluidodinámica.

### 3.4.1. Parámetros de simulación

Representan los valores variables e invariables que son ingresados al software de simulación para su posterior análisis (**Anexo 1 y Anexo 2**).

**Número de Mach:** Establecida según la Ecuación 23, en donde la velocidad del sonido toma el valor de 343.2 m/s.

$$M = \frac{v}{c} = \frac{4.572 \text{ m/s}}{343.2 \text{ m/s}} = 0.0133 \quad (23)$$

**Temperatura (T):** La temperatura media presente en la zona de estudio fue de 14.55 °C en base a los valores satelitales promedios importados de la plataforma NASA Power Data Access en el periodo de diez años, es decir, del primero de enero del año 2013 al 31 de diciembre del 2022 a una altura de 2 metros sobre el nivel del suelo.

**Presión Atmosférica ( $P_{atm}$ ):** La Ecuación 24 muestra la relación entre presión atmosférica y la altitud (H),  $P_o$  es la presión atmosférica a nivel del mar (1 013.25 mbar). Teniendo presente que la zona de estudio en la mina Yanacocha se encuentra a una altitud media de 4 030.40 msnm, entonces, la presión atmosférica en esa zona estaría representada por el valor numérico de 613.963 mbar.

$$P_{atm} = P_o(1 - 0.0000225577H)^{5.2559} \quad (24)$$

**Humedad relativa ( $H_r$ ):** Se determinó en base a los datos satelitales promedios importados de la plataforma NASA Power Data Access en el periodo de diez años, es decir, del primero de enero del año 2013 al 31 de diciembre del 2022 a una altura de 2 metros sobre el nivel del suelo, resultando el valor de 69.89% de humedad relativa presente en la zona de estudio.

**Densidad del aire ( $\rho_{air}$ ):** Mediante una calculadora virtual y conociendo los parámetros anteriores, se obtuvo el valor de 0.738 kg/m<sup>3</sup> como se muestra en la Figura 25.

**Figura 25:** Calculadora densidad del aire.

Calculadora:		
Humedad Relativa:	<input type="text" value="69.887"/>	%
Temperatura:	<input type="text" value="14.55"/>	°C
Presión:	<input type="text" value="613.9628"/>	<input type="text" value="mbar (mil)"/>
Resultados:		
Presión de vapor de agua:	<input type="text" value="11.58"/>	<a href="#">hPa</a>
Presión de vapor saturado:	<input type="text" value="16.57"/>	<a href="#">hPa</a>
g de agua/kg aire seco:	<input type="text" value="11.957"/>	g/kg
Temperatura de rocío:	<input type="text" value="9.12"/>	°C
Densidad:	<input type="text" value="0.738"/>	kg/m <sup>3</sup>

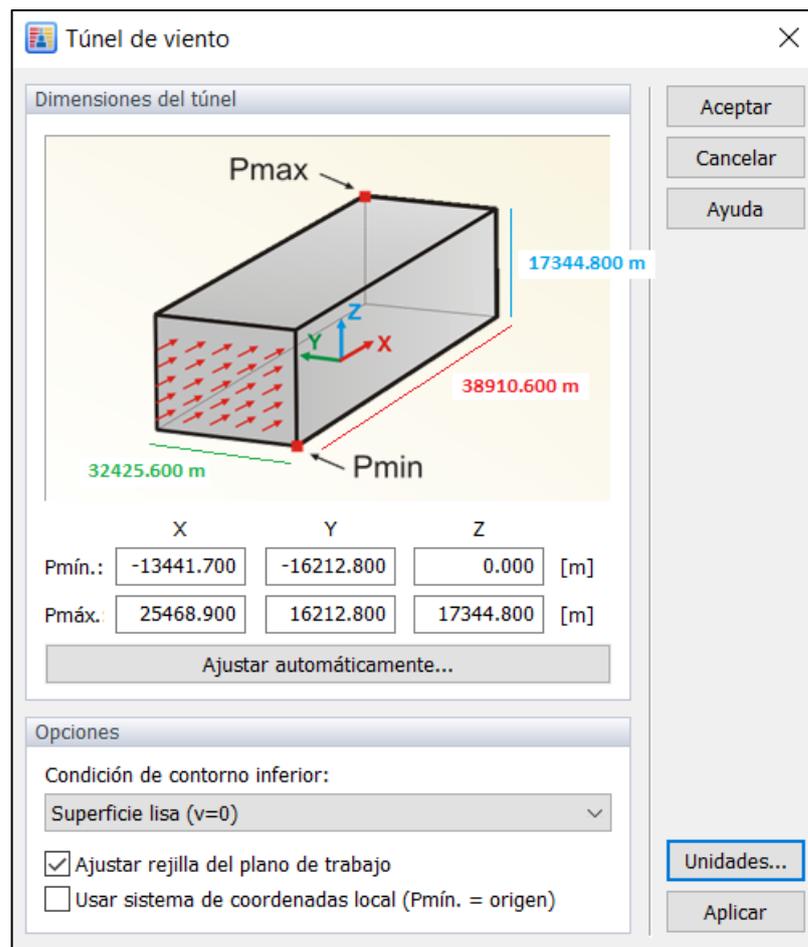
*Fuente.* Calculadora digital. Tomado de *Herramientas de ingeniería* (p.1), por Herramientas de ingeniería, (2023).

### 3.4.2. Proceso de simulación

La simulación fluidodinámica se realizó con el uso del software RWIND 2.02 porque facilitó el ingreso de un perfil de velocidades de viento.

*Edición de modelo en RWIND 2.02:* La generación del túnel de viento se estableció de forma automática en forma de prisma rectangular, teniendo un largo de 38 910.6 m, un ancho de 32 425.6 m y una altura de 17 344.8 m, como se muestra en la Figura 26.

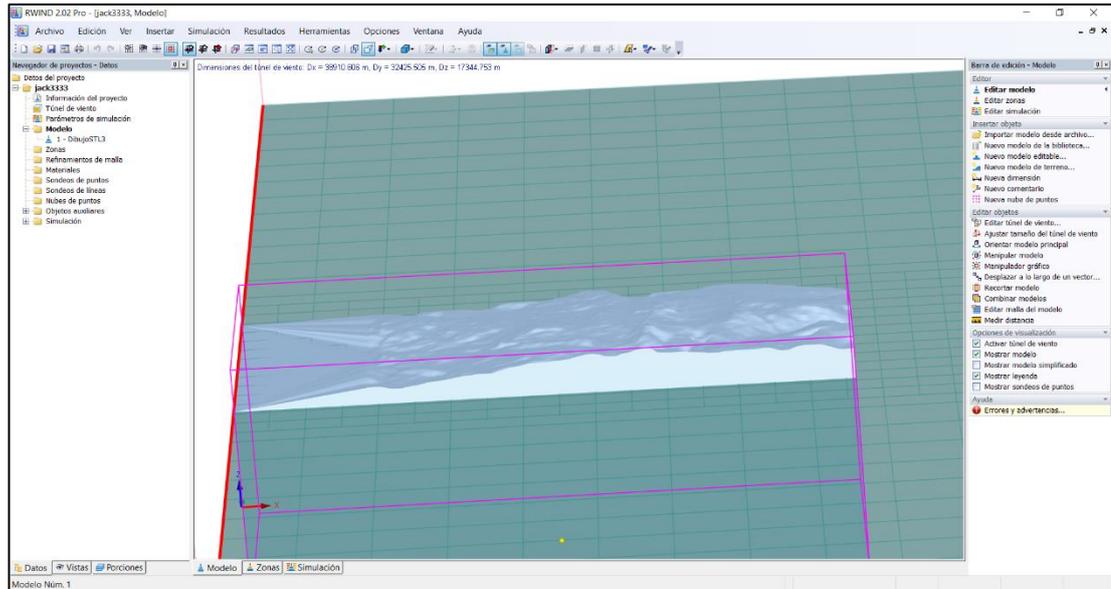
**Figura 26:** Túnel de viento.



Fuente. Elaboración propia

Posteriormente, se rotó el sólido con el fin de coincidir el ingreso del aire con el sentido noreste que se representó en el sentido positivo del eje de las abscisas desarrollado en Civil 3D (Figura 27).

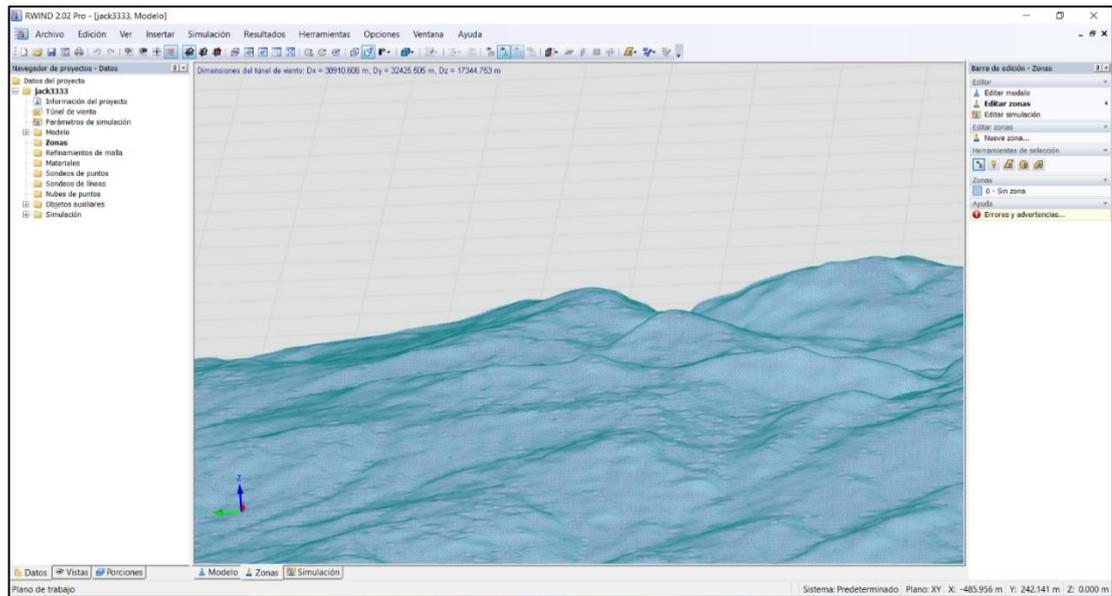
**Figura 27:** *Sólido visto desde RWIND 2.02.*



*Fuente.* Elaboración propia

**Mallado del sólido en RWIND 2.02:** El mallado se realizó mediante la misma interfaz del software que permite generarse en función al porcentaje de densidad de malla, el número que representó el número de celdas del mallado fue 50 664 con un tamaño mínimo por celda de 128.246 metros, brindando la perspectiva de la Figura 28.

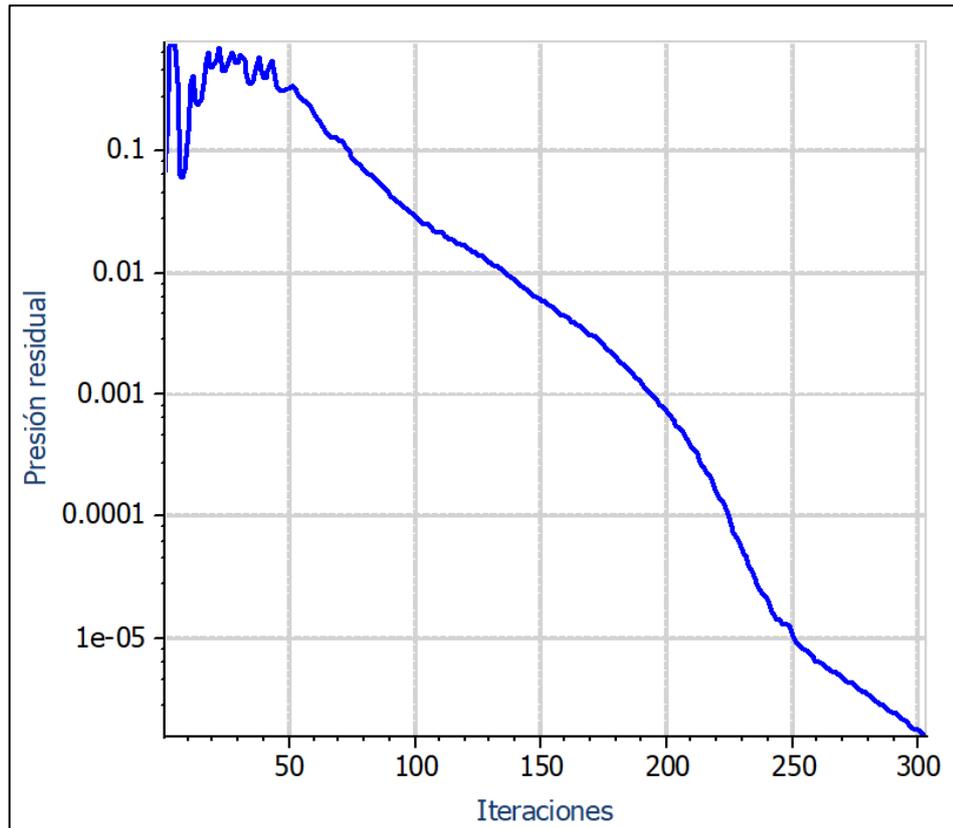
**Figura 28:** *Mallado del sólido desde RWIND 2.02.*



*Fuente.* Elaboración propia

***Simulación en RWIND 2.02:*** Luego de ingresar los parámetros de simulación se procedió con iniciar el cálculo en base a 500 iteraciones (Figura 29). El modelo utilizado para la simulación fluidodinámica con el que trabajó el software fue el modelo K-épsilon ( $k-\epsilon$ ) para dar prioridad en la determinación del comportamiento del fluido en zonas apartadas al suelo con un criterio de convergencia de 0.001. El software encontró convergencia en la iteración 303 por lo que se detuvo.

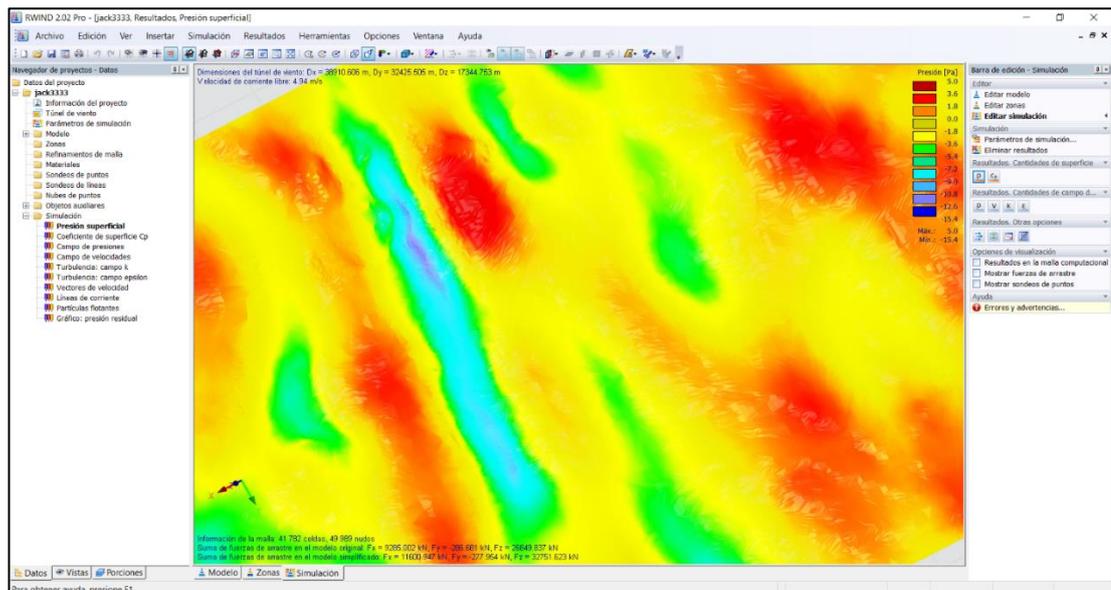
**Figura 29:** Residual de presión.



*Fuente.* Elaboración propia

La Figura 30 muestra la presión superficial del área seleccionada vista en perspectiva realista, es decir, el lado derecho representa el este y el lado superior representa el norte. La presión y la velocidad son parámetros que se relacionan de manera inversamente proporcional por lo que, en zonas de baja presión, existen altas velocidades de viento. Según la leyenda, las zonas de color rojo representan altos valores de presión llegando hasta 5.0 Pa y las zonas de baja presión se representan por el color azul, hasta un mínimo de -15.4 Pa.

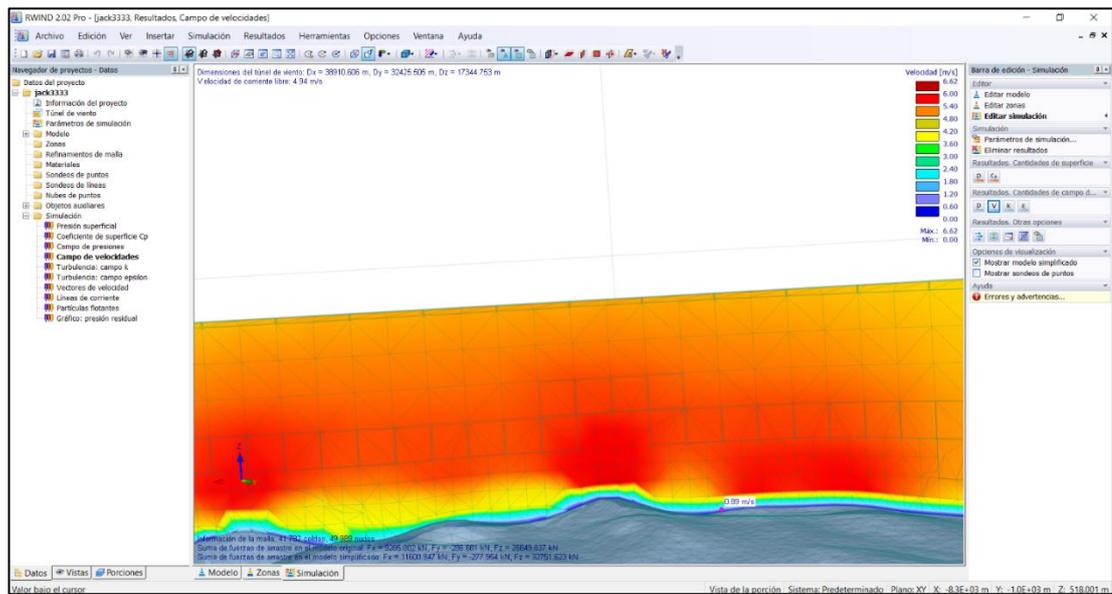
**Figura 30:** *Campo de presiones.*



*Fuente.* Elaboración propia

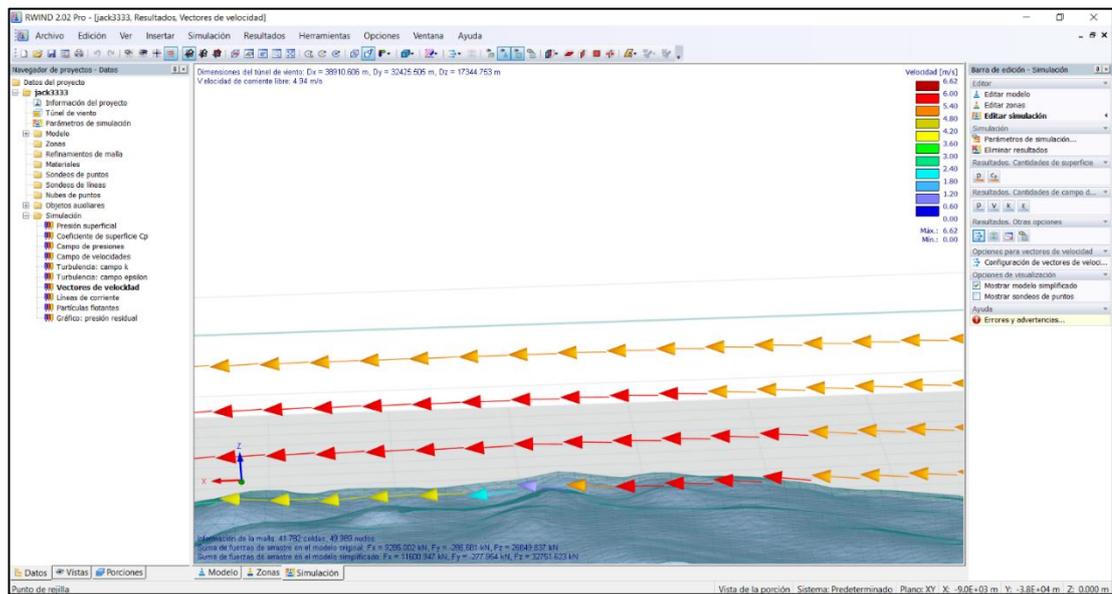
La velocidad del viento se representó por las siguientes figuras: Figura 31 muestra el campo de velocidades situado de forma ortogonal al sólido en la mitad, la Figura 32 muestra la velocidad del viento representada por vectores sobre un plano ortogonal al sólido y la Figura 33 muestra las líneas de corriente que representan los recorridos del viento a cierta altura sobre el nivel del suelo. Los campos mostrados en las figuras citadas se podían manipular de manera horizontal y vertical que permitió un mayor análisis en la interpretación de los datos obtenidos.

Figura 31: Campo de velocidades.



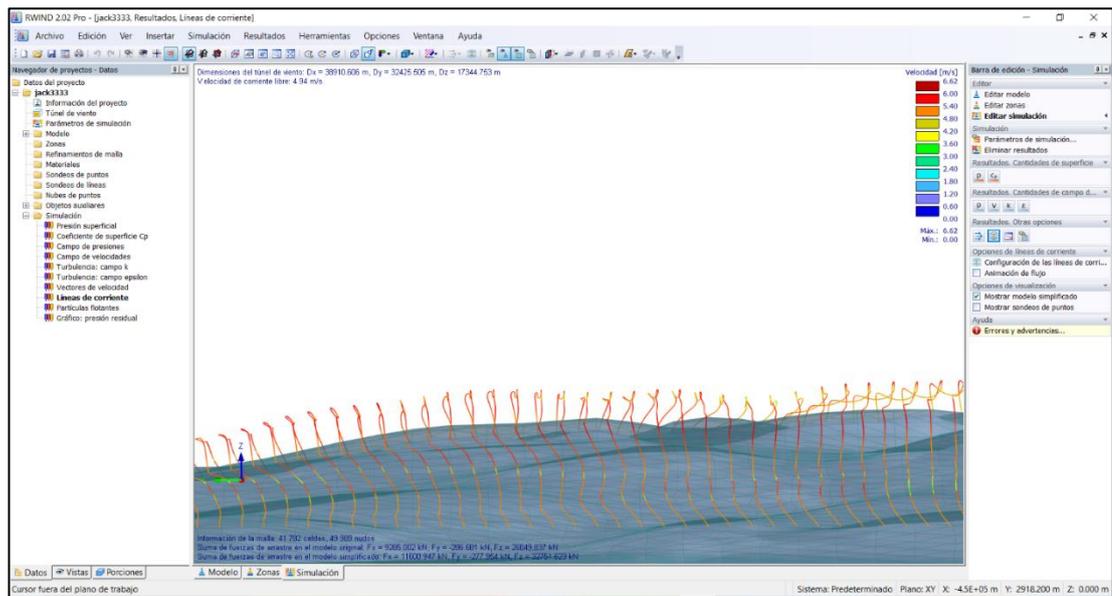
Fuente. Elaboración propia

Figura 32: Velocidad del viento - vectores.



Fuente. Elaboración propia

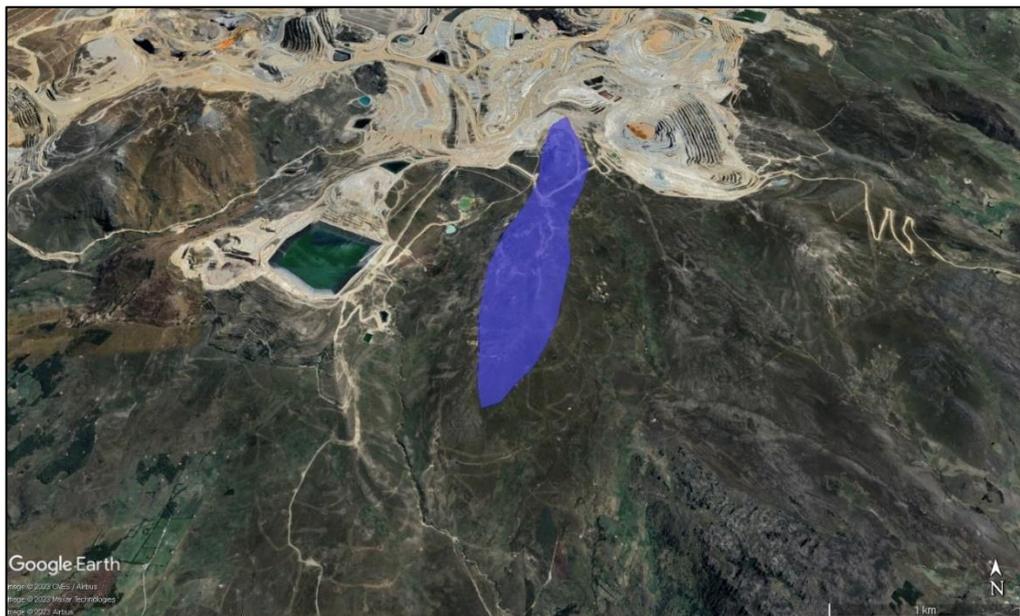
**Figura 33:** Velocidad del viento – Líneas de corriente.



Fuente. Elaboración propia

Identificada la zona de baja presión se definió la región con presencia de alto potencial eólico según la Figura 34, estableciéndose un área de 813 736 metros cuadrados.

**Figura 34:** Zona con presencia de alto potencial eólico.



Fuente. Elaboración propia

### 3.5. Análisis e Interpretación

#### 3.5.1. Análisis del estudio de emplazamiento

En el estudio de emplazamiento se definieron los indicadores que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 5:** *Indicadores de emplazamiento.*

Indicadores	Valor cuantificado
Parámetro de irregularidad ( $z_0$ )	0.01
Dirección del viento	[54°;74°] NE

*Fuente.* Elaboración propia

De la tabla expuesta se corroboró la viabilidad de la zona puesto que, al presentar la zona de estudio un parámetro de irregularidad tan bajo confirmó la falta de presencia de obstáculos cercanos. Además, las plantas que crecen naturalmente en la zona, poseen una altura promedio de 2 metros con ramificaciones no muy frondosas y no se evidenciaron obstáculos significativos en un radio de 7 kilómetros.

Para determinar la dirección del viento se estableció un punto referencialmente céntrico de la zona de estudio de latitud -6.9962 y longitud -78.5148 (**Anexo 3**) del cuál se determinó el sentido predominante de noreste a noroeste para la dirección del viento. Posteriormente, conociendo la dirección del viento, se establecieron los puntos de latitud -6.9838 y longitud -78.4594; el de latitud -6.9945 y longitud -78.4508; y el de latitud -7.0116 y longitud -78.4520 para la toma de datos de velocidad del viento (**Anexo 7** y **Anexo 8**).

### 3.5.2. Análisis del estudio de potencial eólico

En el estudio del potencial eólico se definieron los indicadores que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 6:** *Indicadores del potencial eólico.*

<b>Indicadores</b>	<b>Valor cuantificado</b>
Parámetro de forma (k)	3.3846
Parámetro de escala (c)	3.5419
Velocidad media del viento ( $\bar{U}$ )	4.5723 m/s
Velocidad de corte ( $u^*$ )	0.215 m/s
Potencial Eólico ( $P_e$ )	<b>"Tabla 7"</b>

*Fuente.* Elaboración propia

El parámetro de forma, mostrado en la tabla anterior, se aproximó al valor de 3 y por esta razón se identificó la curva característica como una de distribución normal. El parámetro de escala muestra a la tendencia de la distribución y esto se evidencia en la curva característica si es plana o estrecha. En referencia a la velocidad media del viento presente, se validó valores altos por encima de los 4.5 m/s. La mina Yanacocha se encuentra en cabecera de la cuenca Jequetepeque, colindante con la cuenca Crisnejas, por lo que la ubicación de esta es un factor predominante en la presencia de altas velocidades de viento. La velocidad de corte establecida mediante el método logarítmico resultó un valor aproximado a la realidad que permitió garantizar el gráfico de perfil de vientos.

Respecto al indicador de potencial eólico se expone la Tabla 7 en función del coeficiente de potencia ( $C_p$ ) característico que define a los aerogeneradores permitiendo el aprovechamiento energético. El límite de Betz se establece un

aprovechamiento energético máximo del 59%, por lo que el siguiente cuadro se creó en función del  $C_p$  vigente al que operan aerogeneradores de eje horizontal en el mercado y la potencia que se podría llegar a obtener en función a los parámetros encontrados en la presente investigación.

**Tabla 7:** *Indicadores del potencial eólico en función del  $C_p$ .*

<b>Coefficiente de Potencia (<math>C_p</math>)</b>	<b><math>P_e/m^2</math></b>
0.30	17.57 W
0.35	20.49 W
0.40	23.42 W
0.45	26.35 W
0.50	29.28 W

*Fuente.* Elaboración propia

### 3.5.3. Análisis del proceso de diseño

En el proceso de diseño se definieron los indicadores que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 8:** *Indicadores de diseño.*

<b>Indicadores</b>	<b>Valor cuantificado</b>
A partir de Google Earth Pro	366 438 puntos representativos
A partir de ArcGIS 10.8	748 462 puntos representativos

*Fuente.* Elaboración propia

Para el proceso de diseño del sólido, se realizó en base a dos fuentes: La primera fuente fue Google Earth Pro que brindó facilidad de acceso y tratamiento de datos, los 366 438 puntos se muestran de manera resumida en el lado izquierdo del

**Anexo 4.** La segunda fuente fue ArcGIS que, de manera contraria a la primera, resultó más tedioso su generación, pero con resultados muy significativos. Se apostó desarrollar el sólido en base a lo realizado en ArcGIS por la gran cantidad de detalle en el sólido que a su vez ayudó a obtener una mejor calidad de malla, los 748 462 puntos se muestran de manera resumida el lado derecho del **Anexo 4**.

### 3.5.4. Análisis del proceso de simulación

En el proceso de simulación se definieron los indicadores que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 9:** *Indicadores de simulación.*

<b>Indicadores</b>	<b>Valor cuantificado</b>
Temperatura (T)	14.55°C
Presión Atmosférica ( $P_{atm}$ )	613.963 mbar
Humedad relativa (Hr)	69.89%
Densidad del aire ( $\rho_{air}$ )	0.738 kg/m <sup>3</sup>
Celdas de mallado	50 664
Iteraciones	303

*Fuente.* Elaboración propia

La temperatura media, presión atmosférica y humedad relativa en la zona de estudio, fue la base para la obtención del valor numérico de la densidad del aire y los valores importados de las variables de la plataforma de la NASA (**Anexo 1 y Anexo 2**).

Para determinar el valor de presión atmosférica se utilizó el modelo ISA (International Standard Atmosphere) según la Ecuación 24 del presente trabajo de

investigación (Ítem 4.4.1.), la cual se basa en la altitud media de la zona de estudio (4 030.40 msnm) y la presión atmosférica a nivel del mar (1 013.25 mbar). Además, estos valores de presión según el modelo ISA se exponen en el **Anexo 6**.

La densidad del aire encontrada evidencia la realidad por su relación inversamente proporcional con la altitud. La cantidad de celdas de mallado garantizó que los resultados sean más cercanos a la realidad, pero también significó un mayor costo computacional. El número de iteraciones para la convergencia fue de 303 iteraciones, por lo que se pudo presentar residuales de presión menores de 0.001.

### **3.6. Evaluación crítica de los resultados**

Cucó (2017) menciona que la velocidad del viento varía según la altura, a mayor altura la velocidad del viento es mayor y a menor altura la velocidad del viento es mucho menor por presencia de obstáculos. Esta relación se simboliza mediante un perfil de velocidades usando un modelo logarítmico, el mencionado modelo resultó significativo para la simulación fluidodinámica representando de forma muy acertada según el comportamiento del viento respecto al suelo.

Fábregas & Márquez (2022) resaltan la viabilidad de proyectos que se enfoquen en el aprovechamiento de energía eólica a través de dispositivos como los aerogeneradores ante la presencia de velocidades de viento mayores o iguales a 2 m/s. Además, según la ficha técnica del aerogenerador SG 2.6-114, su velocidad de arranque es a partir de velocidades de 2 m/s (**Anexo 5**) demostrado en su curva de

potencia, con una potencia nominal(Cárdenas, 2019) de 2.625 MW. Entonces se resalta la viabilidad del estudio para velocidades de viento mayores o iguales a 2 m/s.

La distancia entre curvas de nivel en un diseño detallado suele ser de entre 1 y 8 metros dependiendo del relieve, por lo que si se piensa diseñar una representación geográfica de un terreno con precisión, se recomienda que las curvas de nivel estén distanciadas por 1 metro (Cárdenas, 2019). En el presente trabajo de investigación se buscó representar la zona geográfica de estudio con un alto grado de precisión puesto que el sólido generado se relacionó de forma directa a los resultados obtenidos en simulación. La distancia de 1 metro entre curvas de nivel llegó a ser fundamental para obtener un alto grado de detalle del sólido, pero significó un alto costo computacional.

El parque eólico de Talara posee una eficiencia energética de 38% y un promedio anual de producción de energía de 126 140.59 MWh superando los valores establecidos en el contrato, el parque eólico viene trabajando desde más de 10 años por lo que se encuentra óptimas condiciones teniendo presente que el máximo aprovechable teóricamente de la energía del viento es del 59% (Cedrón, 2021), de lo expuesto, se puede relacionar con el presente trabajo de investigación porque se valida la presencia de un significativo potencial eólico presente en una zona colindante a la mina Yanacocha que puede ser fácilmente aprovechable por la instalación de aerogeneradores de baja o alta potencia puesto que, independientemente de la eficiencia instalada, se destacó la presencia de altas velocidades de viento en la zona.

Para el análisis de Weibull, García (2019) se vio forzado a establecer valores medios para los parámetros de Weibull puesto que la desviación estándar de las

velocidades del viento no fue conocido, al presentar este inconveniente, se tiende a forzar el establecimiento de valores dentro de un rango al criterio del investigador pero con fundamento. En la presente investigación se trabajó con el estimador del rango mediana en base a la aplicación de la fórmula de Bernard para la obtención de los parámetros de forma y escala de Weibull resultando valores más exactos con decimales.

Para realizar el proceso de simulación se tiene que poseer un sólido correctamente mallado con énfasis en las paredes del sólido si es que se busca realizar mayor detalle en el análisis del desprendimiento de capa límite por medio de las herramientas que ofrece el software Ansys (Fábregas & Márquez, 2022). El estudio expuesto presenta la simulación fluido dinámica en el software RWIND 2.02 que no permite realizar un proceso complejo de “inflation” pero esto no fue necesario puesto que se trabajó a gran escala y el sólido representó una superficie geográfica de 22 km<sup>2</sup>.

## **CONCLUSIONES**

En función a las características meteorológicas presentes en la zona de estudio se pudo cuantificar el potencial eólico de 35.27 W en un área de un metro cuadrado a 50 metros sobre el nivel del suelo. Los aerogeneradores de eje horizontal vigentes en el mercado presentan un coeficiente de potencia entre 40% y 50% que, para este rango mencionado, la potencia extraíble se encontraría en entre 14.11 Wm<sup>2</sup> y 17.64 Wm<sup>2</sup>. Entonces, la energía promedio aprovechable bajo los mismos parámetros estaría entre los 423.28 Wm<sup>2</sup>h/mes y 529.10 Wm<sup>2</sup>h/mes.

Del estudio del emplazamiento se pudo afirmar que a 100 metros sobre el suelo existe una velocidad media del viento de 4.94 m/s, por lo que existe la presencia de 44.48 W de potencial eólico por cada metro cuadrado y si se piensa instalar un aerogenerador de alta potencia como uno de la gama Siemens Gamesa que poseen radios mayores de 50 metros con alturas de góndola que superan los 100 metros, podrían fácilmente cubrir un requerimiento de energía por debajo de los 4 716.6 KWh/mes por cada uno.

Del análisis estadístico de Weibull se logró obtener, para la distribución de datos numéricos de la velocidad del viento, un parámetro de forma de 3.3846 y un parámetro de escala de 3.5419, validando la presencia de una velocidad mínima de 0.98 m/s y una velocidad media del viento de 4.5723 m/s a 50 metros sobre el nivel del suelo, obteniéndose un potencial eólico de 35.27 W bajo estos parámetros.

En el software Civil 3D 2021, con apoyo de los softwares Global Mapper 24.1 y ArcGIS 10.8, se puede generar un sólido que represente una superficie geográfica, dependiendo de manera muy relevante de la capacidad del procesador que posea el ordenador para el manejo dinámico de una cantidad significativa de puntos o curvas geográficas.

El modelo K-epsilon ( $k-\epsilon$ ) utilizado para la simulación fluidodinámica resultó eficiente por su bajo costo computacional, definido en el régimen de flujo incompresible por presentar un valor de número de Mach menor a 0.3 y porque no existieron significativos diferenciales de presión adversa.

## **RECOMENDACIONES**

Para futuras propuestas de autoridades, instituciones o investigaciones afines al tema, se recomienda:

A organismos internacionales, cuya política es conservación del medio ambiente, actualizar periódicamente su metodología para fomentar la preservación de nuestros ecosistemas garantizando una vida saludable a la población mundial.

A las autoridades locales, regionales y nacionales, implementar políticas de mayor fomentación con respecto a la conservación del medio ambiente a través de la generación de energías de fuentes no convencionales para que cada ciudadano sea consciente de este proceso.

A las universidades nacionales y particulares, que implementen mallas curriculares donde se fomente la investigación con temas afines al aprovechamiento de energías no convencionales.

A la comunidad en su conjunto, tomar conciencia acerca de la contaminación ambiental y de las diferentes tecnologías existentes que aprovechan la energía de fuentes no convencionales.

Para un mayor detalle en el proceso de simulación, realizar un análisis proponiendo una comparativa entre: Modelos de mallado (estructurado y no estructurado) y modelos de turbulencia.

Se recomienda el uso de una computadora de escritorio con un procesador y tarjeta de video de alta gama para que el costo computacional en el proceso de diseño y simulación no sea muy significativo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alham, M. et al. (2022). Potential of wind energy and economic assessment in Egypt considering optimal hub height by equilibrium optimizer. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(101816), 1–12.  
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101816>

Autoridad Nacional del Agua. (2016). *Priorización de cuencas para la gestión de Recursos Hídricos*. Ministerio de Agricultura y Riego.  
<https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/99>

Betz, A. (1920). *Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren*. *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen*.

Cárdenas, J. (2019). *Diseño geométrico de carreteras*. Ecoe Edicione.  
[https://www.google.com.pe/books/edition/Diseño\\_geométrico\\_de\\_carreteras/MFYkEAAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0](https://www.google.com.pe/books/edition/Diseño_geométrico_de_carreteras/MFYkEAAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0)

Cedron, R. A. (2021). *Determinación Y Análisis De La Eficiencia Energética Del Parque Eólico De Talara* [Universidad Nacional del Santa].  
<https://repositorio.uns.edu.pe/handle/20.500.14278/3695>

Chereque Morán, W. (2010). *Hidrología para Estudiantes de Ingeniería Civil*. Pontificia Universidad Católica del Perú.  
<https://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/28689/hidrologia.pdf>

Cucó, S. (2017). *Manual de Energía Eólica*. Universitat Politècnica de València.  
<https://riunet.upv.es/handle/10251/77752?show=full>

Del Río Sánchez, S. (2017). *Diseño de un aerogenerador tipo H-Darrieus y estudio de la influencia del ángulo de pitch , mediante Mecánica de Fluidos Computacional*. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/25546>

El Peruano. (2021). *Proyecto eólico Duna y Huambos inaugurado en Cajamarca generará energía limpia*. El Peruano. <https://elperuano.pe/noticia/133790-proyecto-eolico-duna-y-huambos-inaugurado-en-cajamarca-generara-energia-limpia>

Fábregas, A., & Márquez, J. (2022). Simulación de un Aerogenerador para Uso Doméstico en el Departamento del Cesar [Universidad de Santander]. In *Universidad de Santander*. <https://repositorio.udes.edu.co/entities/publication/b83feb85-7a0f-48c9-a379-7423ba9b7406>

Frei, W. (2017). *Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application?* COMSOL Multiphysics. <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>

García González, J. (2019). *Simulación del aprovechamiento del recurso eólico urbano con tecnología Vortex Bladeless* [Universidad Carlos III de madrid]. [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/29997/TFG\\_Javier\\_Garcia\\_Gonzalez\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/29997/TFG_Javier_Garcia_Gonzalez_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Gestión. (2022). *Windx Perú obtiene concesión para desarrollar estudios de factibilidad en el Parque Eólico Huacho Sur*. Gestión. <https://gestion.pe/economia/windx-peru-obtiene-concesion-para-desarrollar-estudios-de-factibilidad-en-el-parque-eolico-huacho-sur-noticia/>

Google. (2023). *Google Earth*. Google. <https://earth.google.com/web/@->

6.63170628,-78.95056727,2094.36930825a,8941.37492091d,35y,0h,0t,0r

Herramientas de ingeniería. (2023). *Variación de la densidad del aire húmedo con la temperatura*. Herramientas de Ingeniería.

<https://www.herramientasingeneria.com/onlinecalc/spa/onlinecalcIndex.html>

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>

Ministerio de Energia y Minas. (2010). *MAPA MINERO 2010 - Unidades mineras en producción y proyectos en exploración*. Ministerio de Energia y Minas.

[https://www.minem.gob.pe/\\_publicacion.php?idSector=1&idPublicacion=238](https://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=1&idPublicacion=238)

Ministerio de Energia y Minas. (2016). Atlas Eólico Del Perú. *Ministerio de Energia 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)

Naess, A., Drengson, A., & Deavall, B. (2008). *The Ecology of Wisdom*.

Counterpoint. <https://www.counterpointpress.com/books/the-ecology-of-wisdom-2/>

OSINERGMIN. (2019). Relación actual y futura entre el sector minero y el sector eléctrico. *Reporte de Análisis Económico Sectorial, Año 8*, 5–6.

<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11367/SG-SST>

BASADO EN OHSAS 18001 PARA SOSAMET S.A.S.

FINAL.pdf?sequence=1

Rozzi, R. (2014). *Linking Ecology and Ethics for a Changing World: Values, Philosophy, and Action*. Springer Netherlands.

[https://www.google.com.pe/books/edition/Linking\\_Ecology\\_and\\_Ethics\\_for\\_a\\_Changin/4RI8AwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0](https://www.google.com.pe/books/edition/Linking_Ecology_and_Ethics_for_a_Changin/4RI8AwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0)

Siemens Gamesa. (2024). *SG 2.6-114 Aerogenerador onshore*. Siemens Gamesa.

<https://www.siemensgamesa.com/es-es/products-and-services/onshore/aerogenerador-sg-2-6-114>

Taylor, P. (1986). *Respect for Nature*. Princeton University Press.

[https://www.google.com.pe/books/edition/Respect\\_for\\_Nature/SzXwxu\\_PydUC?hl=es-419&gbpv=0](https://www.google.com.pe/books/edition/Respect_for_Nature/SzXwxu_PydUC?hl=es-419&gbpv=0)

Troen, I., & Lundtang Petersen, E. (1990). *El Atlas Eólico Europeo*. Risø National Laboratory.

Vallejo Díaz, A., Herrera Moya, I., Fernández Bonilla, A., & Pereyra Mariñez, C. (2022). Wind energy potential assessment of selected locations at two major cities in the Dominican Republic, toward energy matrix decarbonization, with resilience approach. *Thermal Science and Engineering Progress*, 32.

<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101313>

World Vision. (2014). Manual de Manejo de Cuencas. *Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, 153. [https://www.uv.mx/oabcc/files/2018/11/MANUAL-DE-MANEJO-DE-CUENCAS\\_COMPLETO.pdf](https://www.uv.mx/oabcc/files/2018/11/MANUAL-DE-MANEJO-DE-CUENCAS_COMPLETO.pdf)

## ANEXOS

### Anexo 1: Formato de importación de datos de humedad relativa de la plataforma POWER Data Acces Viewer

-BEGIN HEADER-

NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Monthly and Annual

Dates (month/day/year): 01/01/2013 through 12/31/2022

Location: Latitude -6.9962 Longitude -78.5148

Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region = 2749.53 meters

The value for missing source data that cannot be computed or is outside of the sources availability range: -999

Parameter(s):

RH2M MERRA-2 Relative Humidity at 2 Meters (%)

-END HEADER-

PARAMETER	YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
RH2M	2013	72.5	75.31	77.69	70.88	72.38	67.69	62.62	62.75	58.88	68.94	60.81	70.56	68.38
RH2M	2014	73.25	74.12	78.5	72.88	75.06	67	60.56	59.38	62.81	64.19	67.69	72.62	69
RH2M	2015	73.44	76.44	80.06	77.44	76.5	68.19	64.56	59.44	60.5	65.19	68.19	67.38	69.75
RH2M	2016	72.31	77.69	78.25	76.25	68.19	63.88	60.12	59.62	60.75	64.94	59.12	74.19	67.94
RH2M	2017	76	76.06	82.44	78.62	77.44	69.19	61.25	62.62	62.31	66.81	66.44	78.94	71.5
RH2M	2018	78.94	79.94	80.31	80.19	79	71.88	66.69	62.19	62.12	66.75	73.69	71.25	72.69
RH2M	2019	72.69	79.38	81.25	78.81	74.44	65.38	63.38	57.5	61.62	69.25	72	76.44	70.94
RH2M	2020	72	74.19	74	75.56	70.12	64.88	70.62	61.94	63.62	62	60.5	78.31	69
RH2M	2021	78	72.62	76.06	73.94	68.44	67.25	61.5	60.88	63.25	71.06	68.94	75.12	69.75
RH2M	2022	72.94	78.75	81.06	80.38	75.25	70.88	65.25	62.38	63.62	59	58	69.44	69.69

## Anexo 2: Formato de importación de datos de temperatura de la plataforma POWER Data Acces Viewer

-BEGIN HEADER-

NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Monthly and Annual

Dates (month/day/year): 01/01/2013 through 12/31/2022

Location: Latitude -6.9962 Longitude -78.5148

Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region = 2749.53 meters

The value for missing source data that cannot be computed or is outside of the sources availability range: -999

Parameter(s):

T2M MERRA-2 Temperature at 2 Meters (C)

-END HEADER-

PARAMETER	YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
T2M	2013	15.15	14	14.36	14.89	14.23	13.85	13.41	14.52	15.38	14.9	14.31	14.4	14.45
T2M	2014	14.37	14.34	13.73	14.68	14.38	14.53	14.62	14.71	15.13	15.1	14.46	14.57	14.55
T2M	2015	14.58	14.23	13.97	14.08	14.26	13.89	14.65	15.4	16.11	16.01	15.29	16.17	14.9
T2M	2016	15.65	15.37	15.28	15.06	15.44	13.95	14.41	15.35	15.67	15.07	14.82	14.23	15.02
T2M	2017	13.72	13.47	13.8	14.16	14.02	14.15	13.99	15.02	15.55	15.51	14.31	13.87	14.3
T2M	2018	13.37	13.66	13.95	13.3	13.71	12.88	13.48	14.24	15.28	14.84	14.66	14.38	13.98
T2M	2019	14.65	14.65	14.37	14.44	14.62	14.21	14.25	14.92	15.34	14.79	14.65	14.56	14.62
T2M	2020	14.84	15.4	14.83	14.8	15.13	14.96	14.3	15.12	15.4	15.47	14.83	13.72	14.9
T2M	2021	13.94	14.55	13.64	14.76	14.63	14.3	14.22	14.96	15	15.3	14.37	14.3	14.5
T2M	2022	13.94	13.55	13.42	13.94	14.3	13.26	14.12	14.73	15.36	15.23	15.55	14.1	14.3

### Anexo 3: Formato de importación de datos de dirección del viento de la plataforma POWER Data Acces Viewer

---

-BEGIN HEADER-

NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Daily Data

Dates (month/day/year): 01/01/2013 through 12/31/2022

Location: Latitude -6.9962 Longitude -78.5148

Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region = 2749.53 meters

The value for missing source data that cannot be computed or is outside of the sources availability range: -999

---

Parameter(s):

WD50M MERRA-2 Wind Direction at 50 Meters (Degrees)

-END HEADER-

---

YEAR	MO	DY	WD50M
2013	1	1	136.62
(...)	(...)	(...)	(...)
2022	12	31	190.31

---

**Anexo 4:** Coordenadas UTM - Zona 17 M que representan la Zona de Estudio para el diseño y simulación

Coordenadas UTM - Zona 17 M que representan la Zona de Estudio para el diseño y simulación							
A partir de Google Earth Pro				A partir de ArcGIS 10.8			
Item	Sur	Este	Altitud	Item	Sur	Este	Altitud
1	9218646.49	772733.41	3550.00	1	9218558.04	772847.17	3550.00
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
366438	9230630.82	781411.45	4180.00	748462	9230731.02	781488.05	4180.00

## Anexo 5: Ficha Técnica Aerogenerador Onshore SG 2.6-114



SG 2.6-114

**Incremento de potencia nominal**



**Incremento curva de potencia SG 2.6-114 vs. SG 2.1-114**



### Tecnología con amplia experiencia y validación

SG 2.6-114: evolución inteligente para mejorar la producción en vientos medios y altos

---

**Siemens Gamesa, su aliado tecnológico de confianza**

Una de las claves del éxito de Siemens Gamesa es el desarrollo constante de nuevos y avanzados productos adaptados al caso de negocio de cada cliente. Nos esforzamos por ofrecer las mejores soluciones tecnológicas para cada proyecto, al tiempo que reducimos el Coste de Energía para garantizar retornos a largo plazo.

Por esta razón, ponemos a disposición de nuestros clientes un catálogo de producto

optimizado y eficiente, avalado por tecnologías ampliamente validadas, y por nuestras mejores credenciales:

- La confianza de nuestros clientes: más de 117 GW instalados en todo el mundo.
- Una experiencia acreditada a lo largo de más de 40 años de actividad que convierte a Siemens Gamesa en un referente para sus proyectos eólicos.
- Y el reconocimiento del sector.

optimizado y eficiente, avalado por tecnologías ampliamente validadas, y por nuestras mejores credenciales:

- Tecnología de paso y velocidad variables para maximizar la energía producida.
- Sistema Siemens Gamesa de yaw activo para asegurar una óptima adaptación a terrenos complejos.
- Siemens Gamesa SMP: sistema de mantenimiento predictivo.
- Tecnología de bordes serrados de pala DinoTails® Next Generation y sistema de control Siemens Gamesa NRS® que minimizan el ruido emitido.
- Siemens Gamesa WindNet® PRO: sistema de control y monitorización remota con acceso web.

### Mayor producción energética

La incorporación de una pala de 56 metros, diseñada por Siemens Gamesa con las tecnologías más avanzadas y reforzada específicamente para emplazamientos de vientos altos y moderados, junto con un generador 2.625 MW contribuyen a obtener más de un 13% de producción, así como una significativa reducción del Coste de Energía respecto al modelo SG 2.1-114. De esta manera, SG 2.6-114 se convierte en una de las soluciones más eficientes y rentables a disposición de nuestros clientes.

### Versatilidad y amplia experiencia

Avalada por su fiabilidad, con una disponibilidad media de flota superior al 98%, y por su amplia experiencia, la plataforma Siemens Gamesa 2.X destaca por su versatilidad y máximo

rendimiento en todo tipo de emplazamientos y condiciones de viento. Su catálogo de rotores y de alturas de torre (63-153 metros), así como diferentes opciones ambientales conforman una excelente propuesta para extraer la máxima energía del viento con la mayor eficiencia.

### Especificaciones técnicas

Datos generales	
Potencia nominal	2.625 MW <sup>(1)</sup>
Clase de viento	IEC IA/IIA/S
Control	Pitch y velocidad variable
Temperatura operativa estándar	Rango desde -20°C hasta 35°C <sup>(2)</sup>
Rotor	
Díámetro	114 m
Área de barrido	10.207 m <sup>2</sup>
Densidad de potencia	257,18 W/m <sup>2</sup>
Pala	
Longitud	56 m
Perfil	Siemens Gamesa
Material	Fibra de vidrio reforzada con resina de epoxi o poliéster
Torre	
Tipo	Diferentes tecnologías disponibles
Altura	63, 68, 75, 80, 93, 125 m y según emplazamiento
Multiplicadora	
Tipo	3 etapas
Generador	
Tipo	Doblemente alimentado
Tensión	690 V AC
Frecuencia	50 Hz/60 Hz
Clase de protección	IP 54
Factor de potencia	0,95 CAP-0,95 IND en todo el rango de potencias <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Potencia flexible de hasta 2,9 MW disponible para la variante CS dependiendo de las condiciones del emplazamiento.

<sup>(2)</sup> Diferentes versiones y kits opcionales para adaptar la máquina a altas o bajas temperaturas y ambientes salino y polvoriento.

<sup>(3)</sup> Factor de potencia en bornas de salida del generador en el lado de baja tensión antes de la entrada del transformador.

*Fuente.* En la mencionada ficha técnica se evidencia la curva de poder. Tomado de *Siemens Gamesa* (p.1), por Siemens Gamesa,(2024).

**Anexo 6:** Presión Atmosférica según el modelo ISA (International Standard Atmosphere)

Presión Atmosférica según el modelo ISA (International Standard Atmosphere) a partir de Coordenadas UTM - Zona 17 M obtenidas del software ArcGIS 10.8

A partir de Google Earth Pro				
Item	Sur	Este	Altitud	Presión
1	9218558.036	772847.172	3550.00	653.42
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
748462	9230731.019	781488.052	4180.00	602.08

**Anexo 7:** Formato de importación de datos de velocidad del viento de la plataforma POWER Data Acces Viewer para los puntos P1 (Latitud -6.9838; Longitud -78.4594), P2 (Latitud -6.9945; Longitud -78.4508) y P3 (Latitud -7.0116; Longitud -78.4520)

-BEGIN HEADER-

NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Daily Data

Dates (month/day/year): 01/01/2013 through 12/31/2022

Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region = 2749.53 meters

The value for missing source data that cannot be computed or is outside of the sources availability range: -999

Parameter(s):

Location: Latitude -6.9838 Longitude -78.4594

WS50M MERRA-2 Wind Speed at 50 Meters (m/s)

-END HEADER-

YEAR	MO	DY	WS50M
2013	1	1	2.583
(..)	(..)	(..)	(..)
2022	12	31	3.124

Parameter(s):

Location: Latitude -6.9945 Longitude -78.4508

WS50M MERRA-2 Wind Speed at 50 Meters (m/s)

-END HEADER-

YEAR	MO	DY	WD50M
2013	1	1	2.584
(..)	(..)	(..)	(..)
2022	12	31	3.123

Parameter(s):

Location: Latitude -7.0116 Longitude -78.4520

WS50M MERRA-2 Wind Speed at 50 Meters (m/s)

-END HEADER-

YEAR	MO	DY	WD50M
2013	1	1	2.581
(..)	(..)	(..)	(..)
2022	12	31	3.122

**Anexo 8:** Velocidad promedio del viento para los puntos P1 (Latitud -6.9838; Longitud -78.4594), P2 (Latitud -6.9945; Longitud -78.4508) y P3 (Latitud -7.0116; Longitud -78.4520) a partir de la plataforma POWER Data Acces Viewer

---

-BEGIN HEADER-

NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Daily Data

Dates (month/day/year): 01/01/2013 through 12/31/2022

Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region = 2749.53 meters

The value for missing source data that cannot be computed or is outside of the sources availability range: -999

---

Parameter(s):

WS50M MERRA-2 Wind Speed at 50 Meters (m/s)

-END HEADER-

---

YEAR	MO	DY	WS50M
2013	1	1	2.58
(..)	(..)	(..)	(..)
2022	12	31	3.12

---



ISBN: 978-9942-696-06-9

