



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**Evaluación del Potencial Eólico del Distrito de Calca, Provincia
de Calca, Cusco 2017-2022.**

Línea de Investigación: Energías Renovables

Presentado por: Bach. Ricardo Cantero Rado

(Código ORCID: 0000-0002-7113-6533)

Para optar al Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesora: Dra. Blga. Violeta E. Zamalloa Acurio

(Código ORCID: 20000-0002-7130-3362)

CUSCO – PERÚ

2023



Metadatos

Datos del autor	
Nombres y Apellidos:	Ricardo Cantero Rado
Número de documento de identidad:	76915450
URL de Orcid:	https://orcid.org/0000-0002-7113-6533
Datos del asesor	
Nombres y Apellidos:	Violeta Eugenia Zamalloa Acurio
Número de documento de identidad:	23867865
URL de Orcid:	https://orcid.org/20000-0002-7130-3362
Datos del jurado	
Presidente del jurado (jurado 1)	
Nombres y Apellidos:	FELIO CALDERON LA TORRE
Número de documento de identidad:	25310696
Jurado 2	
Nombres y Apellidos:	BRUNO GARCIA LEIVA
Número de documento de identidad:	44398560
Jurado 3	
Nombres y Apellidos:	ANGELA FIORELLA SOTA CANO
Número de documento de identidad:	44538035
Jurado 4	
Nombres y Apellidos:	JUAN JOSE ZUÑIGA NEGRON
Número de documento de identidad:	23989604
Datos de la investigación	
Línea de investigación de la Escuela Profesional:	Energías Renovables



ENERGIA EOLICA

por Ricardo Cantero Rado

Fecha de entrega: 27-oct-2023 04:03p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2209416984

Nombre del archivo: TESIS_Ricardo_Cantero_Rado_EPIA_final.pdf (9.56M)

Total de palabras: 38154

Total de caracteres: 184180



¹
UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**Universidad
Andina
del Cusco**

Tesis

¹⁶
**Evaluación del Potencial Eólico del Distrito de Calca, Provincia
de Calca, Cusco 2017-2022.**

Línea de Investigación: Energías Renovables

Presentado por: Bach. Ricardo Cantero Rado

¹
Para optar al Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesora: Dra. Blga. Violeta E. Zamalloa Acurio

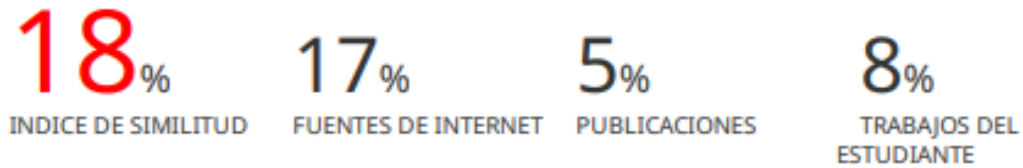
CUSCO - PERÚ

2023



ENERGIA EOLICA

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	docplayer.es Fuente de Internet	1%
4	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	Submitted to Universidad Europea de Madrid Trabajo del estudiante	1%
6	www.osinergmin.gob.pe Fuente de Internet	<1%
7	es.weatherspark.com Fuente de Internet	<1%
8	pirhua.udep.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	Submitted to Universidad de Deusto Trabajo del estudiante	<1%

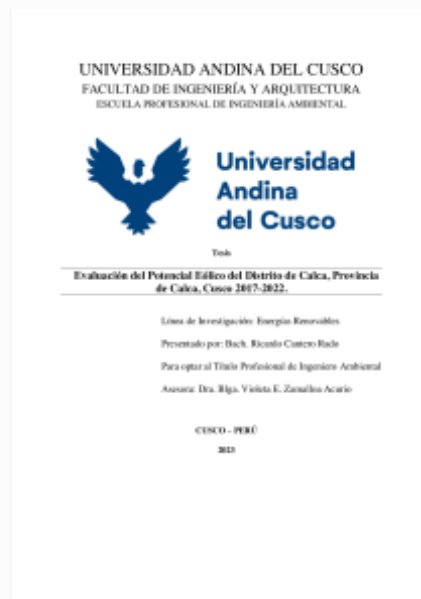


Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Ricardo Cantero Rado
Título del ejercicio: TESIS
Título de la entrega: ENERGIA EOLICA
Nombre del archivo: TESIS_Ricardo_Cantero_Rado_EPIA_final.pdf
Tamaño del archivo: 9.56M
Total páginas: 169
Total de palabras: 38,154
Total de caracteres: 184,180
Fecha de entrega: 27-oct.-2023 04:03p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2209416984



Derechos de autor 2023 Turnitin. Todos los derechos reservados.



Dedicatoria

A Dios, si bien en esta etapa de mi vida tengo demasiadas dudas, y voy en busca de respuestas, confío en Dios, que trasciende el tiempo y la materia, al ser omnipotente, omnisapiente y omnipresente, aquel creador de todo, de esta naturaleza tan bella que me ha hecho querer cuidarla, de este mundo, de este universo tan impresionante, que tanto me ha cautivado con sus leyes y teorías.

A mis padres Mauro Cantero Villasante y Mónica Rado Arcondo, que desde que nací han sido las personas que más me han apoyado y guiado en todas mis decisiones, me brindaron amor y así mismo aprendí a darlo, gracias con mucho amor por todo el apoyo incondicional que me dieron en esta etapa académica.

A mi asesora, la Dra. Blga. Violeta E. Zamalloa Acurio, sin su apoyo y su impulso no habría sido posible la culminación de esta investigación.

A mis hermanos y mi hermana, a todos mis más sinceros amigos, a todos mis compañeros que bien y mal me han enseñado muchas cosas de lo que quiero y no quiero en mi vida, a mis profesores, a aquellos grandes maestros que han sido parte fundamental de mi formación.



Agradecimientos

Gracias a mis queridos padres, por el apoyo incondicional, el amor y la motivación que me dieron y dan.

A mi asesora Dra. Blga. Violeta E. Zamalloa Acurio, por su tiempo, impulso, el acompañamiento continuo y especialmente la paciencia que me ha brindado a lo largo de esta investigación.

A mis dictaminantes: Mgt. Ing. Juan José Zuñiga y Mgt. Blga. Angela F. Sota Cano, por su tiempo y sus observaciones que hicieron que esta investigación mejorara.

A cada uno de los docentes de la escuela profesional de Ingeniería Ambiental, mencionando a las que más calcaron en mí por sus enseñanzas y coherencia: Mgt. Ing. Bitia Chavez, Dra. Blga. Veronika Vera, Dra. Blga. Violeta Zamalloa, Mgt. Ing. Jannette Delgado. Gracias por impartir conocimientos, valores y principios a lo largo de esta vida universitaria.

A cada una de las personas que han compartido conmigo sonrisas, alegrías, tristezas, esfuerzos, días y noches.



Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el potencial eólico del distrito de Calca, en el periodo 2017-2022. La investigación se diseñó como no experimental, de tipo básica y nivel descriptivo. La muestra utilizada consistió en datos de viento recopilados entre 2017 y 2022 de la estación automática del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) con código 472976f8, ubicada en Calca, con coordenadas Longitud: 71°57'18.85"O y Latitud: 13°19'59.97"S. Se recopiló los datos, se midió la velocidad y dirección del viento considerando la temperatura y humedad del aire, lo que permitió determinar la densidad del aire, se realizó análisis estadístico descriptivo cuantitativo con IBM SPSS Statistics V23 y se evaluó el potencial eólico utilizando el software WAsp Climate Analyst 3. Los resultados indicaron que las velocidades de viento en el punto de estudio del distrito de Calca son insuficientes para el desarrollo de energía eólica a gran escala, con una velocidad promedio de 1.28 m/s a 1.9 m/s y una densidad de energía eólica promedio de 7 a 29 W/m². Estos resultados podrían ser útiles para turbinas mini eólicas. Aunque existen áreas en el distrito de Calca con velocidades superiores según los atlas eólicos, sin embargo, no se disponía de datos de parámetros de viento para su evaluación. En conclusión, se determinó la energía potencial en el punto de estudio del distrito de Calca durante el periodo 2017-2022 es capaz de proporcionar energía eléctrica, con una densidad de energía eólica media desde 7.27 W/m² a 11 W/m² a 10 metros sobre el suelo, hasta 28.59 W/m² a 43 W/m² a la altura de 100 metros sobre el suelo.

Palabras Clave: *Energía Eólica, Potencial Eólico, Densidad de Energía Eólica.*



Abstract

The present research aimed to evaluate the wind potential of the Calca district during the period 2017-2022. The research was designed as non-experimental, basic in type, and descriptive in nature. The sample used consisted of wind data collected between 2017 and 2022 from the automated station of the National Meteorology and Hydrology Service (SENAMHI) with code 472976f8, located in Calca, with coordinates Longitude: 71°57'18.85"W and Latitude: 13°19'59.97"S. Data was collected, and wind speed and direction were measured, taking into account temperature and air humidity, which allowed determining the air density. Descriptive statistical analysis was performed using IBM SPSS Statistics V23, and the wind potential was evaluated using the WAsp Climate Analyst 3 software. The results indicated that wind speeds at the study point in the Calca district were insufficient for large-scale wind energy development, with an average speed ranging from 1.28 m/s to 1.9 m/s and an average wind energy density of 7 to 29 W/m². These results could be useful for mini wind turbines. Although there are areas in the Calca district with higher speeds according to wind atlases, there was no available wind parameter data for their evaluation. In conclusion, the potential energy at the study point of the Calca district during the period 2017-2022 was determined to be capable of providing electrical energy, with an average wind energy density from 7.27 W/m² to 11 W/m² at 10 meters above the ground, up to 28.59 W/m² to 43 W/m² at the height of 100 meters above the ground.

Key Words: *Wind Energy, Wind Potential, Wind Energy Density.*



Introducción

Los efectos del cambio climático, el calentamiento global y el crecimiento de la demanda de energía eléctrica han motivado que se esté cambiando la forma en que generamos energía, pasando de fuentes fósiles a fuentes de energía limpias y renovables basadas en los Recursos Energéticos Renovables (RER). Los RER son inagotables, como la energía solar-fotovoltaica, energía eólica, energía geotérmica, etc., los que se pueden aprovechar de acuerdo a las características de la zona en la que se encuentran. Sin embargo, el aprovechamiento de estas dependerá de estudios de las condiciones meteorológicas, geográficas, físicas, biológicas, económicas y sociales del lugar de estudio.

Dentro de las energías renovables convencionales, la energía eólica es una de las que ha tenido un crecimiento remarcable de su capacidad instalada a nivel mundial, desde el 2004 al 2019 tuvo una tasa anual típica de aumento de la capacidad superior al 10%, siendo la capacidad instalada mundial al 2019 mayor a 600 GW (Burton et al., 2021).

Según Lu et al. (2009): predicen que el potencial global de energía eólica es de 840 000 Tera Watts hora (TW/h) por año basado en el conjunto de datos del Sistema de Observación de la Tierra Goddard (GEOS-5 DAS). Por otro lado, Hoogwijk y Graus (2008) al emplear un modelo más restringido, estiman que la capacidad global de recursos eólicos para generar electricidad es de 110 000 TW/h por año, por lo tanto la estimación del potencial eólico total varía considerablemente entre estos dos autores.

Por otro lado, en el Perú de 2008, el Ministerio de Energía y Minas realizó el primer Atlas Eólico, el cual utilizó técnicas de modelización meso y micro escalares, y lo combinó con la utilización de un modelo de simulación atmosférica para producir los patrones de viento a gran escala. Más adelante, en 2016, se hizo una actualización de este estudio que resultó en el Atlas Eólico del Perú (MINEM, 2016). Según el Atlas Eólico del Perú, a nivel mundial en 2015 se instaló una capacidad total de energía eólica de 432 883 MW, lo que representa 0.432883 TW.



En otras palabras, solo se está aprovechando el 0,00039353% de la capacidad global de recursos eólicos según el modelo de Hoogwijk y Graus. El Atlas Eólico del Perú también indica que el Perú está explotando 231 MW de su potencial total de 20 493 MW, lo que representa el 1% de su capacidad (MINEM, 2016). Para aprovechar todo este potencial, el Perú ha desarrollado un Plan Energético Nacional 2014-2025 con el objetivo de que el 60% de la energía eléctrica sea producto de fuentes renovables para 2025.

En 2018, según Osinergmin (2019) el 55% de la energía eléctrica del Perú fue generada por hidroeléctricas, el 37% por centrales térmicas a base de gas natural y casi el 8% de recursos energéticos renovables (RER). De este último, solo el 2,9% provino de la energía eólica. Es importante tener en cuenta que, si bien estas cifras pueden llevar a muchas personas a pensar que el país está generando energía limpia, la matriz energética primaria del Perú se compone en un 47% de energía producida a base de petróleo.

Se ha difundido más el aprovechamiento de energía solar que el aprovechamiento de energía eólica. Según Callasi (2020), en Cusco, hay avances en la implementación de energías renovables, pero mayor en materia de energía fotovoltaica. Se ha implementado sistemas de paneles fotovoltaicos a nivel doméstico en distritos alejados y comunidades rurales, donde la red de distribución de energía no llega.

Este trabajo de investigación se enfoca en la energía eólica, vemos que esta solo se puede aprovechar en ciertos lugares, por ello se necesita realizar estudios y medición de recursos eólicos adecuados. Shi & Erdem (2017) menciona que: Para realizar un estudio de este tipo, es importante desarrollar un plan y un marco de garantía de calidad sólida asociada con cada programa de potencial eólico. Por tanto, la medición, el equipo y la selección de aparatos deben tener estándares aceptables y la recopilación de datos y los esquemas de análisis son aspectos importantes que se debe considerar. Una evaluación de los recursos eólicos exitoso debe presentar lo siguiente: descripción de los aspectos principales de un programa de evaluación



del potencial eólico, esto involucra instrumentación, manejo de datos, análisis preliminar y análisis posterior. Implica también la implementación de muchas tareas, como la selección de sitios eólicos, el micrositing y la captura precisa de los perfiles de flujo de viento existentes. No solo es importante la evaluación de la energía eólica, sino también las previsiones precisas de la velocidad del viento y la energía eólica son consideraciones importantes para aprovechar todo el potencial de los recursos eólicos.

La presente investigación es uno de los primeros trabajos sobre energía eólica a nivel local, y tiene como objetivo evaluar el potencial eólico del distrito de Calca, para obtener información científica que impulse el desarrollo e implementación de la energía eólica en los distritos de Calca, en la región Cusco y en el Perú.



Índice General

Dedicatoria	vii
Agradecimientos.....	viii
Resumen	ix
Abstract	x
Introducción	xi
Índice General	xiv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xviii
Índice de Ecuaciones	xx
Capítulo I.....	22
1. Fundamentación del Tema de Investigación.	22
1.1. Descripción del Problema de Investigación	22
1.2. Área de Investigación	22
1.3. Formulación del Problema de Investigación	22
1.3.1. Problema General	22
1.3.2. Problemas Específicos.....	22
1.4. Objetivos de la Investigación.....	23
1.4.1. Objetivo General	23
1.4.2. Objetivos Específicos	23
1.5. Justificación de la Investigación	23
1.5.1. Conveniencia	24
1.5.2. Relevancia Social	24
1.5.3. Implicancia Practica	24
1.5.4. Valor Teórico	25
1.5.5. Utilidad Metodológica.....	25
1.6. Delimitación Espacial	25
1.7. Criterios Necesarios para la Ubicación de la Investigación	27
1.8. Delimitación Temporal	32
Capítulo II	33
2. Marco Teórico.....	33
2.1. Antecedentes.....	33
2.1.1. Internacional:.....	33
2.1.2. Nacional:	36
2.1.3. Local:.....	37
2.2. Marco Normativo.....	38
2.3. Bases Teórico-Científicas	40



2.3.1. Energía	40
2.3.2. Fuentes de Energía	40
2.3.3. Energía Renovable	40
2.3.4. Energía Eólica	41
2.3.5. Sistemas mixtos o híbridos.....	42
2.3.6. Importancia de la Energía Eólica	43
2.3.7. Evaluación del Potencial Eólico.....	44
2.3.8. Potencia Eólica Aprovechable	46
2.3.9. Densidad del Aire.....	48
2.3.10. Clasificación Climática Thornthwaite	52
2.3.11. Zonas de Vida Holdridge	53
2.3.12. Distribuciones de Weibull.....	55
2.3.13. Clasificación Estándar del Viento o Clases de Energía Eólica	55
2.4. Marco Conceptual:.....	56
2.4.1. Energía Eólica:	56
2.4.2. Parques Eólicos:	57
2.4.3. Potencial Eólico:	57
2.4.4. Densidad de Energía Eólica:	57
2.4.5. Mapa Eólico:	57
2.4.6. Micro Escala:.....	58
2.4.7. Evaluación:.....	58
2.5. Hipótesis	58
2.5.1. Hipótesis General	58
2.5.2. Hipótesis Específicas.....	58
2.6. Variables	59
2.6.1. Identificación de Variables.....	59
2.6.1.1. Variable de Caracterización:	59
2.6.1.2. Variable de Interés.....	59
2.6.2. Operacionalización de Variables.....	59
2.6.2.1. Variable de Caracterización.....	59
2.6.2.2. Variable de Interés.....	60
Capítulo III	61
3. Metodología.....	61
3.1. Diseño de Investigación.....	61
3.2. Nivel de Investigación	61
3.3. Tipo de Investigación	61
3.4. Población y Muestra	61



3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	62
3.5.1. Instrumentos Mecánicos y Electrónicos.....	62
3.5.2. Análisis de Indicadores, Fórmulas y Ecuaciones	62
3.5.3. Validez y confiabilidad de instrumentos.....	64
3.5.4. Desarrollo de la metodología	65
3.5.4.1. Determinación de la velocidad y dirección promedio del viento del distrito de Calca	66
3.5.4.2. Cálculo de la densidad promedio del viento del distrito de Calca.....	66
3.5.4.3. Evaluación del potencial eólico del distrito de Calca.....	67
Capítulo IV.....	69
4. Resultados.....	69
4.1. Determinación de Estadísticos Descriptivos de la Velocidad, Dirección, Densidad y Energía Eólica del Viento del Distrito de Calca	69
4.1.1. Estadísticos Descriptivos a 10 metros.....	69
4.1.2. Estadísticos Descriptivos a 30 metros.....	71
4.1.3. Estadísticos Descriptivos a 50 metros.....	72
4.1.4. Estadísticos Descriptivos a 80 metros.....	74
4.1.5. Estadísticos Descriptivos a 100 metros.....	75
4.2. Evaluación del Potencial Eólico del Distrito de Calca	76
4.2.1. Análisis del Potencial Eólico a 10 metros.....	76
4.2.1.1. Variaciones Horarias y Estacionales del Viento a 10 metros.....	81
4.2.2. Análisis del Potencial Eólico a 30 metros.....	83
4.2.2.1. Variaciones Horarias y Estacionales del Viento a 30 metros.....	88
4.2.3. Análisis del Potencial Eólico a 50 metros.....	90
4.2.3.1. Variaciones Horarias y Estacionales del Viento a 50 metros.....	95
4.2.4. Análisis del Potencial Eólico a 80 metros.....	97
4.2.4.1. Variaciones Horarias y Estacionales del Viento a 80 metros.....	102
4.2.5. Análisis del Potencial Eólico a 100 metros.....	104
4.2.5.1. Variaciones Horarias y Estacionales del Viento a 100 metros.....	108
4.3. Determinación de la Producción de Energía Anual (AEP)	110
4.3.1. AEP a 10 metros.....	110
4.3.2. AEP a 30 metros.....	111
4.3.3. AEP a 50 metros.....	112
4.3.4. AEP a 80 metros.....	113
4.3.5. AEP a 100 metros.....	114
Capítulo V.....	116
5. Discusión de Resultados	116
5.1. Descripción de los Hallazgos más Relevantes y Significativos	116



5.1.1. Comparación de Estadísticos Descriptivos entre 10, 30, 50, 80 y 100 metros 116	116
5.1.2. Comparación WASP entre 10, 30, 50, 80 y 100 metros.....	117
5.1.3. Comparativa entre variaciones estacionales, velocidad media y variaciones horarias a 10, 30, 50, 80 y 100 metros.....	119
5.1.4. Potencia Eólica Aprovechable	120
5.2. Limitaciones del Estudio	120
5.3. Comparación Crítica con la Literatura Existente.....	121
5.3.1. Contrastación con Hipótesis Específica N°1	121
5.3.2. Contrastación con Hipótesis Específica N°2.....	123
5.3.3. Contrastación con Hipótesis Específica N°3.....	125
5.3.4. Contrastación con Hipótesis General	125
5.4. Implicancias del Estudio.....	127
Conclusiones	128
Recomendaciones.....	129
Referencias.....	130
Anexos.....	134
Anexo A. Matriz de Consistencia	134
Anexo B. Histogramas de Frecuencias	137
Anexo C. Rosas de Viento y Distribución de Weibull a 10, 30, 50, 80 y 100 metros..	155
Anexo D. Hoja de Cálculo elaborada para la presente investigación	170
Anexo E. Hojas técnicas de Turbinas Eólicas	171

Índice de Tablas

Tabla 1	Tipos de RER No Convencionales y Tecnologías de Generación Eléctrica	41
Tabla 2	Valores del Exponente de Hellamnn en función de la Rugosidad del Terreno.	52
Tabla 3	Clases de Energía Eólica Medidas a 50 m Sobre el Suelo de acuerdo con la Clasificación Basada en la Densidad de Energía Eólica NREL.....	56
Tabla 4	Clases de Densidad de Potencial Eólico (WPD).....	56
Tabla 5	Matriz de Operacionalización de Variable de Caracterización.....	59
Tabla 6	Matriz de Operacionalización de Variable de Interés	60
Tabla 7	<i>Matriz de Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos</i>	63
Tabla 8	Estadísticos Descriptivos a 10 metros.....	69
Tabla 9	Estadísticos Descriptivos a 30 metros.....	71
Tabla 10	Estadísticos Descriptivos a 50 metros	73
Tabla 11	Estadísticos Descriptivos a 80 metros	74
Tabla 12	Estadísticos Descriptivos a 100 metros	75
Tabla 13	Clima de Viento y Potencial Eólico a 10 metros.....	77
Tabla 14	Velocidades Medias del Viento (cada hora, por mes) a 10 metros	81
Tabla 15	Velocidades Medias del Viento (cada año, por mes) a 10 metros.....	82
Tabla 16	Clima de Viento y Potencial Eólico a 30 metros.....	84



Tabla 17	Velocidades Medias del Viento (cada hora, por mes) a 30 metros	88
Tabla 18	Velocidades Medias del Viento (cada año, por mes) a 30 metros.....	89
Tabla 19	Clima de Viento y Potencial Eólico a 50 metros.....	91
Tabla 20	Velocidades Medias del Viento (cada hora, por mes) a 50 metros	95
Tabla 21	Velocidades Medias del Viento (cada año, por mes) a 50 metros.....	96
Tabla 22	Clima de Viento y Potencial Eólico a 80 metros.....	98
Tabla 23	Velocidades Medias del Viento (cada hora, por mes) a 80 metros ...	102
Tabla 24	Velocidades Medias del Viento (cada año, por mes) a 80 metros.....	103
Tabla 25	Clima de Viento y Potencial Eólico a 100 metros.....	105
Tabla 26	Velocidades Medias del Viento (cada hora, por mes) a 100 metros .	108
Tabla 27	Velocidades Medias del Viento (cada año, por mes) a 100 metros...	109
Tabla 28	Potencial Eólico Estimado a 10 metros	110
Tabla 29	Producción de Energía Anual (AEP) estimada a 10 metros	111
Tabla 30	Producción de Energía estimada en una hora a 10 metros	111
Tabla 31	Potencial Eólico Estimado a 30 metros	111
Tabla 32	Producción de Energía Anual (AEP) estimada a 30 metros	112
Tabla 33	Producción de Energía estimada en una hora a 30 metros	112
Tabla 34	Potencial Eólico Estimado a 50 metros	112
Tabla 35	Producción de Energía Anual (AEP) estimada a 50 metros	113
Tabla 36	Producción de Energía estimada en una hora.....	113
Tabla 37	Potencial Eólico Estimado a 80 metros	113
Tabla 38	Producción de Energía Anual (AEP) estimada a 80 metros	114
Tabla 39	Producción de Energía estimada en una hora 80 metros	114
Tabla 40	Potencial Eólico Estimado a 100 metros	114
Tabla 41	Producción de Energía Anual (AEP) estimada a 100 metros	115
Tabla 42	Producción de Energía estimada en una hora.....	115
Tabla 43	Comparativa entre los datos a 10, 30, 50, 80 y 100 metros.....	117
Tabla 44	Comparativa de los sectores 2, 3 y 7 en 10 metros y 50 metros.....	117
Tabla 45	Comparativa de velocidad media y potencial eólico promedio a 10, 30, 50, 80 y 100 metros	118
Tabla 46	Comparativa entre variaciones estacionales, velocidad media y variaciones horarias a 10,30, 50, 80 y 100 metros	119
Tabla 47	Comparativa de Energía Eólica entre IBM SPSS Statistics V23 y WAsP Climate Analyst v3:.....	124
Tabla 49	Matriz de Consistencia	134

Índice de Figuras

Figura 1	Vista Satelital de Perú, Distritos de Calca y Punto de Evaluación del Potencial Eólico de Calca.....	26
Figura 2	Vista Satelital del Punto de Estudio en la Estación Automática en el Distrito de Calca.....	27
Figura 3	Global Wind Atlas: Cusco.....	28
Figura 4	Global Wind Atlas: Punto de Estudio en el distrito de Calca.....	29
Figura 5	Velocidad media anual del viento a 25 m.....	30
Figura 6	Velocidad media anual del viento a 75 m.....	31
Figura 7:	Producción según fuente energética 2018	42
Figura 8:	Climas del Departamento de Cusco.....	53
Figura 9:	Principales zonas de vida del Perú.....	54
Figura 10	<i>Diagrama de flujo del Desarrollo de la Metodología</i>	65



Figura 11	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, todos los sectores a 10 metros	
		77
Figura 12	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 2, a 10 metros.....	79
Figura 13	<i>Rosa de Viento</i> y Distribución de Weibull, <i>sector 3, a 10 metros</i>	79
Figura 14	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 7, a 10 metros.....	81
Figura 15	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, todos los sectores a 30 metros	
		84
Figura 16	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 2, a 30 metros.....	86
Figura 17	<i>Rosa de Viento</i> y Distribución de Weibull, <i>sector 3, a 30 metros</i>	87
Figura 18	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 7, a 30 metros.....	88
Figura 19	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, todos los sectores a 50 metros	
		91
Figura 20	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 2, a 50 metros.....	93
Figura 21	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 3, a 50 metros.....	94
Figura 22	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 7, a 50 metros.....	95
Figura 23	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, todos los sectores a 80 metros	
		98
Figura 24	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 2, a 80 metros.....	100
Figura 25	<i>Rosa de Viento</i> y Distribución de Weibull, <i>sector 3, a 80 metros</i>	101
Figura 26	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 7, a 80 metros.....	102
Figura 27	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, todos los sectores a 100	
metros		104
Figura 28	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 2, a 100 metros...	107
Figura 29	<i>Rosa de Viento</i> y Distribución de Weibull, <i>sector 3, a 100 metros</i> ...	107
Figura 30	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 7, a 100 metros...	108
Figura 31	Histograma de Frecuencias: Temperatura	137
Figura 32	Histograma de Frecuencias: Humedad	138
Figura 33	Histograma de Frecuencias: Densidad del Aire	139
Figura 34	Histograma de Frecuencias: Velocidad del Viento	140
Figura 35	Histograma de Frecuencias: Dirección del Viento	141
Figura 36	Histograma de Frecuencias: Energía Eólica a 10 metros	142
Figura 37	Histograma de Frecuencias: Densidad del Aire a 30 metros.....	143
Figura 38	Histograma de Frecuencias: Velocidad del Viento a 30 metros.....	144
Figura 39	Histograma de Frecuencias: Energía Eólica a 30 metros	145
Figura 40	Histograma de Frecuencias: Densidad del Aire a 50 metros.....	146
Figura 41	Histograma de Frecuencias: Velocidad del Viento a 50 metros.....	147
Figura 42	Histograma de Frecuencias: Energía Eólica a 50 metros	148
Figura 43	Histograma de Frecuencias: Densidad del Aire a 80 metros.....	149
Figura 44	Histograma de Frecuencias: Velocidad del Viento a 80 metros.....	150
Figura 45	Histograma de Frecuencias: Energía Eólica a 80 metros	151
Figura 46	Histograma de Frecuencias: Densidad del Aire a 100 metros.....	152
Figura 47	Histograma de Frecuencias: Velocidad del Viento a 100 metros.....	153
Figura 48	Histograma de Frecuencias: Energía Eólica a 100 metros	154
Figura 49	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 1, a 10 metros....	155
Figura 50	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 4, a 10 metros....	155
Figura 51	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 5, a 10 metros....	156
Figura 52	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 6, a 10 metros....	156
Figura 53	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 8, a 10 metros....	156
Figura 54	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 9, a 10 metros....	157
Figura 55	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 10, a 10 metros..	157



Figura 56	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 11, a 10 metros.. 157
Figura 57	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 12, a 10 metros.. 158
Figura 58	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 1, a 30 metros.... 158
Figura 59	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 4, a 30 metros.... 158
Figura 60	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 5, a 30 metros.... 159
Figura 61	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 6, a 30 metros.... 159
Figura 62	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 8, a 30 metros.... 159
Figura 63	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 9, a 30 metros.... 160
Figura 64	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 10, a 30 metros.. 160
Figura 65	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 11, a 30 metros.. 160
Figura 66	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 12, a 30 metros.. 161
Figura 67	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 1, a 50 metros.... 161
Figura 68	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 4, a 50 metros.... 161
Figura 69	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 5, a 50 metros.... 162
Figura 70	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 6, a 50 metros.... 162
Figura 71	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 8, a 50 metros.... 162
Figura 72	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 9, a 50 metros.... 163
Figura 73	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 10, a 50 metros.. 163
Figura 74	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 11, a 50 metros.. 163
Figura 75	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 12, a 50 metros.. 164
Figura 76	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 1, a 80 metros.... 164
Figura 77	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 4, a 80 metros.... 164
Figura 78	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 5, a 80 metros.... 165
Figura 79	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 6, a 80 metros.... 165
Figura 80	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 8, a 80 metros.... 165
Figura 81	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 9, a 80 metros.... 166
Figura 82	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 10, a 80 metros.. 166
Figura 83	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 11, a 80 metros.. 166
Figura 84	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 12, a 80 metros.. 167
Figura 85	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 1, a 100 metros.. 167
Figura 86	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 4, a 100 metros.. 167
Figura 87	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 5, a 100 metros.. 168
Figura 88	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 6, a 100 metros.. 168
Figura 89	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 8, a 100 metros.. 168
Figura 90	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 9, a 100 metros.. 169
Figura 91	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 10, a 100 metros 169
Figura 92	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 11, a 100 metros 169
Figura 93	Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 12, a 100 metros 170

Índice de Ecuaciones

Ec. 1: $P_w = \frac{1}{2} \rho AV^3$	45
Ec. 2: $WPD = \frac{1}{2} \rho V^3$	46
Ec. 3: $P_e = \eta_e \eta_m C_p P_w$	46
Ec. 4: $AEP = P_w \times 8760h \times \eta \times C_p$	46
Ec. 5: $\overline{P_w} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \eta \int_0^\infty C_p (\lambda) U^3 p(U) dU$	46
Ec. 6: $\overline{P_w} = \rho \left(\frac{2}{3} D\right)^2 \overline{U}^3$	47
Ec. 7: $\rho_{\text{humid air}} = \frac{p_d}{R_d T} + \frac{p_v}{R_v T}$	48



Ec. 8: $\rho_a = \frac{PM_a}{ZRT} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right]$	48
Ec. 9: $\rho = \frac{0.0034837402(\text{kg}\cdot\text{K}\cdot\text{J}^{-1})P[1-(0.378043X_v)]}{ZT}$	49
Ec. 10: $X_v = hf(P, t) \frac{P_{sv}(t)}{P}$	49
Ec. 11: $f = \alpha + \beta P + \gamma t^2$	49
Ec. 12: $P_{sv} = 1\text{Pa} \times \exp \left(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T} \right)$	49
Ec. 13: $Z = 1 - \frac{P}{T} [a_0 + a_1 t^2 + a_2 t^2 + (b_0 + b_1 t)X_v + (c_0 + c_1 t)X_v^2] + \frac{P^2}{T^2} (d + eX_v^2)$	50
Ec. 14: $p = p_0 e^{-\frac{Mgy}{RT}}$	50
Ec. 15: $v_2 = v_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha$	52
Ec. 16: $k = \left(\frac{\sigma}{\bar{x}} \right)^{-1.086}$	55
Ec. 17: $\frac{c}{\bar{x}} = \left(0.568 + \frac{0.433}{k} \right)^{-\frac{1}{k}}$	55



Capítulo I

1. Fundamentación del Tema de Investigación.

1.1. Descripción del Problema de Investigación

En muchos países de Latinoamérica se dieron avances en la aplicación de la energía eólica y en especial en Perú se tiene el parque eólico Wayra, Marcona, Talara, Cupisnique (Osinergmin, 2019), sin embargo a pesar del potencial que existe son pocas las investigaciones de aprovechamiento de la energía eólica.

Esto se ve reflejado en la información general que se tiene de los Atlas Eólicos mundiales y Atlas Eólico del Perú, que realizan estimaciones y extrapolaciones de energía eólica para obtener resultados, sin embargo, es necesario mayores investigaciones de los lugares más prometedores para el aprovechamiento del viento como fuente de energía eólica. Siendo necesario la producción y análisis de información del estado del potencial eólico específicamente de estos lugares.

1.2. Área de Investigación

El área de investigación es Ingeniería y Tecnologías, la línea de investigación es Energías Renovables, el mismo es una de las siete líneas de investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Andina del Cusco, aprobado mediante Resolución N° 266-CU-2021-UAC, de fecha 15 de junio de 2021. La tesis abarcó solamente la evaluación del potencial eólico del distrito de Calca permitiendo obtener información, describir, evaluar y analizar el posible aprovechamiento del viento como Recurso Energético Renovable.

1.3. Formulación del Problema de Investigación

1.3.1. Problema General

¿Cuál es el potencial eólico del distrito de Calca comprendida entre 2017 y 2022, provincia de Calca, Cusco?

1.3.2. Problemas Específicos

- ¿Cuánto es la velocidad y cuál es la dirección del viento promedio del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco comprendida entre 2017 y 2022?



- ¿Cuánto es la densidad promedio del viento del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco comprendida entre 2017 y 2022?
- ¿Cuánto y cómo está valorado el potencial eólico del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco comprendida entre 2017 y 2022?

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1. Objetivo General

Evaluar el potencial eólico del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco entre los años 2017 y 2022.

1.4.2. Objetivos Específicos

Determinar la velocidad y dirección promedio del viento del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco entre los años 2017 y 2022.

Calcular la densidad promedio del viento del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco entre los años 2017 y 2022.

Determinar el potencial eólico del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco entre los años 2017 y 2022.

1.5. Justificación de la Investigación

Las energías renovables han aumentado los últimos años, siendo más asequibles en países en vías de desarrollo, así mismo el mercado para la energía renovable está creciendo, siendo cada vez más económicos, eficientes, ecológicos y sostenibles que los sistemas de energía convencionales, en tal sentido se hace necesario tener la información de qué lugares son adecuados para la implantación de energías renovables, sabiendo que estas pueden disminuir la dependencia a las fuentes de energía fósil, también como medida de mitigación del cambio climático, y como avance hacia el desarrollo sostenible.

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar el potencial de aprovechamiento del viento, específicamente el potencial eólico del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco, teniendo data de parámetros climáticos y del viento comprendida entre los



años 2017 al 2022. siendo necesaria data de parámetros climáticos y del viento de por lo menos 1 año (Faiella et al., 2008) o según Dioses (2013), mínimo 5 años, respecto a la velocidad y dirección del viento para poder hacer una evaluación preliminar (a corto plazo) del potencial eólico de cualquier lugar, esta investigación evalúa el potencial eólico de Calca y permitirá la incursión de tecnologías de aprovechamiento del viento como recurso energético renovable. Así mismo es objeto de antecedente y deliberación para proponer, según sea el caso, la implementación de turbinas eólicas en Calca, o en cualquier lugar del Perú siendo este trabajo replicable a cualquier ubicación.

1.5.1. Conveniencia

El presente trabajo de investigación se soportó en datos del viento de estaciones meteorológicas del SENAMHI, para determinar el potencial eólico de Calca, las razones de saber este potencial, es de verificar si existe el viento suficiente y las condiciones físicas y meteorológicas adecuadas en el lugar, necesarias para ser utilizadas como fuente de energía.

1.5.2. Relevancia Social

Hay poblaciones que no cuentan con energía eléctrica, ya que están apartadas; con la presente investigación, las autoridades locales y la población en general podrán generar sus evaluaciones de potencial eólico e implementar turbinas eólicas, para mejorar la calidad de vida de las poblaciones más alejadas.

1.5.3. Implicancia Practica

Al conocer el potencial eólico del distrito de Calca, se podrá implementar sistemas de aprovechamiento de esta energía eólica, que favorecerá al abastecimiento de energía eólica a lugares que no dispongan de energía eléctrica. Reforzará la información sobre energía eólica, se conocerá el potencial eólico y beneficiará a la población, impulsando el desarrollo de las energías renovables en el distrito de Calca y en la región Cusco, contribuyendo a reducir la huella de



carbono que produce el uso de energía eléctrica y contribuir a la mitigación del cambio climático y el calentamiento global.

1.5.4. Valor Teórico

La relevancia teórica del estudio radica en ser un aporte al estado del arte de la energía eólica en el Perú, a través de la demostración de metodología para evaluar el potencial eólico del distrito de Calca, y proponer como un modelo para seguir impulsando este tipo de estudios y la implementación de plantas de aprovechamiento del viento como fuente de energía.

El presente trabajo de investigación será considerado como un antecedente, que impulsará a hacer más estudios respecto a la energía eólica en el Perú, que son escasos a nivel nacional. Una vez concluida la investigación será puesto a disposición de la sociedad y de las municipalidades, para ser usado como base para la deliberación de instalación de turbinas eólicas en el distrito de Calca o en cualquier lugar siendo este trabajo replicable.

1.5.5. Utilidad Metodológica

El trabajo utilizó de base teórica principal las investigaciones Shi & Erdem (2017), Faiella et al. (2008) y Bruce H. Bailey & McDonald (1997) en resumen la metodología que se usó en la presente investigación, se divide en recopilación de datos, configuración de los datos y procesamiento con los softwares Excel, IBM SPSS Statistics v23, y WAsP Climate Analyst v3, posteriormente obtención de resultados, evaluación y análisis de estos.

El trabajo tuvo como base fórmulas matemáticas que, junto con la data de parámetros climáticos y del viento aprovechada de la estación automática del distrito de Calca del SENAMHI, y el uso de softwares especializados en la evaluación del potencial eólico dieron como resultado el potencial eólico de Calca.

1.6. Delimitación Espacial

La presente investigación tuvo como área delimitada el punto de estudio que es el punto de monitoreo de la Estación Automática de Calca cuyas coordenadas son:

Coordenadas UTM:



Zona: 19 S

Coordenada Este: 179835.52 m E

Coordenada Norte: 8524097.25 m S

Altitud: 2921 m

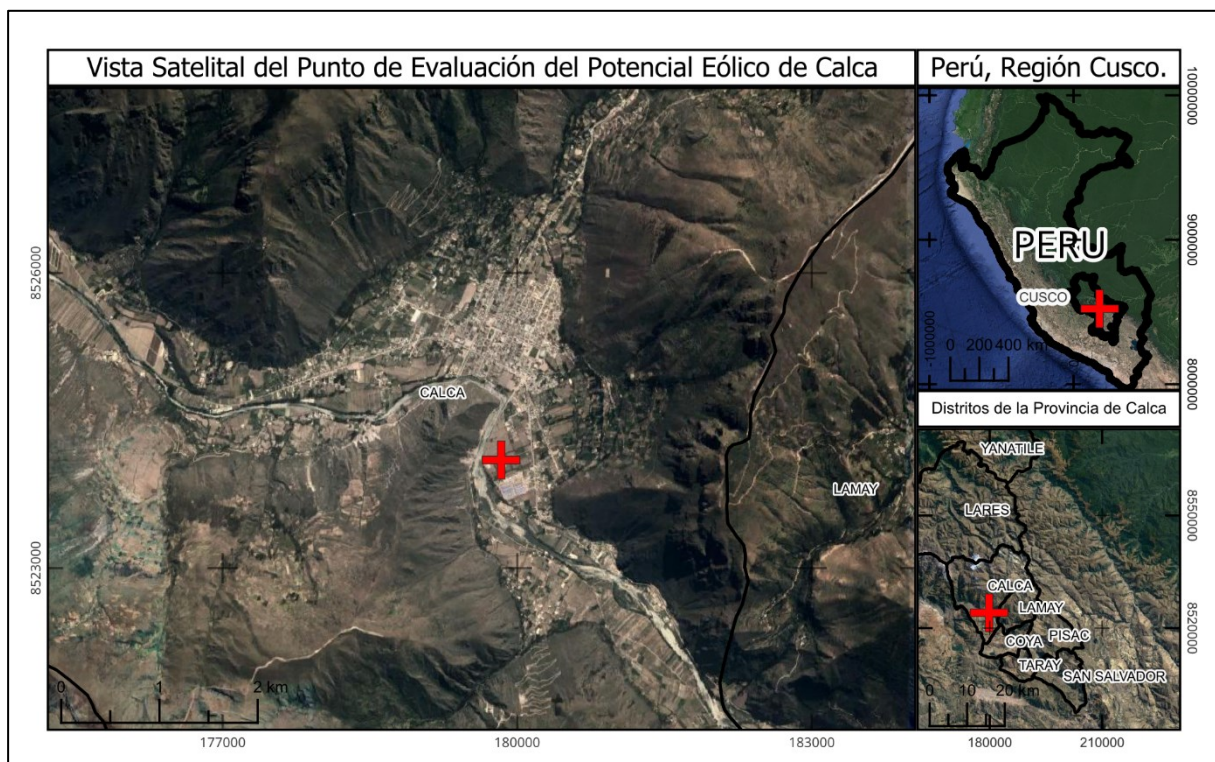
Coordenadas grados, minutos y segundos:

Longitud: 71°57'18.85"O

Latitud: 13°19'59.97"S

Figura 1

Vista Satelital de Perú, Distritos de Calca y Punto de Evaluación del Potencial Eólico de Calca



Nota: Elaboración propia

Figura 2

Vista Satelital del Punto de Estudio en la Estación Automática en el Distrito de Calca.



Nota: Obtenida de Google Earth, Altitud de 2921m.

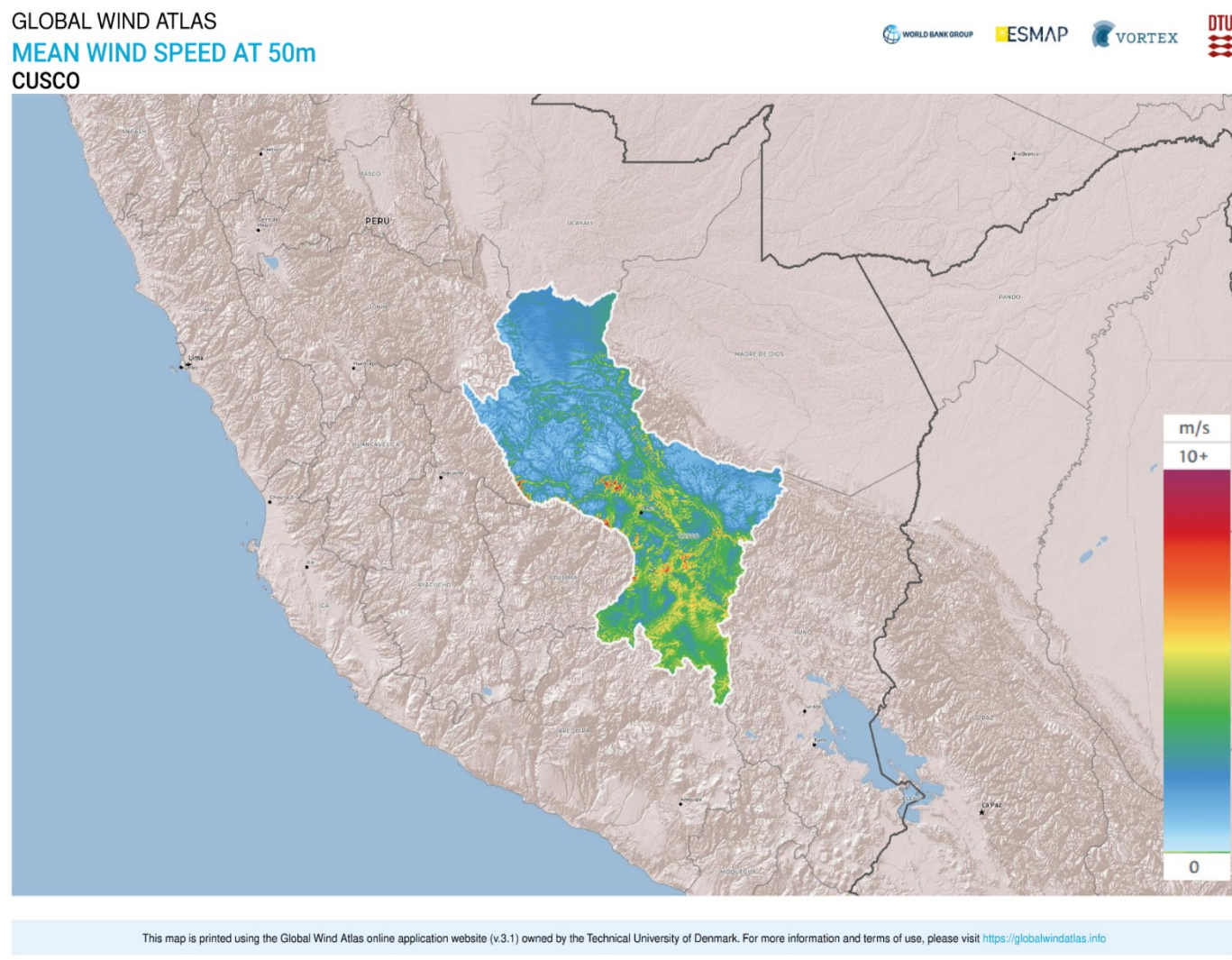
1.7. Criterios Necesarios para la Ubicación de la Investigación

Los criterios para la ubicación de la investigación son los siguientes:

Viento: En el distrito de Calca, se siente empíricamente que existe viento el cual puede aprovecharse como energía eólica. Además, según el Global Wind Atlas (ver **Figura 3** y **Figura 4**) y el Atlas Eólico del Perú (ver **Figura 5** y **Figura 6**) se encuentran algunos lugares con vientos adecuados para el aprovechamiento del viento como recurso energético renovable, estos vientos deben ser de más de 5 m/s para ser rentable (Realpe Jiménez et al., 2012),.



Figura 3
Global Wind Atlas: Cusco

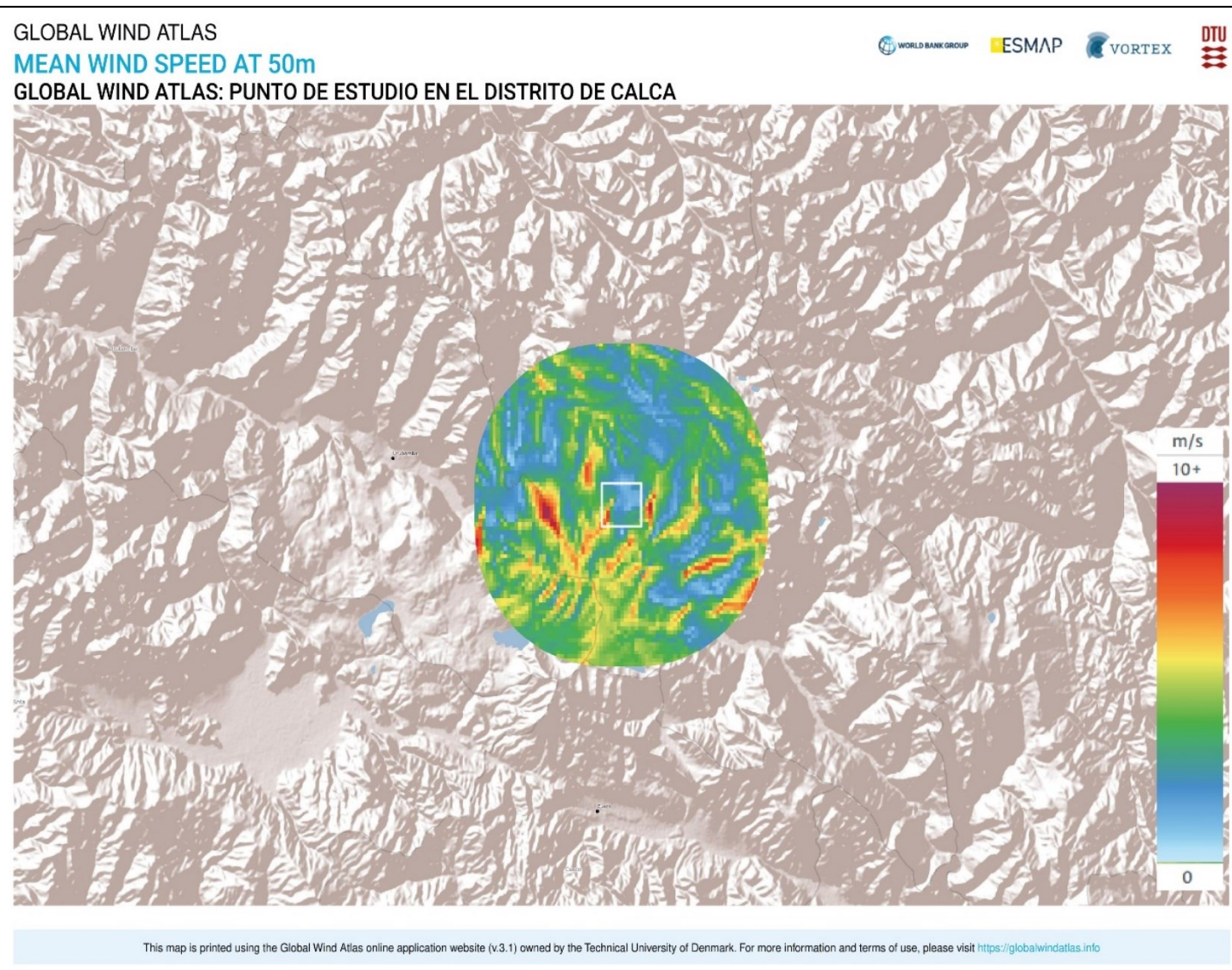


Nota: Elaboración propia en la web [Global Wind Atlas](https://globalwindatlas.info)



Figura 4

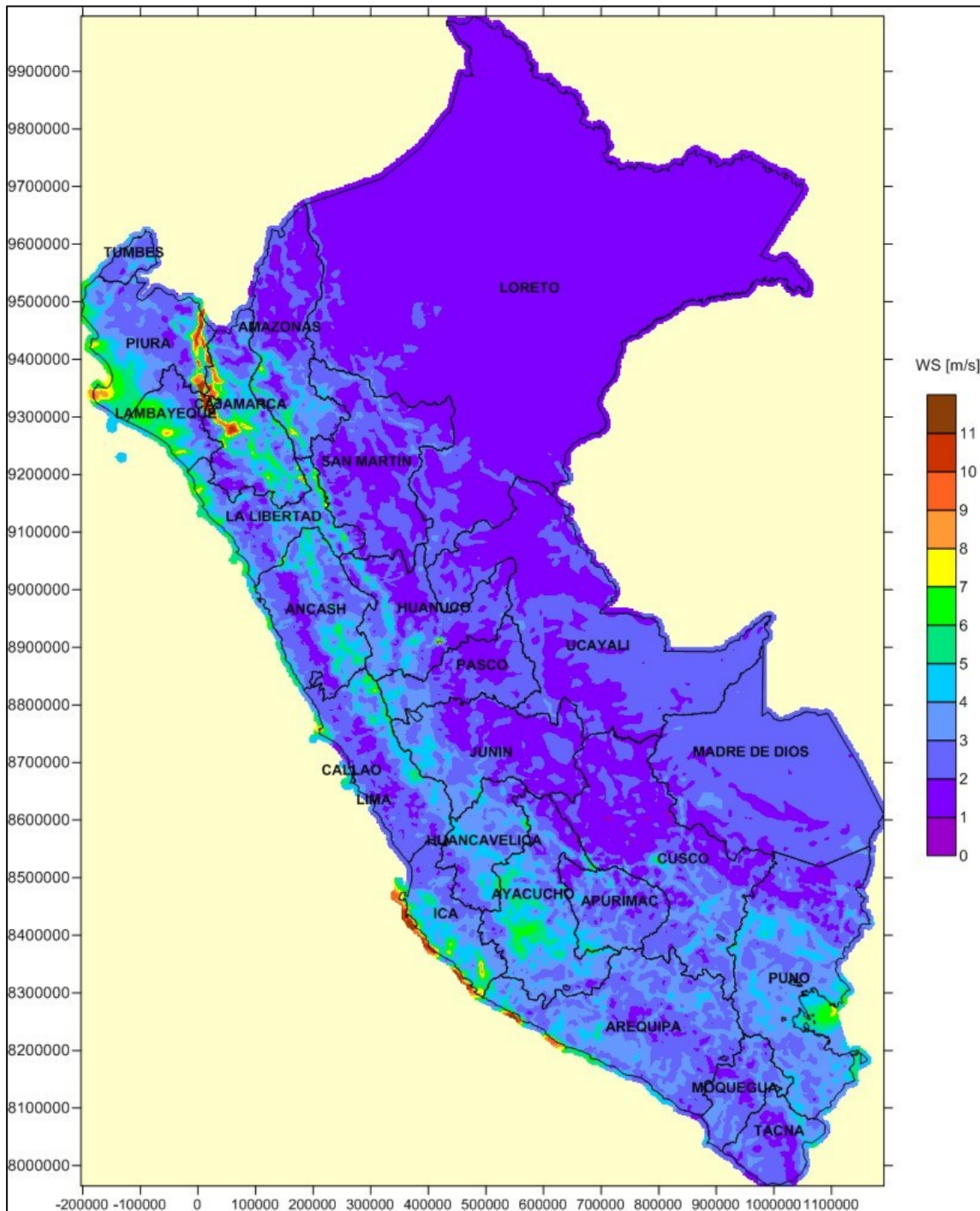
Global Wind Atlas: Punto de Estudio en el distrito de Calca



Nota: El punto de estudio se encuentra dentro del recuadro blanco del centro de la figura. Nota: Elaboración propia en la web [Global Wind Atlas](https://globalwindatlas.info)



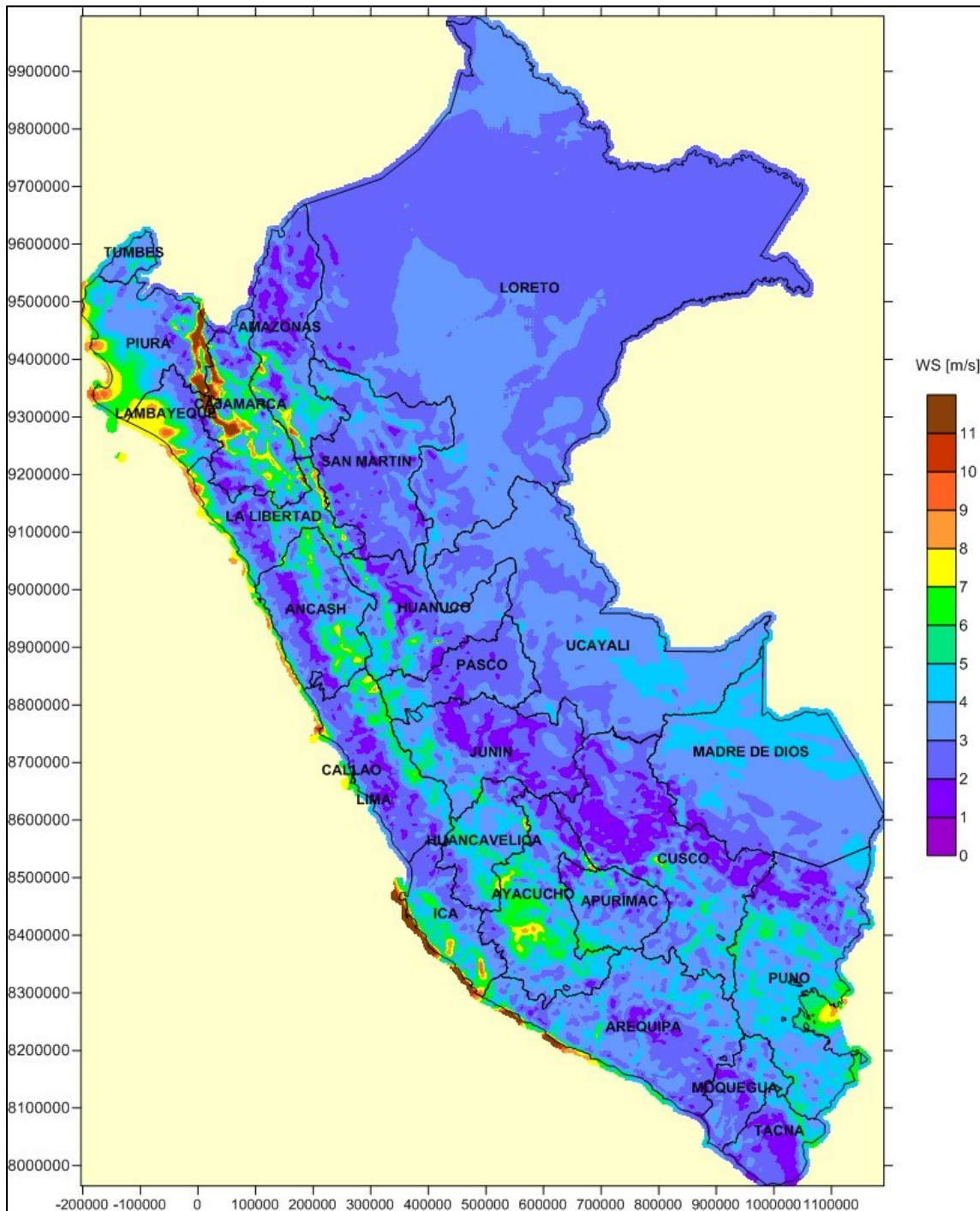
Figura 5
Velocidad media anual del viento a 25 m



Nota: (MINEM, 2016)



Figura 6
Velocidad media anual del viento a 75 m



Nota: (MINEM, 2016)



Terreno: Se tiene grandes extensiones de terreno que se pueden aprovechar y también de bajo costo.

Red de Conectividad y Demanda: El lugar está cercano a las redes de conectividad eléctrica y también cercano a la demanda, que en este caso es la población del distrito de calca.

Facilidad de Permisos: También es un punto necesario para que el proyecto se lleve de manera adecuada. Este punto se sustenta en la sección 2.2 Marco Normativo de la presente investigación.

Accesibilidad e Infraestructura: El lugar tiene las condiciones necesarias de infraestructura vial y también que permita la implantación de las plantas de energía eólica.

Trabajadores: Es necesario contar con mano de obra calificada.

1.8. Delimitación Temporal

El trabajo de investigación tuvo un rango de tiempo comprendido entre enero del 2017 a diciembre de 2022 (6 años).



Capítulo II

2. Marco Teórico

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacional:

1. Shi & Erdem (2017) en su investigación titulada “Estimation of Wind Energy Potential and Prediction of Wind Power” cuyo objetivo fue discutir varios aspectos de la evaluación y el pronóstico de la energía eólica y describir los principios para desarrollar un programa exitoso de evaluación del viento, se discutieron varios modelos que podrían usarse para las decisiones de micrositing (es decir, métodos basados en la coherencia de masas, modelos basados en Jackson-Hunt, métodos basados en CFD, métodos basados en correlación espacial), concluyendo que un programa exitoso de evaluación de la energía eólica implica la implementación de muchas tareas, como el análisis preliminar del viento, la selección de los sitios del viento, el micrositio y la captura precisa de los perfiles de flujo del viento existentes.

2. Faiella et al. (2008), cuyo título es “Gestión de Variables Meteorológicas y Mapeo Eólico”, cuyo objetivo es el de describir una metodología para realizar el estudio del recurso eólico en determinadas regiones o lugares. Concluyendo que la evaluación del potencial eólico de una región es uno de los pasos más importantes para determinar la viabilidad de un futuro proyecto de energía eólica.

3. Realpe Jiménez et al. (2012) cuyo título es “Generación eléctrica y evaluación del potencial de energía eólica en regiones de Colombia”, ubicado en regiones de Colombia, cuyo objetivo es el de descubrir el potencial de producción de electricidad a partir del viento en islas y en regiones remotas de Colombia, llegando a las conclusiones de estimaciones de producción de energía eólica, así como los costos de producción de kWh, también se estimó la viabilidad económica de la construcción de parques eólicos con turbinas de potencia nominal de más de 1000 kW. Se encontró que los períodos de recuperación para estas estaciones eran menores que la vida útil de la máquina (20 años) para turbinas de potencia nominal superior a 1000 kW.



Esto se compara con los períodos de recuperación de otras regiones, que fueron superiores a 20 años; lo que indica que la producción de electricidad a partir del viento aún no es una opción económica para varias regiones de Colombia.

4. El trabajo de fin de grado de Minguet Requeni (2019) cuyo título es: “Estudio del recurso eólico aprovechable de la Comunidad Autónoma de Aragón para el emplazamiento y diseño de un parque eólico” ubicado en la Comunidad Autónoma de Aragón, cuyo objetivo es el de realizar un análisis de las zonas con mejor recurso eólico aprovechable, después seleccionar la zona adecuada para el diseño y emplazamiento de del parque eólico. Este trabajo concluye con el estudio de viabilidad económica de la solución adoptada.

5. Wang, B., Sun, S. & Duan, M. (2018), en su artículo “Wind potential evaluation with urban morphology - A case study in Beijing”, ubicado en China, esta investigación tuvo como objetivo el de estimar la energía eólica en un ámbito de morfología urbana Obteniendo la comparación de 7 áreas urbanas. En su metodología adoptaron los parámetros centrales de la forma urbana y esos parámetros altamente correlacionados con la energía eólica son: relación de superficie de suelo (FAR), relación de parcela (PR), altura media del edificio, desviación estándar de las alturas del edificio (σ_h), volumen medio del edificio, rugosidad relativa, porosidad. ANSYS 14.0 se utiliza para esta simulación. Autodesk CAD 2015 se utiliza para la creación de geometrías. Concluyendo que las formas con una relación de área de piso (floor area ratio) más baja generalmente tienen la densidad de potencial de viento más alta en la unidad de superficie del techo. (2) Las formas con mayor porosidad generalmente tienen la mayor densidad de potencial de viento en la unidad de superficie del techo. (3) Las formas con una altura promedio de construcción más alta generalmente tienen la densidad de potencial eólico más alta en la unidad de área del sitio.

6. Mostafaeipour et al. (2014), en su artículo “An analysis of wind energy potential and economic evaluation in Zahedan, Iran”, cuyo objetivo fue el de investigar el potencial de



energía eólica para la ciudad de Zahedan analizando data de cinco años (2003-2007) para obtener la densidad de energía eólica y potencial de energía eólica. Los resultados arrojaron que la potencia eólica obtenida y las densidades de energía son 89.184 W / m^2 y $781.252 \text{ kWh / m}^2$ respectivamente. En conclusión, en este artículo se presenta la evaluación económica y el análisis de cuatro aerogeneradores diferentes. Para utilizar la energía eólica, se recomienda instalar una turbina eólica modelo Proven 2,5 kW en la región, que es la opción más rentable.

7. Stathopoulos et al. (2013), en su artículo “Wind power prediction based on numerical and statistical models” realizado en Grecia, cuyo objetivo fue el de predecir la energía eólica mediante modelos de predicción numérica y estadística. Su metodología usada fue de emplear dos sistemas atmosféricos regionales de alta resolución para proporcionar pronósticos de viento locales precisos, mientras que utilizaron una combinación de postprocesos estadísticos dirigidos a la adaptación local de los resultados y la reducción de posibles sesgos sistemáticos. Como conclusión afirman que los resultados obtenidos demuestran que se puede alcanzar una predicción de potencia precisa si las condiciones ambientales locales se estiman de forma creíble, mientras que el uso de la potencia de salida en los pasos de tiempo anteriores no contribuye significativamente a la mejora de la previsión final.

8. Schallenberg-Rodríguez & Notario del Pino (2011), en su artículo “Wind potential evaluation in the canary islands using GIS” presentan una investigación ubicada en las Islas Canarias- España, cuyo objetivo fue el de proponer una metodología basada en GIS (Sistema de Información Geográfica) para la determinación del potencial eólico. La metodología que usaron consistió en la determinación del área disponible para la explotación eólica por isla. Para ello se evaluó la velocidad mínima del viento para fines de explotación del viento. Como conclusión el mapa de cada isla muestra la tierra disponible para la producción eólica y calcula la producción de energía eólica por parque eólico, también calcularon el rendimiento energético anual en función de la distribución de Weibull.



9. En el estudio de Ucar & Balo (2009), titulado “Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey” presentan el estudio de las características del viento cuyo objetivo fue el de analizarlas utilizando los datos de velocidad del viento recopiladas de las seis estaciones meteorológicas en Turquía durante el período 2000-2006. Concluyendo que la velocidad media anual del viento de las seis estaciones (Erzurum, Elazığ, Bingöl, Kars, Manisa y Nigde) se obtiene como 8,7, 8,5, 5,9, 6,9, 7,4 y 8,0 m/s a 10 m de altura, respectivamente. El valor medio anual del parámetro de forma de Weibull k está entre 1,71 y 1,96 mientras que el valor anual del parámetro de escala c está entre 6,81 y 9,71 m/s. Finalmente realizaron una evaluación técnica de la generación de electricidad a partir de cuatro aerogeneradores con una capacidad de (600 kW, 1000 kW, 1500 kW y 2000 kW). Se calculó la producción de energía anual y el factor de capacidad para las cuatro turbinas diferentes.

2.1.2. Nacional:

1. La tesis de Columbus Miyasato et al. (2018), cuyo título es “Planeamiento Estratégico para el Sector de Energía Eólica del Perú”, cuyo objetivo fue el de plantear la implementación de estrategias específicas, para alcanzar objetivos de largo plazo orientados a incrementar las ventas, maximizar la rentabilidad y generar mayor empleabilidad dentro del sector de generación de energía eólica en el Perú. Concluyeron con el Plan Estratégico para el sector de generación de energía eólica proyectándolo a un plazo de desarrollo de diez años hasta el 2028.

2. La tesis de Moreno Diaz & Moreno Begazo (2017), cuyo título es “Estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta de energía eólica en Paracas”, ubicado en Paracas-Ica-Perú, brindaron una alternativa de implementación de una planta eólica, aprovechando el gran potencial eólico de la región. Concluyendo con las características de planta, siendo esta de 4 aerogeneradores de 3.6 MW de potencia cada uno, en conjunto 14.4MW, con una inversión total de US\$ 30'535,728.



3. Dioses I. (2013) en su tesis “Evaluación del potencial eólico para un emplazamiento seleccionado en la Región Piura utilizando GH-WindFarmer” tuvo el objetivo de evaluar el potencial eólico el cerro Chocán de Piura, haciendo uso de programas como WAsP 12 para la modelación del flujo del viento y GH-WindFarmer para el diseño del parque eólico. Como conclusión, logró comprobar que el emplazamiento tiene un alto potencial eólico y debe ser utilizado para la generación de energía eléctrica.

4. Rojas Maita (2016) en su tesis “Evaluación de los recursos eólicos para la generación de energía eléctrica a pequeña escala en el distrito de Huachac”, de la Región Junín, cuyo objetivo fue el de la evaluación del recurso eólico, se investigaron las velocidades del viento que se presentan en la zona de estudio y mediante el Visor de acceso a datos Power de la Nasa se encontró que la velocidad promedio del viento anual a una altura de 20 m del suelo es de 2,7 m/s. Obteniendo como generación de energía 999 kWh/año, 1520 kWh/año y 10100 kWh/año con los aerogeneradores E30Pro, E70Pro y E200 respectivamente, indica que estos aerogeneradores no tienen un rendimiento óptimo con los valores del viento que se presentan en el distrito de Huachac.

5. Quispe & Calderón (2015) en su investigación “Evaluación, aplicación, difusión y abastecimiento de un sistema de generación eólica” ubicado en Lima, cuyo objetivo fue la evaluación de la utilización y aplicación de un sistema de generación de energía eólica, que contará con una fuente de alimentación que permita su utilización durante un corte de energía a destiempo. Como conclusión se obtuvo el análisis de los datos reales obtenidos de las lecturas de velocidad del aire, determinando que ejerce mucha influencia el lugar de la ubicación del generador, la temperatura y el tiempo de obtención de la energía renovable.

2.1.3. Local:

1. Warthon, J., Zúñiga, J., Rubio, J., e Inglés, R. (2012) en su Proyecto Libro Digital, titulada “Aerogenerador Eólico Tripala”, ubicado en Cusco, cuyo objetivo fue contribuir a electrificar



las zonas rurales, como resultado construyeron aerogeneradores a nivel experimental, el primero fue de 2 metros de diámetro y el segundo de 3 metros de diámetro y que nominalmente puede alcanzar hasta $\frac{1}{2}$ Hp de potencia, con una base de 4.4 m de altura.

2. Callasi (2020), en su tesis titulada “Impactos por la integración de la generación distribuida con energía solar fotovoltaica en redes de media tensión de la ciudad del Cusco”, su objetivo fue evaluar los impactos positivos y negativos del acoplamiento de las tecnologías solares al sistema eléctrico del departamento del Cusco. Se determinó que los módulos de paneles solares dimensionados en proporción del modelo comercial de 250Wp, corresponde a los requerimientos de potencia, proveyendo beneficios de distinta índole.

3. Aparicio Ortega & Polo Gamarra (2001) en su tesis titulada: “Diseño y Evaluación de un Sistema de Aerogeneración en la Comunidad de Huaccoto” presenta el tema de las energías renovables como una vía de desarrollo en sectores rurales, donde los sistemas convencionales no llegan debido a elevados costos de instalación y poca demanda de energía por parte de la población.

2.2. Marco Normativo

- **Resolución de Consejo Directivo 071-2018-OS/CD:** Aprobar el Cargo RER Autónomo aplicable al servicio de suministro de energía en Áreas No Conectadas a Red de las Instalaciones RER Autónomas.
- **Resolución de Consejo Directivo 078-2016-OS/CD:** Aprueba el Procedimiento Técnico del COES N° 38 “Determinación Energía Dejada de Inyectar por Causas Ajenas al Generador con RER”
- **DECRETO SUPREMO N° 024-2013-EM:** Modifican el Reglamento de la Ley de Promoción de la Inversión para la Generación de Electricidad con el uso de Energías Renovables y el Reglamento de la Ley de Concesiones Eléctricas



- **Decreto Supremo N° 020-2013-EM:** Aprueban Reglamento para la Promoción de la Inversión en Áreas no Conectadas a Red (e. 22/06/2013, p.27/06/2013).
- **Decreto Supremo N° 031-2012-EM:** Modifican los artículos del Decreto Supremo N° 009-93-EM y del Decreto Supremo N° 012-2011-EM, relativos al marco regulatorio que regula el otorgamiento de las concesiones de generación hidráulica RER
- **Decreto Supremo N° 012-2011-EM:** Nuevo Reglamento de la Generación de Electricidad con Energías Renovables (e. 22/03/2011, p.23/03/2011)
- **Decreto Supremo N° 056-2009-EM:** Disponen adecuar competencia de los Gobiernos Regionales para el otorgamiento de concesiones definitivas de generación con recursos energéticos renovables (e. 10/07/2009, p. 11/07/2009)



2.3. Bases Teórico-Científicas

2.3.1. Energía

Para introducirnos en el mundo de la energía renovable requerimos primero saber el concepto de energía, un concepto general de energía es dado por la física, en la cual energía es definida como la capacidad de realizar un trabajo y según Hugh & Freedman (2009): La energía cinética y el trabajo tienen las mismas unidades. Por lo tanto, el Joule (unidad del SI) es la unidad tanto del trabajo como de la energía (así como de todos los tipos de energía).

$$1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m} = 1 \left(\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot \text{m} = 1\text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$1\text{Watt} = \frac{1\text{Joule}}{\text{segundo}}$$

Según Thema Equipo Editorial (1999): “La energía se puede definir en función del uso que se le dé”. También “sabemos que unas formas de energía se pueden transformar en otras y el hombre aprovecha esta propiedad”, a su vez Bueche & Hecht (2007) definen a la energía como una medida del cambio impartido en un sistema.

2.3.2. Fuentes de Energía

Otro concepto necesario para entender lo que es la energía renovable, es fuentes de energía, también Thema Equipo Editorial (1999) nos dice que “Se llaman fuentes de energía a todos aquellos componentes de la naturaleza de los cuales se puede extraer energía utilizable por el hombre. De estas fuentes de energía se puede hacer la siguiente clasificación: fuentes de energía no renovables y fuentes de energía renovables”. Ya conocidos estos dos conceptos: el de energía y el de fuentes de energía, podemos abordar realmente lo que es energía renovable.

2.3.3. Energía Renovable

La Energía Renovable, es aquella energía que proviene de fuentes de energía renovables y de manera sostenible. Las fuentes de energía renovables provienen de la energía que es prácticamente inagotable, como la energía solar, que se transforma en energía eólica, o la



energía mareomotriz o hidráulica, también existen otras fuentes de energía renovable no convencionales no tan conocidas, como la undimotriz, la piezoeléctrica, la bioenergía, etc. (Osinergmin, 2019).

Una clasificación hecha por GPAE - OSINERGIM (**Tabla 1**) explica mejor los tipos de energía renovables o Recursos Energéticos Renovables (RER):

Tabla 1
Tipos de RER No Convencionales y Tecnologías de Generación Eléctrica

Tipos de RER No Convencionales		Tecnologías de Generación Eléctrica
Energía Solar		Solar fotovoltaica Solar térmica
Energía eólica		Onshore Offshore
Energía de la biomasa		Procesos bioquímicos Procesos termoquímicos
Energía minihidráulica		Centrales de agua fluyente Centrales de pie de presa Centrales en canal de riego o de abastecimiento
Energía marítima	Energía mareomotriz	Presa de marea Generador de corriente de marea Energía mareomotriz dinámica
	Energía undimotriz	Columna de agua oscilante Convertidor de movimiento oscilante Sistemas de rebosamiento
	Energía mareomotérmica	Sistemas de ciclo abierto Sistemas de ciclo cerrado Sistemas híbridos
Energía geotérmica		Plantas de vapor seco Plantas flash Plantas de ciclo binario

Nota: GPAE-Osinergmin, 2019.

2.3.4. Energía Eólica

Entonces ahora sabemos que un tipo de energía renovable es la Energía Eólica y esta puede describirse como el proceso en el que el viento es convertido en energía mecánica (Francis & Nalamutt, 2019). La Energía Eólica utiliza la energía cinética generada por el viento, transformándola en mecánica o eléctrica. La energía eólica es aprovechada mediante máquinas



compuestas por aspas unidas por un eje giratorio, llamadas aerogeneradores o turbinas eólicas, que se encargan de transformar la energía del viento (Citado por Osinergmin, 2019).

Energía cinética o flujo de energía cinética está representada por (MINEM, 2016):

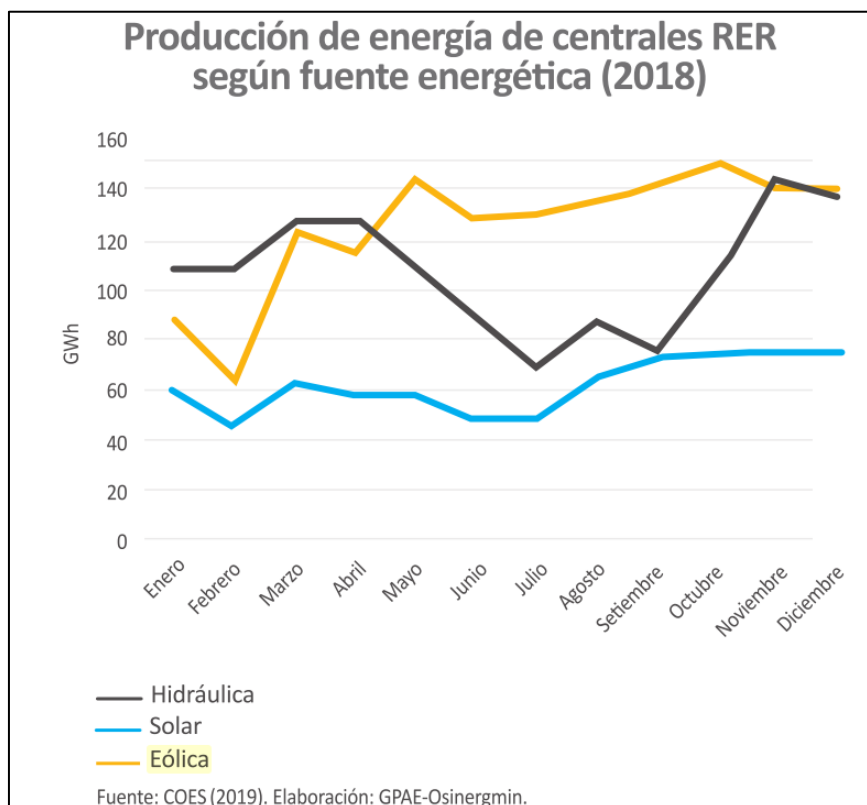
$$P_{kin} = \frac{1}{2} (\rho AV)V^2 = \frac{1}{2} \rho AV^3, \text{ su unidad es el watt (W).}$$

Donde ρ es la densidad del aire en kg/m^3 , A es el area barrida por las palas del rotor en m^2 y V es la velocidad del viento en m/s .

2.3.5. Sistemas mixtos o híbridos

Existen intermitencias de la producción de energía en las centrales eólicas (Osinergmin, 2019) puesto que la intensidad del viento no es constante durante todo el año y a todas horas ver figura Figura 7.

Figura 7: Producción según fuente energética 2018



A razón de ello una solución es la implementación de centrales mixtas que unan las tecnologías solar-eólica o hidráulica-eólica y estas se complementen para el mejor aprovechamiento de los recursos energéticos renovables.



2.3.6. Importancia de la Energía Eólica

Según Osinergmin (2019):

- Estas energías generan baja conflictividad social, un ejemplo de ello es que, en el 2019, sólo se presentaron siete conflictos socioambientales relacionados a asuntos energéticos, aún no se han reportado conflictos en proyectos de energía eólica.
- Son de rápida implementación, en el caso de la energía eólica, el tiempo promedio para la puesta en operación de centrales de energía eólica o parques eólicos es de 3.5 años.
- Permiten diversificar la concentración en fuentes, y con ello permite aumentar la confiabilidad energética ante posibles desastres, contar con una matriz energética diversificada mitiga los riesgos inherentes al uso de recursos no renovables y la volatilidad e intermitencia asociada a los RER. En algunos casos se pueden complementar, por ejemplo, mientras la generación de energía a partir de fuentes hidráulicas se reduce entre abril y setiembre, la producción eléctrica mediante energía eólica se incrementa durante el mismo periodo.
- Descentraliza la concentración geográfica, pues contribuyen a descentralizar la generación eléctrica según el potencial de cada región, las Energías Renovables no necesariamente requieren de planta de generación de gran tamaño, lo que los hace fáciles de distribuir geográficamente.
- Reduce los niveles de contaminación ambiental, al no producir emisiones atmosféricas, ni contaminar cuencas hidrográficas ni acuíferos.
- Facilita el cierre de la brecha de acceso rural.

Si bien la energía eólica es una de las mejores alternativas para producir energía, tiene sus ventajas y desventajas, según Zepeda Cancino & Vázquez García (2021): La industria eólica tiene ventajas como la baja huella de carbono, los reducidos costos de producción, la creación de empleos, y las desventajas incluyen la pérdida de cobertura forestal, el impacto en aves y fuentes de agua, la contaminación por derrames de aceite y desechos. Aun así la energía eólica presenta mayores ventajas ambientales y económicas en comparación a otros tipos de energías sean renovables o convencionales.



2.3.7. Evaluación del Potencial Eólico

Para saber cuánta energía eólica dispone un lugar se debe hacer una evaluación del potencial eólico. La definición de Potencia, es la rapidez con que se efectúa trabajo, su unidad en el SI es $1 \text{ watt} = 1 \text{ joule/segundo}$ (Young & Freedman, 2009):

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

Entonces, para hacer una evaluación del potencial eólico se deben seguir pasos importantes, estos pueden ser la identificación preliminar del área, evaluación de los recursos eólicos, y micrositing (delimitación de áreas específicas) (AWS Scientific, 1997).

Shi & Erdem (2017) nos dicen que los datos deben validarse para períodos de tiempo a corto, mediano y largo plazo para aprovechar todo el potencial de un sitio eólico, y uno de los parámetros más importantes es la velocidad del viento.

Cataldo & Nunes (2006), menciona que el “potencial eólico en un sitio o una zona implica la caracterización del clima de viento en ese lugar”

Shi & Erdem (2017), nos dicen que la velocidad mínima del viento a la que se puede generar electricidad se denomina velocidad de entrada de corte (cut-in speed), es decir, la velocidad a la que comienza a girar el rotor de la turbina eólica.

La potencia eólica generada aumenta con la potencia cúbica de la velocidad del viento, hasta un cierto valor que se denomina potencia nominal. La salida nominal generalmente se obtiene a la velocidad máxima a la que se permite que gire el rotor (Shi & Erdem, 2017).

Normalmente, la punta de la pala del rotor puede girar a una velocidad máxima de 120m/s. Girar las cuchillas más rápido podría provocar problemas. Más allá de una cierta velocidad, con el fin de evitar daños estructurales, el rotor es detenido por un freno, esta velocidad particular del viento se llama velocidad de salida de corte (cut-out speed) (Shi & Erdem, 2017).

Para la obtención de la data de parámetros climáticos y del viento se debe tomar en consideración según Shi & Erden (2017), lo siguiente:



- Adquisición de equipos adaptados de acuerdo con las especificaciones del programa;
- Requisitos de calibración, frecuencia, método y presentación de informes del equipo;
- Monitoreo de la instalación, verificación y listas de verificación de la estación relacionadas con el mantenimiento y la operación;
- Recopilación y cribado de datos;
- Pautas de análisis de datos que también incluyen los cálculos correspondientes;
- Métodos de validación de datos y criterios de marcado, la frecuencia de los informes y el formato asociado;
- Auditorías internas para diversos aspectos como la instalación del sitio, la operación y el mantenimiento, y el manejo de datos.

La ecuación básica para hallar el potencial eólico es la ecuación general que relaciona la energía eólica con el área barrida, la velocidad del viento y la densidad del aire es (Prasad & Bansal, 2011):

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1).$$

Donde P_w es la energía eólica, ρ es la densidad del aire y v es la velocidad del viento. Esto representa la energía total obtenida del flujo del viento. Obteniéndose el potencial eólico (P_w) en Watts (W)

La Energía Eólica ha sido usada de diferentes maneras en el pasado, molinos de viento, turbinas eólicas, etc. En la actualidad, turbinas eólicas de gran escala son equipos de conversión de energía que transforman la energía del viento en energía mecánica y después en energía eléctrica. La energía eólica es energía cinética del flujo de aire. La cantidad de la energía cinética del viento disponible depende de dos factores, la masa de aire y la velocidad del flujo del aire. En vez de medir la masa del aire, es más conveniente medir la densidad del aire, esto es más práctico para calcular la energía eólica (Citado por Zhao et al., 2019).

Según Kalmikov (2017) es costumbre normalizar la energía eólica ambiental dividiendo por el área de interés; es decir, en términos de «flujo de potencia específico», esto nos lleva a la definición de *flujo cinético de energía eólica*, conocido como densidad de energía eólica (wind



potencial density - WPD). De manera similar a las definiciones de flujo y caudal, el flujo de energía eólica es el caudal de energía eólica por unidad de área dado por:

$$WPD = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (2).$$

Teniendo así la densidad de energía eólica (WPD) en Watts por metro al cuadrado. (W/m²).

WPD se utiliza para comparar los recursos eólicos independientemente del tamaño de la turbina eólica y es la «base cuantitativa para la clasificación estándar del viento».

Shi & Erdem (2017) mencionan que evaluar el potencial eólico es solo el primer paso para todo el proceso que conlleva evaluar si un lugar es adecuado para producir energía eólica con los Recursos Eólicos que cuenta.

2.3.8. Potencia Eólica Aprovechable

Ya que solo se puede convertir una cierta proporción de la energía cinética del viento en energía eléctrica. Esta relación se puede expresar como(Shi & Erdem, 2017):

$$P_e = \eta_e \eta_m C_p P_w \quad (3).$$

Donde P_e es la cantidad de energía eléctrica generada, η_e es la eficiencia de conversión eléctrica de la turbina eólica, η_m es la eficiencia mecánica y C_p es el coeficiente de potencia.

La potencia eólica aprovechable es la fracción de potencia que realmente es capturada por el aerogenerador, la cual está determinada por la producción de energía anual o AEP (anual energy production). Una simple aproximación al AEP es la siguiente ecuación (Manwell et al., 2009)

$$AEP = P_w \times 8760(h) \times \eta \times C_p \quad (4).$$

Donde η es Eficiencia del tren de transmisión (potencia del generador / potencia del rotor), P_w es el potencial eólico y C_p es el coeficiente de potencia.

P_w no es lo mismo que $\overline{P_w}$. $\overline{P_w}$ es la potencia media de la turbina, y se puede utilizar la siguiente ecuación (Manwell et al., 2009):

$$\overline{P_w} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \eta \int_0^{\infty} C_p(\lambda) U^3 p(U) dU \quad (5).$$



Si el valor de η fuera 1 y el C_p fuera el límite de Betz de 59% o $16/27$, la ecuación de la potencia media de la turbina sería simplificada:

$$\overline{P_w} = \rho \left(\frac{2}{3}D\right)^2 \overline{U}^3 \quad (6).$$

Donde D es el diámetro del rotor y \overline{U} es la velocidad media.

Sin embargo, no es posible alcanzar tal eficiencia y el valor de η se asume normalmente como 0.25 (Manwell et al., 2009).

El límite superior para el coeficiente de potencia (es decir, la proporción de la cantidad que se puede extraer de la energía cinética del viento) es 59,3% independientemente de la geometría de la turbina eólica. esto se conoce como límite de Betz, que determina la máxima Eficiencia Energética que puede tener una turbina. Por lo general, el coeficiente de potencia de las turbinas eólicas modernas está entre el 45% y el 50% (Shi & Erdem, 2017).

El coeficiente de potencia es proporcionado por el fabricante, y para una turbina eólica difiere según el diseño de cada sección de la pala (los perfiles), el diseño de la pala, el concepto de regulación, el tamaño y la relación de velocidad de la punta, que es la relación entre la velocidad de la punta y la velocidad del viento. El máximo aproximado para turbinas eólicas pequeñas de eje vertical o «vertical axis wind turbine (VAWT)» es un $C_p=0.35$. Y un $C_p=0.48$ para turbinas de eje horizontal o «horizontal axis wind turbine (HAWT)» (...) Teniendo en cuenta el factor de Gipe de $5/9$ para aerogeneradores pequeños, se podría esperar un máximo de $C_p = 0.33$ (Beller, 2011).

Sin embargo, las curvas de potencia para pequeñas turbinas eólicas aún no están sujetas a estándares. Las curvas de potencia para pequeñas turbinas eólicas pueden basarse en cálculos teóricos o mediciones en túnel de viento. Además, la potencia puede referirse a la potencia mecánica en el eje o a la energía eléctrica, incluidas las pérdidas del generador y el transformador (Beller, 2011).



2.3.9. Densidad del Aire

Aparte de la velocidad del viento, otros de los parámetros más importantes del viento es la temperatura y humedad del aire del ambiente. La temperatura y humedad del aire determina la densidad del aire. Como se indica en la ecuación (4), la energía eólica aumenta con la densidad del aire. La relación entre la temperatura del aire y la densidad del aire para el aire húmedo se puede aproximar utilizando la fórmula de gas ideal (Shi & Erdem, 2017);

$$\rho_{humid\ air} = \frac{p_d}{R_d T} + \frac{p_v}{R_v T} \quad (7).$$

Donde $\rho_{\text{aire húmedo}}$ es la densidad del aire húmedo (en kg m^3), p_d es la presión parcial del aire seco (en Pascal), T es la temperatura (en Kelvin), R_d es la constante de gas específica para el aire seco (es decir, $287.058 \text{ J (kg K)}^{-1}$), p_v es la presión parcial del vapor de agua (en Pascal) y R_v es la constante de gas específica para el vapor de agua (es decir, $461.495 \text{ J (kg K)}^{-1}$). Las lecturas de temperatura deben realizarse a varios metros sobre el suelo para minimizar los efectos del calentamiento de la superficie (Prasad & Bansal, 2011).

Pero para la presente investigación se utilizará la fórmula para la densidad del aire CIPM-2007 (FORMULA FOR THE DENSITY OF MOIST AIR CIPM (Picard et al., 2008))

$$\rho_a = \frac{P M_a}{Z R T} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (8).$$

Donde:

ρ_a = Densidad del aire (kg/m^3);

P = Presión barométrica (Pa);

M_a = Masa molar del aire seco ($28.96546 * 10^{-3} \text{ kg/mol}$);

M_v = Masa molar del aire húmedo ($18.01528 * 10^{-3} \text{ kg/mol}$);

Z = Factor de compresibilidad;

R = Constante molar de los gases (8.314472 J/mol K).

Pero esta fórmula se puede simplificar reemplazando los valores conocidos de R , M_a y M_v dando la fórmula como:



$$\rho = \frac{0.0034837402(kg \cdot K \cdot J^{-1})P[1-(0.378043X_v)]}{ZT} \quad (9).$$

Donde X_v es la fracción molar de vapor de agua en el aire húmedo y se mide de forma indirecta a partir de la humedad relativa (h) o de la temperatura de punto de rocío. P es la presión barométrica. Z es el factor de compresibilidad de los gases, y T es la temperatura termodinámica.

Para determinar X_v se utiliza la siguiente fórmula (Picard et al., 2008):

$$X_v = hf(P \cdot t) \frac{P_{sv}(t)}{P} \quad (10).$$

Donde:

h = Es la humedad relativa en fracción porcentual

P_{sv} = Presión de saturación de vapor

f = Factor de aumento que depende de la presión y de la temperatura,

El factor de aumento se calcula de la siguiente manera (Picard et al., 2008):

$$f = \alpha + \beta P + \gamma t^2 \quad (11).$$

Donde:

α = 1.00062

β = $3.14 \cdot 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$

γ = $5.6 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$

t = es la temperatura en °C

La presión de saturación de vapor se calcula de la siguiente manera (Picard et al., 2008):

$$P_{sv} = 1Pa \times \exp\left(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T}\right) \quad (12).$$

Donde los valores de las constantes son:

A = $1.2378847 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-2}$

B = $-0.019121316 \text{ K}^{-1}$



$$C = 33.93711047$$

$$D = -63443.1645 \text{ K}$$

T = es la temperatura termodinámica

El factor de compresibilidad (Z) se calcula con la siguiente fórmula:

$$Z = 1 - \frac{P}{T} [a_0 + a_1 t^2 + a_2 t^2 + (b_0 + b_1 t) Xv + (c_0 + c_1 t) Xv^2] + \frac{P^2}{T^2} (d + e Xv^2). \quad (13)$$

Donde:

$$a_0 = 1.58123 * 10^{-6} \text{ K*Pa}^{-1}$$

P= Presión barométrica expresada en Pa

$$a_1 = -2.9331 * 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$$

T= Temperatura termodinámica (K)

$$a_2 = 1.0143 * 10^{-10} \text{ K}^{-1} * \text{Pa}^{-1}$$

t = Temperatura ambiental (°C)

$$b_0 = 5.707 * 10^{-6} \text{ K*Pa}^{-1}$$

$$b_1 = -2.051 * 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$$

$$c_0 = 1.9898 * 10^{-4} \text{ K*Pa}^{-1}$$

$$c_1 = -2.376 * 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$$

$$d = 1.83 * 10^{-11} \text{ Pa}^{-2}$$

$$e = -0.756 * 10^{-8} \text{ Pa}^{-2}$$

La presión barométrica se determinó usando la siguiente ecuación en función de determinada altitud:

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgy}{RT}} \quad (14).$$

Donde:

p = es la presión en la altura requerida

p₀ = es la presión a nivel del mar (101325 Pa)

e = número euler

M= masa molar convencional del aire (28.8 *10⁻³ kg/mol)



g = gravedad (9.80 m/s²)

y =altura requerida

R = constante de gases ideales

T =temperatura termodinámica (K)

Aun así, esta presión no es exacta ya que la fórmula nos pide suponer que g y T no varían con la altitud; también que la atmósfera tiene la misma composición química (y, por lo tanto, la misma masa molar M) a cualquier altura. El supuesto de temperatura constante no es realista, y g disminuye un poco al aumentar la altura (Young & Freedman, 2009).

Otra consideración es la determinación de la distancia entre el punto de medición y la ubicación potencial de la turbina eólica. Debe tenerse en cuenta que a medida que el terreno se vuelve más complejo debido a la variabilidad asociada con las características del viento local, la distancia máxima entre el punto de medición y la ubicación potencial debe disminuir. Como regla general, esa distancia debe ser de 5 a 8 km para un terreno relativamente simple, y de 1 a 3 km para las regiones donde las condiciones complejas del terreno están presentes (Shi & Erdem, 2017).

Para decidir la ubicación final de las turbinas, se debe realizar un análisis preliminar utilizando software (por ejemplo, WindPRO) basado en los mapas de recursos eólicos y las restricciones basadas en el terreno. La ubicación de las turbinas eólicas en una ubicación implica agrupar las turbinas en función de la distancia. Para terrenos relativamente planos, la regla general es colocar de 10 a 12 turbinas en un clúster, y para terrenos más complejos, colocar de 5 a 7 turbinas eólicas en un clúster (Shi & Erdem, 2017).

Después de formar el clúster, la velocidad media del viento dentro del clúster se calcula en función del mapa de recursos eólicos, y las ubicaciones en las que se observa la velocidad media se seleccionan para la ubicación potencial de los puntos de medición y, por lo tanto, la construcción de torres (Shi & Erdem, 2017).



Por lo general, se seleccionan dos o tres ubicaciones candidatas para una torre. Luego, mediante un examen visual, las ubicaciones finales de esas torres (una para cada grupo) se seleccionan de tal manera que esas torres estén lo suficientemente distribuidas (Asian Development Bank, 2016).

Además, debe considerarse la extrapolación de los datos obtenidos de diferentes sitios eólicos. La siguiente ecuación simple podría usarse para este propósito (Bruce H. Bailey & McDonald, 1997):

$$v_2 = v_1 \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \quad (15).$$

Donde v_1 es la velocidad conocida a la altura de medición h_1 , v_2 denota la velocidad del viento a la altura h_2 donde se extrapola la velocidad del viento, y α es el exponente de cizalladura del viento o exponente de Hellamnn, también llamado coeficiente de Hellmann, la cual podemos determinar con la **Tabla 2**.

Tabla 2
Valores del Exponente de Hellamnn en función de la Rugosidad del Terreno.

	Coeficiente de Hellmann (α)
Lugares llanos con hielo o hierba	0.08 – 0.12
Lugares llanos (mar, costa)	0.14
Terrenos poco accidentados	0.13 – 0.16
Zonas rústicas	0.20
Terrenos accidentados o bosques	0.20– 0.26
Terrenos muy accidentados y ciudades	0.25 – 0.40

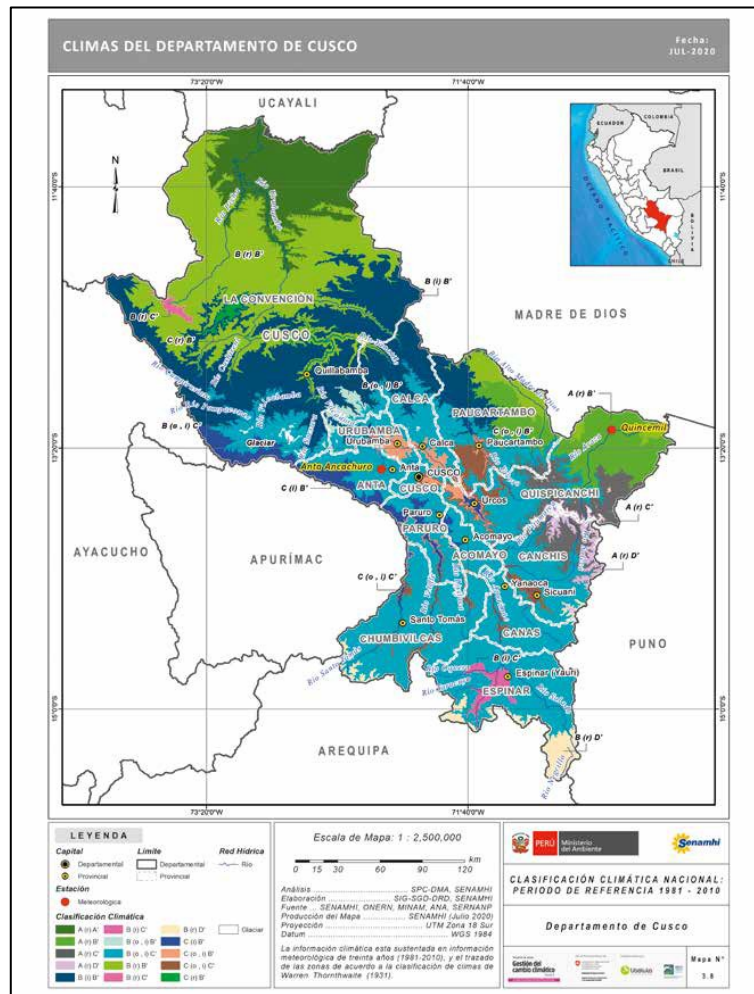
Nota: Obtenido de Fernández, P. (1993). Energía Eólica. España: Universidad de Cantabria.

Hay varios factores que afectan el exponente de la cizalladura del viento, incluida la cubierta vegetal, el terreno, el clima general e incluso la hora del día. En la literatura, se reportan valores de α que oscilan entre 0 y 0,4 (Bruce H. Bailey & McDonald, 1997).

2.3.10. Clasificación Climática Thornthwaite

También es necesario identificar la Clasificación Climática Nacional basada en la Clasificación de Thornthwaite, esto lo podemos realizar con el mapa realizado por SENAMHI (Castro et al., 2020):

Figura 8: Climas del Departamento de Cusco



Nota: (Castro et al., 2020)

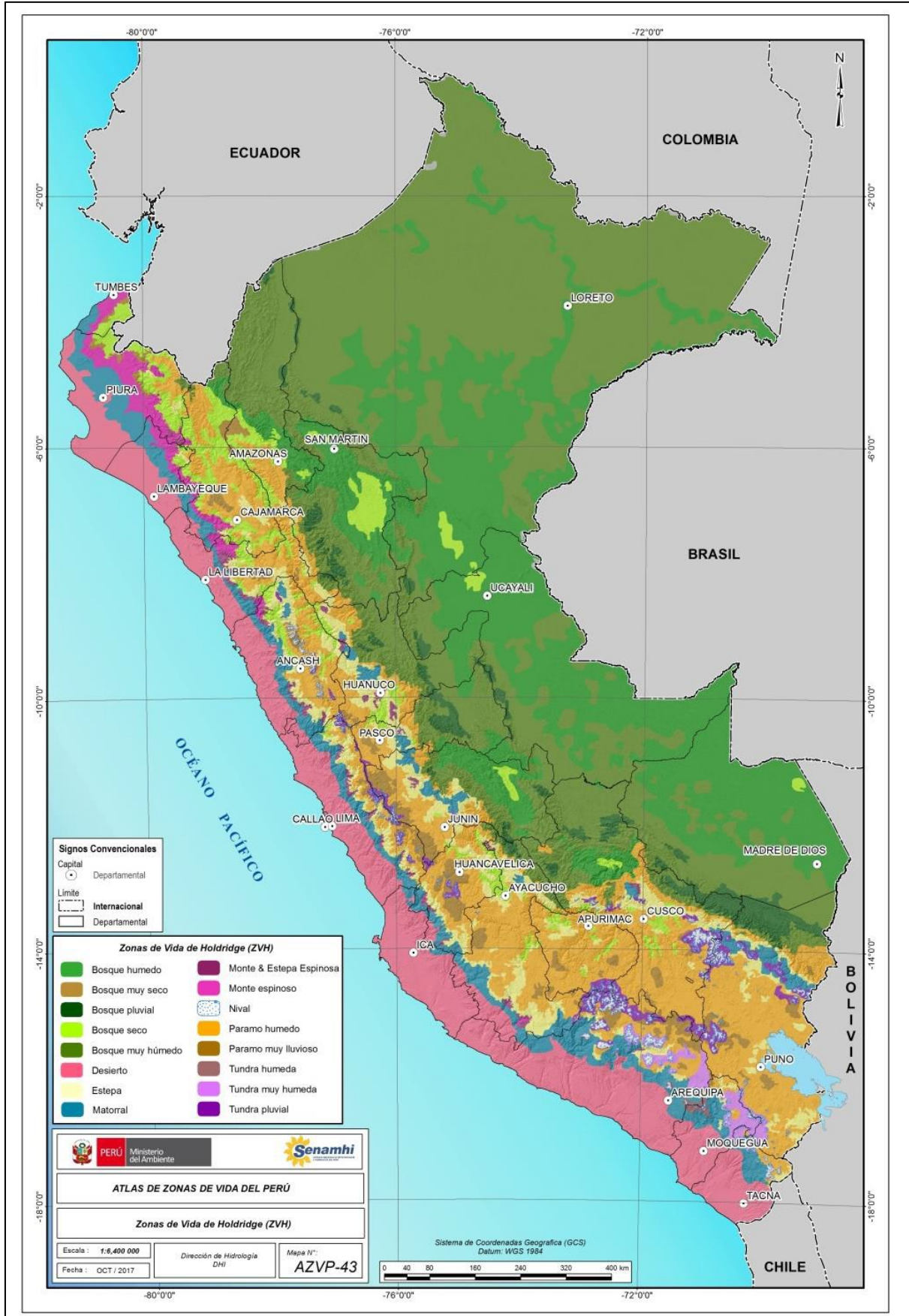
Identificando que el distrito de Calca tiene una predominancia de clasificación climática de los climas semiseco, templado, C(o,i)B', y frío, C(o,i)C', con deficiencia de humedad en otoño e invierno; y el clima lluvioso con otoño e invierno secos, templado, B(o,i)B'.

2.3.11. Zonas de Vida Holdridge

También podemos identificar las zonas de vida que predominan Determinando que Calca tiene una predominancia de zonas de vida de Estepa, Páramo Húmedo, Matorral y Tundra Pluvial, según el mapa realizado por el SENAMHI (Aybar & Lavado, 2017):



Figura 9: Principales zonas de vida del Perú.



Nota: (Aybar & Lavado, 2017)



2.3.12. Distribuciones de Weibull

La velocidad del viento varía con el tiempo y se pueden emplear distribuciones estadísticas para este caso. Las distribuciones de Weibull generalmente se emplean para modelar distribuciones de velocidad del viento (Torres et al., 2005). Esta curva normalizada se puede usar como herramienta para la identificación de parámetros óptimos del aerogenerador (Jangamshetti & Rau, 2001). De la distribución de Weibull se tiene los parámetros de forma “k” y el parámetro de escala “c” (Shi & Erdem, 2017) (en el software WAsP Climate Analyst v3 está representado por Weibull-A).

El parámetro de forma y escala de Weibull se puede estimar a partir de la siguiente ecuación (Shi & Erdem, 2017):

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{x}}\right)^{-1.086} \quad (16).$$

$$\frac{c}{\bar{x}} = \left(0.568 + \frac{0.433}{k}\right)^{\frac{-1}{k}} \quad (17).$$

Donde σ es la desviación estándar de la velocidad del viento y x es la velocidad media del viento.

El parámetro "k" puede tomar valores mayores o menores que 1, considerando lo que mencionan Burton et al. (2021): el parámetro k indica la variación de las velocidades medias horarias del viento con respecto a la media anual. (...) Un valor más alto de k, como 2.5 o 3, indica un sitio donde la variación de la velocidad media del viento por hora es pequeña sobre la media anual. Un valor más bajo de k, como 1.5 o 1.2, indica una mayor variabilidad sobre la media.

2.3.13. Clasificación Estándar del Viento o Clases de Energía Eólica

Kalmikov (2017) utiliza la siguiente clasificación de la **Tabla 3** basado en la distribución de probabilidad de Rayleigh de la densidad media de energía eólica equivalente a 1500 m de altitud sobre el nivel del mar.



Tabla 3

Clases de Energía Eólica Medidas a 50 m Sobre el Suelo de acuerdo con la Clasificación Basada en la Densidad de Energía Eólica NREL

Wind Power Class	Resource Potential	Wind Density W/m ²	Power W/m ²	Wind Speed m/s
1	Poor	0-200		0.0-5.9
2	Marginal	200-300		5.9-6.7
3	Fair	300-400		6.7-7.4
4	Good	500-600		7.4-7.9
5	Excellent	500-600		7.9-8.4
6	Outstanding	600-800		8.4-9.3
7	Superb	>800		>9.3

Nota: Kalmikov (2017).

AWS Scientific (1997) a su vez plantea la siguiente clasificación a 30 y 50 metros encima del suelo en la **Tabla 4**. Las clases 4 o superior generalmente se consideran adecuadas para la mayoría de las aplicaciones de turbinas eólicas. La clase 3 es adecuada para el desarrollo de la energía eólica utilizando turbinas altas (por ejemplo, 50 m de altura del buje). Las de clase 2 son marginales y las de clase 1 no son adecuadas para el desarrollo de la energía eólica.

Tabla 4

Clases de Densidad de Potencial Eólico (WPD)

Wind Power Class	30 m		50 m	
	Wind Power Density W/m ²	Wind Speed m/s	Wind Power Density W/m ²	Wind Speed m/s
1	≤160	≤5.1	≤200	≤5.6
2	≤240	≤5.9	≤300	≤6.4
3	≤320	≤6.5	≤400	≤7.0
4	≤400	≤7.0	≤500	≤7.5
5	≤480	≤7.4	≤600	≤8.0
6	≤640	≤8.2	≤800	≤8.8
7	≤1600	≤11.0	≤2000	≤11.9

Nota: AWS Scientific (1997).

2.4. Marco Conceptual:

2.4.1. Energía Eólica:

Esta es aquella que es producto del viento, específicamente de la energía cinética generada por este, y es transformada en energía mecánica o eléctrica por máquinas compuestas por aspas



oblicuas unidas por un eje giratorio, llamadas aerogeneradores o turbinas eólicas (Osinerghin, 2017).

2.4.2. Parques Eólicos:

Agrupación o conglomerado de varios aerogeneradores (Osinerghin, 2017).

2.4.3. Potencial Eólico:

Es la capacidad de los recursos eólicos para generar electricidad. Este término es el mismo que “Potencial de Energía Eólica”. Según Prasad & Bansal (2011) se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad .$$

Donde P_w es la energía eólica (W), ρ es la densidad del aire y v es la velocidad del viento. Esto representa la energía total obtenida del flujo del viento. Obteniéndose el potencial eólico en Watts (W).

2.4.4. Densidad de Energía Eólica:

Según Kalmikov (2017): Es costumbre normalizar la energía eólica ambiental dividiendo por el área de interés; es decir, en términos de flujo de potencia específico, esto nos lleva a la definición de *flujo cinético de energía eólica*, conocido como densidad de energía eólica (wind potential density - WPD). De manera similar a las definiciones de flujo y caudal, el flujo de energía eólica es el caudal de energía eólica por unidad de área (W/m²) dado por:

$$WPD = \frac{1}{2} \rho v^3.$$

2.4.5. Mapa Eólico:

Según Faiella et al., (2008): Es una representación de la magnitud y la dirección de los vientos de una región en forma gráfica, utilizando cartografía con una escala y simbología determinada. Los datos más frecuentemente representados sobre el mapa son la velocidad media del viento (medida en m/s), la dirección del viento promedio (expresada en forma de flecha o símbolos característicos de ploteo en meteorología), la densidad media de energía



(medida en W/m^2), la distribución de frecuencias, las rosas de los vientos, los parámetros de Weibull (A y k), (...) los resultados deben presentar no sólo los datos promedio históricos, sino también los regímenes estacionales y los ciclos diurnos y nocturnos del recurso.

2.4.6. Micro Escala:

Turbinas eólicas con una capacidad de generación de entre 0,3 y 100 kW, esto las hace ideales para comunidades rurales y poblados urbanos que sean ideales para el aprovechamiento del viento. Estas pequeñas turbinas se utilizan principalmente para la generación distribuida, generando electricidad para su uso en el sitio de instalación (citado por Rojas Maita, 2020).

También se le llama micro escala al alcance difiere del término de resolución, en cuanto al alcance existen diferentes niveles (microescala, mesoescala y macroescala), microescala tiene un alcance local pero su resolución es de entre 10 a 100m, mesoescala tiene un alcance nacional pero una resolución de 5km aproximadamente, macroescala tiene alcance global pero su resolución es de aproximadamente 50-200km (Badger et al., 2009).

2.4.7. Evaluación:

Es el proceso mediante se estima la producción de energía eléctrica futura en un determinado lugar (citado por Rojas Maita, 2020).

2.5. Hipótesis

2.5.1. Hipótesis General

El potencial eólico en el distrito de Calca es capaz de proporcionar energía eléctrica.

2.5.2. Hipótesis Específicas

- La velocidad y dirección promedio del viento del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco entre los años 2017 y 2022, tienen valores adecuados para el aprovechamiento del viento como fuente de energía eléctrica.
- La densidad promedio del viento del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco entre los años 2017 y 2022, es aceptable para la evaluación del potencial eólico.



- El potencial eólico del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco entre los años 2017 y 2022, alcanza valores aceptables que permiten que lo catalogan como viento aceptable para la producción de energía eléctrica.

2.6. Variables

2.6.1. Identificación de Variables

Las variables que se utilizaron son cuantitativas, continuas, por lo cual se utilizaron métodos estadísticos descriptivos inferenciales paramétricos.

2.6.1.1. Variable de Caracterización:

Parámetros meteorológicos: Velocidad, Dirección del viento, y Densidad del viento que es determinada por la temperatura y humedad.

Indicadores:

Velocidad del viento (m/s)

Dirección del viento (°)

Temperatura del aire (°C)

Humedad del aire (%)

Densidad del aire (kg/m³)

2.6.1.2. Variable de Interés

Potencial Eólico

Indicador:

Clase de Energía Eólica.

2.6.2. Operacionalización de Variables

2.6.2.1. Variable de Caracterización

Tabla 5

Matriz de Operacionalización de Variable de Caracterización

Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores	Índices	Instrumento
Parámetros meteorológicos	Son parámetros que caracterizan	Condiciones del viento	Velocidad.	(m/s)	Anemómetro



la situación de la atmósfera	Dirección de viento.	(°)	Veleta
	Temperatura del aire.	(°C)	Termómetro
Densidad del aire	Humedad del aire.	(%)	Higrómetro

2.6.2.2. Variable de Interés

Tabla 6

Matriz de Operacionalización de Variable de Interés

Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores	Índices	Instrumento
Potencial eólico	Es la capacidad de recursos eólicos para generar electricidad. Este término es el mismo que “Potencial de Energía Eólica” “El potencial eólico por unidad de área perpendicular a la corriente de viento W/m ²	Clase de Energía Eólica	Densidad de energía eólica	(W/m ²)	Software WAsP Climate Analyst v3



Capítulo III

3. Metodología

3.1. Diseño de Investigación

El diseño utilizado fue la investigación no experimental longitudinal debido a que los valores obtenidos de la data de parámetros climáticos y del viento se procesan para obtener la cantidad de energía, mas no se hacen pruebas experimentales. Un diseño no experimental se define según Hernández-Sampieri & Mendoza (2018): Lo que efectúas en la investigación no experimentales es observar o medir fenómenos y variables tal como se dan en su contexto natural, para analizarlas, y es longitudinal ya que la recolección de datos se realiza en varios momentos y se recaban en diferentes puntos del tiempo para realizar inferencias acerca de la evolución del problema de investigación o fenómeno, sus causas y sus efectos.

3.2. Nivel de Investigación

El alcance de esta investigación es descriptivo, puesto que se va a evaluar cómo es y cómo se manifiesta el potencial eólico del distrito de Calca. Un alcance descriptivo se define según Hernández-Sampieri & Mendoza (2018): Tienen como finalidad especificar propiedades y características de conceptos, fenómenos, variables o hechos en un contexto determinado.

3.3. Tipo de Investigación

El tipo de investigación del presente trabajo de investigación es la Investigación Cuantitativa, según Hernández-Sampieri & Mendoza (2018): cuantitativo se vincula a conteos numéricos y métodos matemáticos.

3.4. Población y Muestra

POBLACIÓN: Parámetro climático de viento del distrito de Calca, es decir, la caracterización de la velocidad y dirección del viento del distrito de Calca.

MUESTRA: Data del estado del Viento recopilada de la Estación automática Calca con código 472976f8 (SENAMHI) ubicada en Longitud: 71°57'18.85"O Latitud: 13°19'59.97"S, durante el periodo 2017-2022.



3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

La presente investigación utilizó dos técnicas de recolección de datos debido al tipo, alcance y diseño de investigación:

3.5.1. Instrumentos Mecánicos y Electrónicos

Este es el primer procedimiento, se utiliza sistemas de medición por aparatos, estos son los que presenta la estación de automática Calca (SENAMHI) ubicada en Longitud: $71^{\circ}57'18.85''\text{O}$ Latitud: $13^{\circ}19'59.97''\text{S}$ para medir la velocidad del viento, la dirección del viento, la humedad y la temperatura. Estos datos serán recopilados en hojas de cálculo.

3.5.2. Análisis de Indicadores, Fórmulas y Ecuaciones

Según Hernández-Sampieri & Mendoza (2018), un fenómeno o variable multidimensional puede medirse a través de uno o más indicadores, y determinarse el valor de los casos o unidades mediante una ecuación, fórmula o ponderación.

Este es el caso de la presente investigación, ya que para obtener los datos de la densidad del aire y, posteriormente, los datos del potencial eólico de Calca, se necesita hacer uso de los datos obtenidos por la estación automática de Calca (de velocidad, dirección del viento, temperatura y humedad), y con ayuda de hojas de cálculo y el programa IBM SPSS Statistics v23, para obtener los datos de la densidad del aire y, finalmente, el Potencial Eólico de Calca, con ayuda del software WAsP Climate Analyst v3.



Tabla 7

Matriz de Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Variables	Dimensiones	Indicadores	Técnica	Instrumento
Variables de caracterización: parámetros meteorológicos.	Condiciones del viento.	Velocidad.	Instrumentos mecánicos y electrónicos, recopilación de datos, validación de datos.	Anemómetro de la Estación automática Calca con código 472976f8, (SENAMHI) Hoja de cálculo Excel.
		Dirección de viento.	Instrumentos mecánicos y electrónicos, recopilación de datos, validación de datos.	Veleta de la Estación automática Calca con código 472976f8, (SENAMHI) Hoja de cálculo Excel.
	Densidad del aire.	Temperatura del aire.	Instrumentos mecánicos y electrónicos, recopilación de datos, validación de datos.	Termohigrómetro de la Estación automática Calca con código 472976f8, (SENAMHI) Hoja de cálculo Excel.
		Humedad del aire.	Instrumentos mecánicos y electrónicos, recopilación de datos, validación de datos.	Termohigrómetro de la Estación automática Calca con código 472976f8, (SENAMHI) Hoja de cálculo Excel.
Variable de Interés: Potencial eólico.	Clase de Energía Eólica.	Densidad de energía eólica.	Análisis de indicadores, fórmulas y ecuaciones.	Software WASP Climate Analyst v3.



3.5.3. Validez y confiabilidad de instrumentos

Los instrumentos mecánicos y electrónicos de la Estación Automática con código 472976f8 del SENAMHI ubicada en Calca en Longitud: 71°57'18.85"O Latitud: 13°19'59.97"S Altitud: 2921m, están certificados por INACAL.

Los instrumentos de recolección de datos, como las hojas de cálculo, fueron elaborados de acuerdo con las necesidades de la investigación y fueron revisados y evaluados por docentes especialistas de la Universidad Andina del Cusco

Los instrumentos de análisis de indicadores, como es el software WASP Climate Analyst v3 fueron revisados y evaluados por docentes de la Universidad Andina del Cusco.

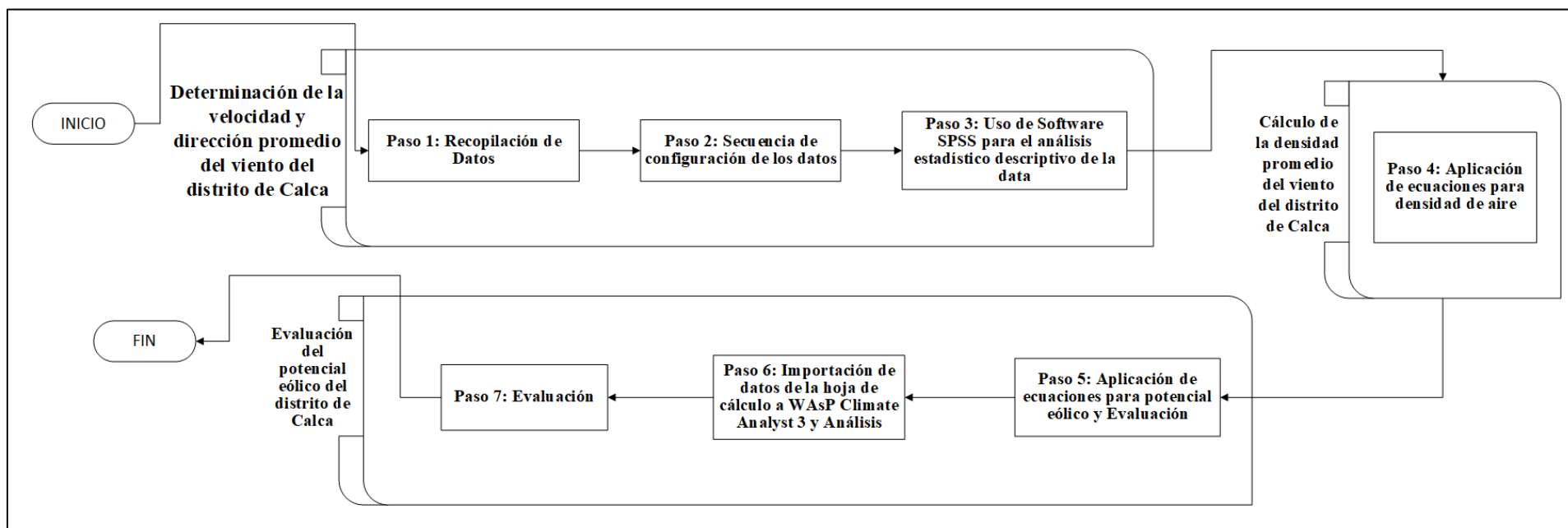


3.5.4. Desarrollo de la metodología

En el siguiente diagrama de flujo se muestra el desarrollo de la metodología empleada en el presente trabajo de investigación

Figura 10

Diagrama de flujo del Desarrollo de la Metodología





3.5.4.1. Determinación de la velocidad y dirección promedio del viento del distrito de Calca

Paso 1: Recopilación de Datos

La recopilación de datos de parámetros climatológicos se realizó desde la plataforma del SENAMHI: <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones>, seleccionando la estación automática de Calca con código 472976f8, y se descargaron los datos de cada mes desde enero del 2017 a diciembre del 2022, en formato de archivo .ccv para trabajarlo en hoja de cálculo.

Paso 2: Secuencia de configuración de los datos

- La data de parámetros climatológicos obtenida del paso 1 que ya se encuentra separada por meses, se une en un solo archivo Excel.
- Se verificó la existencia y continuidad de datos del 2017 al 2022 de la estación automática de Calca con código 472976f8, sin embargo, se tiene data inexistente de los meses de abril, mayo, junio y julio del año 2017.
- Se dio formato a los datos y se ordena en celdas y columnas independientes, no debe haber celdas combinadas. El software a utilizar es Excel.

Paso 3: Uso de Software IBM SPSS Statistics V23 para el análisis estadístico descriptivo de la data

Se importó los datos al software IBM SPSS Statistics V23 para ser objeto de análisis estadístico descriptivo cuantitativo y así obtener los Estadísticos descriptivos a 10 metros sobre el suelo de parámetros climáticos y energía eólica, estos son: Medidas de tendencia central (media, mediana, moda), medidas de dispersión (desviación estándar, varianza, mínimo y máximo), medidas de distribución (curtosis y asimetría)

3.5.4.2. Cálculo de la densidad promedio del viento del distrito de Calca

Paso 4: Aplicación de ecuaciones para densidad de aire



Para hallar la densidad del aire, la data de los parámetros climáticos se ordenó en hojas de cálculo (Excel) para poder aplicar las fórmulas de las ecuaciones 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14 (ver índice de ecuaciones) y determinar la densidad del aire. Esta data se incluyó en el software IBM SPSS Statistics v23 para posteriormente evaluarse los estadísticos descriptivos.

3.5.4.3. Evaluación del potencial eólico del distrito de Calca

Paso 5: Aplicación de ecuaciones para potencial eólico y Evaluación

Una vez obtenida la data de los parámetros climáticos de velocidad de viento, dirección de viento, temperatura, humedad, densidad del aire, se usó las ecuaciones 1 y 2 (ver índice de ecuaciones) en Excel y con los resultados de las ecuaciones se obtuvo el potencial eólico y luego se introdujo la data en el IBM SPSS Statistics v23 para evaluarse los estadísticos descriptivos del potencial eólico

Paso 6: Importación de datos de la hoja de cálculo a WAsP Climate Analyst 3 y Análisis

Se importó los datos en el software WAsP Climate Analyst 3 para obtener las Series estacionales y horarias, rosas de viento, histograma de frecuencias, informes del potencial eólico para su posterior análisis.

Son necesarios datos de partida para el software WAsP Climate Analyst 3, datos de coordenadas UTM, altura de buje, velocidad de viento y dirección del viento en formato .dat, esto se logra haciendo convirtiendo el archivo Excel en archivo .ccv y luego este archivo .ccv se modifica en un bloc de notas con el siguiente encabezado (teniendo en cuenta que se deben respetar las comas y los espacios en todo el archivo):

```
date_time, Station_ID, WS_50_mean, WD_50_mean
```

```
2017-01-01 07:00, WM01, 0, 19
```

Paso 7: Evaluación

Se determinó la densidad de energía eólica con ayuda del software WAsP Climate Analyst y se obtuvieron los resultados para su evaluación en la discusión de resultados.



Los datos del parámetro de velocidad del viento obtenidos a 10 metros sobre el suelo, fueron extrapolados a una altura de 30, 50, 80 y 100 metros sobre el suelo, empleando la ecuación N°17, con el fin de realizar la evaluación del potencial eólico y realizar una comparación de resultados obtenidos a 10, 30, 50, 80 y 100 metros sobre el suelo empleando exactamente los mismos 11 pasos.

Para Ejemplificar la obtención de energía que puede producir el viento del distrito de Calca, se utilizó las ecuaciones 3, 4, 5 y 6 (ver índice de ecuaciones) y se determinó la energía eólica aprovechable o la producción de energía anual AEP a 10, 30, 50, 80 y 100 metros sobre el nivel del suelo.



Capítulo IV

4. Resultados

4.1. Determinación de Estadísticos Descriptivos de la Velocidad, Dirección, Densidad y Energía Eólica del Viento del Distrito de Calca

Para la presente investigación se utilizó el software IBM SPSS Statistics v23 para la determinación de los estadísticos descriptivos cuantitativos de los parámetros climáticos y de la energía eólica.

4.1.1. Estadísticos Descriptivos a 10 metros

En la **Tabla 8**, se presenta los datos recopilados de los parámetros climáticos temperatura, humedad, densidad del aire, velocidad y dirección del viento; y la energía eólica a 10 metros sobre el suelo en el distrito de Calca. Cuyos datos se presentan en forma de estadísticas descriptivas: Medidas de tendencia central (media, mediana, moda), medidas de dispersión (desviación estándar, varianza, mínimo y máximo), medidas de distribución (curtosis y asimetría)

Tabla 8

Estadísticos Descriptivos a 10 metros

	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Densidad del aire (kg/m ³)	Velocidad del Viento a 10m (m/s)	Dirección del Viento (°)	Energía eólica (W/m ²)
N Válido	48458.00	48418.00	48424.00	48452.00	48448.00	48409.00
N Perdidos	107.00	147.00	141.00	113.00	117.00	156.00
Media	14.20	62.39	.85	1.33	142.61	7.27
Mediana	13.50	64.00	.85	.70	144.00	.14
Moda	10.10	100.00	.86 ^a	.00	28.00	.00
Desviación estándar	5.50	23.40	.02	1.57	96.79	21.51
Varianza	30.25	547.53	.00	2.45	9368.41	462.67
Asimetría	.14	-.21	.05	1.40	.39	7.85
Curtosis	-.70	-1.00	-.62	1.73	-.83	130.14
Mínimo	-1.30	5.00	.81	.00	.00	.00
Máximo	29.50	100.00	.90	12.40	360.00	789.97

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

La temperatura presentó una media de 14.2°C con una desviación estándar de 5.5°C, lo que indica que la temperatura varía significativamente en la zona de estudio. Asimismo, la humedad media del 62.3% con una desviación estándar de 23.4 %, sugiere que la zona es bastante



húmeda. En cuanto a la densidad del aire, se obtuvo una media de 0.85 kg/m^3 con una desviación estándar de 0.02 kg/m^3 , lo que sugiere que la zona tiene una densidad de aire relativamente constante.

En cuanto a la velocidad del viento, se obtuvo una media de 1.33 m/s con una desviación estándar de 1.56 m/s , lo que sugiere que la velocidad del viento varía significativamente en la zona de estudio. Por su parte, la dirección del viento presenta una media de 142.61° con una desviación estándar de 96.79° , lo que indica que la dirección del viento también varía significativamente en la zona de estudio.

Finalmente, la energía eólica promedio es de 7.27 W/m^2 , lo que sugiere que hay una cantidad pequeña de energía disponible en el viento en la zona de estudio. No obstante, es importante tener en cuenta que la desviación estándar es de 21.50 W/m^2 , lo que indica que la cantidad de energía disponible en el viento varía significativamente en la zona.

En resumen, la temperatura varía significativamente, mientras que la zona es bastante húmeda y tiene una densidad de aire relativamente constante. La velocidad y dirección del viento varían significativamente en la zona de estudio. También se observa que hay una cantidad significativa de energía eólica disponible en la zona, pero la cantidad varía significativamente y puede ser considerablemente mayor que la media en ciertos momentos.

En cuanto a la asimetría y la curtosis, son medidas estadísticas que nos ayudan a comprender la forma y distribución de los datos en una muestra. La asimetría indica si la distribución de los datos es simétrica o sesgada hacia un lado. Un valor de asimetría cercano a cero indica una distribución simétrica, mientras que un valor positivo indica una distribución sesgada hacia la derecha (cola larga a la derecha) y un valor negativo indica una distribución sesgada hacia la izquierda (cola larga a la izquierda).

En la **Tabla 8**, la asimetría para la temperatura, la humedad y la densidad del aire son cercanas a cero, lo que sugiere una distribución aproximadamente simétrica. La asimetría para



la velocidad del viento es positiva, lo que indica una cola larga hacia la derecha, es decir, hay valores más altos de velocidad del viento que alejan la distribución de una distribución normal.

La curtosis indica la forma de la distribución de los datos y mide la cantidad de datos que se concentran en el centro de la distribución en comparación con las colas. Un valor de curtosis cercano a cero indica una distribución normal o mesocúrtica, mientras que un valor positivo indica una distribución leptocúrtica (más puntiaguda en el centro) y un valor negativo indica una distribución platicúrtica (más achatada en el centro).

La curtosis para la temperatura, la humedad y la densidad del aire son cercanas a cero, lo que sugiere una distribución aproximadamente normal. La curtosis para la velocidad del viento es positiva, lo que indica una distribución más puntiaguda en el centro. La curtosis para la energía eólica es muy alta, lo que sugiere una distribución muy puntiaguda en el centro y con colas muy largas, es decir, que hay pocos datos con una alta concentración de energía y muchos datos con baja concentración de energía.

Para ver los histogramas de frecuencias ver Anexo C (Fig. 28-33).

4.1.2. Estadísticos Descriptivos a 30 metros

En la **Tabla 10**, los datos recopilados son de los parámetros de viento de la densidad del aire, velocidad, y la energía eólica en el distrito de Calca extrapolados a una altura de 30 metros sobre el suelo. Los datos se presentan en forma de estadísticas descriptivas: Medidas de tendencia central (media, mediana, moda), medidas de dispersión (desviación estándar, varianza, mínimo y máximo), medidas de distribución (curtosis y asimetría).

Tabla 9
Estadísticos Descriptivos a 30 metros

		Densidad del aire (kg/m ³)	Velocidad del viento a 30m (m/s)	Energía eólica (W/m ²)
N	Válido	48424.00	48458.00	48409.00
	Perdidos	141.00	107.00	156.00
Media		.85	1.65	14.00
Mediana		.85	.87	.28
Moda		.86 ^a	.00	.00
Desviación estándar		.02	1.95	41.43
Varianza		.00	3.81	1716.19



Asimetría	.05	1.40	7.85
Curtosis	-.62	1.73	130.14
Mínimo	.81	.00	.00
Máximo	.90	15.45	1521.45

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

NOTA: La razón por la cual solamente se han evaluado los datos de densidad del aire, velocidad y energía eólica es que al utilizar la ecuación (17) para la extrapolación de los datos del parámetro velocidad del viento a una altura de 30 metros, solamente los datos que han sufrido cambios son la velocidad y la energía eólica obtenida, en cambio con la densidad del aire, esta cambió ya que la presión atmosférica a 2951 metros (a 30m) es diferente a la presión a 2921 (10m).

Los resultados muestran que la densidad del aire promedio a 30 metros es de 0.85 kg/m^3 , con una desviación estándar de 0.02 kg/m^3 , lo que indica que la zona tiene una densidad de aire relativamente constante. La velocidad del viento promedio a 30 metros es de 1.65 m/s , con una desviación estándar de 1.95 m/s , lo que sugiere que la velocidad del viento varía significativamente en la zona de estudio. Además, la asimetría para la velocidad del viento es positiva, lo que indica una cola larga hacia la derecha, es decir, hay valores más altos de velocidad del viento que alejan la distribución de una distribución normal.

La energía eólica promedio es de 14 W/m^2 , lo que indica que hay una cantidad significativa de energía disponible en el viento en la zona de estudio. Sin embargo, la desviación estándar es de 41.43 W/m^2 , lo que sugiere que la cantidad de energía disponible en el viento varía significativamente en la zona. En general, estos resultados son útiles para comprender mejor las condiciones del viento en la zona de estudio y evaluar su potencial para la generación de energía eólica.

Para ver los histogramas de frecuencias ver Anexo C (Fig. 34-36).

4.1.3. Estadísticos Descriptivos a 50 metros

En la **Tabla 10**, los datos recopilados son de los parámetros de viento de la densidad del aire, velocidad, y la energía eólica en el distrito de Calca extrapolados a una altura de 50 metros sobre el suelo. Los datos se presentan en forma de estadísticas descriptivas: Medidas de tendencia central (media, mediana, moda), medidas de dispersión (desviación estándar, varianza, mínimo y máximo), medidas de distribución (curtosis y asimetría)



Tabla 10
Estadísticos Descriptivos a 50 metros

		Densidad del aire (kg/m ³)	Velocidad del viento a 50m (m/s)	Energía eólica (W/m ²)
N	Válido	48420.00	48410.00	48409.00
	Perdidos	145.00	155.00	156.00
Media		.85	1.83	18.98
Mediana		.85	.97	.38
Moda		.85 ^a	.00	.00
Desviación estándar		.02	2.16	56.14
Varianza		.00	4.66	3152.21
Asimetría		.05	1.40	7.85
Curtosis		-.62	1.73	130.14
Mínimo		.80	.00	.00
Máximo		.90	17.11	2061.97

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

NOTA: La razón por la cual solamente se han evaluado los datos de densidad del aire, velocidad y energía eólica es que al utilizar la ecuación (17) para la extrapolación de los datos del parámetro velocidad del viento a una altura de 50 metros, solamente los datos que han sufrido cambios son la velocidad y la energía eólica obtenida, en cambio con la densidad del aire, esta cambió ya que la presión atmosférica a 2971 metros (a 50m) es diferente a la presión a 2921 (10m).

Los resultados muestran que la densidad del aire promedio a 50 metros es de 0.84 kg/m³, con una desviación estándar de 0.01 kg/m³, lo que indica que la zona tiene una densidad de aire relativamente constante. La velocidad del viento promedio a 50 metros es de 1.83m/s, con una desviación estándar de 2.15 m/s, lo que sugiere que la velocidad del viento varía significativamente en la zona de estudio. Además, la asimetría para la velocidad del viento es positiva, lo que indica una cola larga hacia la derecha, es decir, hay valores más altos de velocidad del viento que alejan la distribución de una distribución normal.

La energía eólica promedio es de 18.97 W/m², lo que indica que hay una cantidad significativa de energía disponible en el viento en la zona de estudio. Sin embargo, la desviación estándar es de 56.14 W/m², lo que sugiere que la cantidad de energía disponible en el viento varía significativamente en la zona. En general, estos resultados son útiles para comprender mejor las condiciones del viento en la zona de estudio y evaluar su potencial para la generación de energía eólica.

Para ver los histogramas de frecuencias ver Anexo C (Fig. 37-39).



4.1.4. Estadísticos Descriptivos a 80 metros

En la Tabla 11, los datos recopilados son de los parámetros de viento de la densidad del aire, velocidad, y la energía eólica en el distrito de Calca extrapolados a una altura de 80 metros sobre el suelo. Los datos se presentan en forma de estadísticas descriptivas: Medidas de tendencia central (media, mediana, moda), medidas de dispersión (desviación estándar, varianza, mínimo y máximo), medidas de distribución (curtosis y asimetría)

Tabla 11
Estadísticos Descriptivos a 80 metros

		Densidad del aire (kg/m ³)	Velocidad del Viento a 80m (m/s)	Energía eólica (W/m ²)
N	Válido	48424.00	48458.00	48409.00
	Perdidos	141.00	107.00	156.00
Media		.84	2.01	25.07
Mediana		.84	1.06	.50
Moda		.85 ^a	.00	.00
Desviación estándar		.02	2.37	74.16
Varianza		.00	5.64	5499.26
Asimetría		.05	1.40	7.85
Curtosis		-.62	1.73	130.14
Mínimo		.80	.00	.00
Máximo		.89	18.79	2723.51

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

NOTA: La razón por la cual solamente se han evaluado los datos de densidad del aire, velocidad y energía eólica es que al utilizar la ecuación (17) para la extrapolación de los datos del parámetro velocidad del viento a una altura de 80 metros, solamente los datos que han sufrido cambios son la velocidad y la energía eólica obtenida, en cambio con la densidad del aire, esta cambió ya que la presión atmosférica a 3001 metros (a 80m) es diferente a la presión a 2921 (10m).

Los resultados muestran que la densidad del aire promedio a 80 metros es de 0.84 kg/m³, con una desviación estándar de 0.02 kg/m³, lo que indica que la zona tiene una densidad de aire relativamente constante. La velocidad del viento promedio a 80 metros es de 2.01 m/s, con una desviación estándar de 2.37 m/s, lo que sugiere que la velocidad del viento varía significativamente en la zona de estudio. Además, la asimetría para la velocidad del viento es positiva, lo que indica una cola larga hacia la derecha, es decir, hay valores más altos de velocidad del viento que alejan la distribución de una distribución normal.

La energía eólica promedio es de 25.07 W/m², lo que indica que hay una cantidad significativa de energía disponible en el viento en la zona de estudio. Sin embargo, la desviación estándar es de 74.16 W/m², lo que sugiere que la cantidad de energía disponible en



el viento varía significativamente en la zona. En general, estos resultados son útiles para comprender mejor las condiciones del viento en la zona de estudio y evaluar su potencial para la generación de energía eólica.

Para ver los histogramas de frecuencias ver Anexo C (Fig. 40-42).

4.1.5. Estadísticos Descriptivos a 100 metros

En la **Tabla 1** /Tabla 12, los datos recopilados son de los parámetros de viento de la densidad del aire, velocidad, y la energía eólica en el distrito de Calca extrapolados a una altura de 100 metros sobre el suelo. Los datos se presentan en forma de estadísticas descriptivas: Medidas de tendencia central (media, mediana, moda), medidas de dispersión (desviación estándar, varianza, mínimo y máximo), medidas de distribución (curtosis y asimetría)

Tabla 12
Estadísticos Descriptivos a 100 metros

		Densidad del aire (kg/m ³)	Velocidad del Viento a 100m (m/s)	Energía eólica (W/m ²)
N	Válido	48424.00	48458.00	48409.00
	Perdidos	141.00	107.00	156.00
Media		.84	2.10	28.59
Mediana		.84	1.11	.57
Moda		.85 ^a	.00	.00
Desviación estándar		.02	2.48	84.57
Varianza		.00	6.16	7151.98
Asimetría		.05	1.40	7.85
Curtosis		-.62	1.73	130.14
Mínimo		.80	.00	.00
Máximo		.89	19.65	3105.92

a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.

NOTA: La razón por la cual solamente se han evaluado los datos de densidad del aire, velocidad y energía eólica es que al utilizar la ecuación (17) para la extrapolación de los datos del parámetro velocidad del viento a una altura de 100 metros, solamente los datos que han sufrido cambios son la velocidad y la energía eólica obtenida, en cambio con la densidad del aire, esta cambió ya que la presión atmosférica a 3021 metros (a 100m) es diferente a la presión a 2921 (10m).

Los resultados muestran que la densidad del aire promedio a 100 metros es de 0.84 kg/m³, con una desviación estándar de 0.02 kg/m³, lo que indica que la zona tiene una densidad de aire relativamente constante. La velocidad del viento promedio a 100 metros es de 2.10 m/s, con una desviación estándar de 2.48 m/s, lo que sugiere que la velocidad del viento varía significativamente en la zona de estudio. Además, la asimetría para la velocidad del viento es



positiva, lo que indica una cola larga hacia la derecha, es decir, hay valores más altos de velocidad del viento que alejan la distribución de una distribución normal.

La energía eólica promedio es de 28.59 W/m^2 , lo que indica que hay una cantidad significativa de energía disponible en el viento en la zona de estudio. Sin embargo, la desviación estándar es de 84.57 W/m^2 , lo que sugiere que la cantidad de energía disponible en el viento varía significativamente en la zona. En general, estos resultados son útiles para comprender mejor las condiciones del viento en la zona de estudio y evaluar su potencial para la generación de energía eólica.

Para ver los histogramas de frecuencias ver Anexo C (Fig. 43-45).

4.2. Evaluación del Potencial Eólico del Distrito de Calca

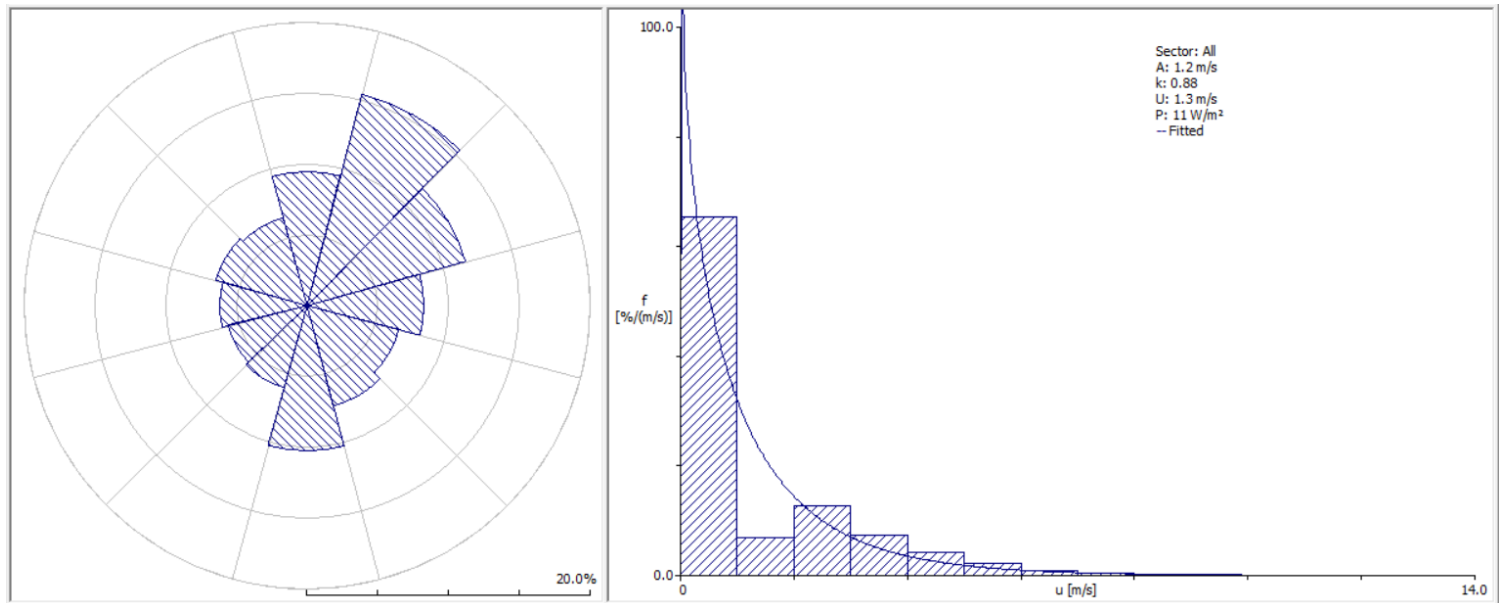
Para la Evaluación del Potencial Eólico a 10, 30, 50, 80 y 100 metros sobre el nivel del suelo, se utilizó el software WAsP Climate Analyst v3.

4.2.1. Análisis del Potencial Eólico a 10 metros

Se utilizó el software WAsP Climate Analyst v3 para el análisis solamente de la velocidad del viento y su dirección y así se obtuvo los parámetros de Weibull A y K, la velocidad media, y el potencial eólico (densidad de energía eólica) a una altura de 10 metros sobre el suelo, en la **Figura 11** se muestra la curva de frecuencias relacionada con el potencial eólico en todos los sectores. “k” representa el parámetro de forma de la distribución de Weibull, que indica la variabilidad del viento en el área. “U” es la velocidad media y “P” es el potencial eólico del lugar. También se presenta la rosa de viento para todos los sectores.

Figura 11

Rosa de Viento y Distribución de Weibull, todos los sectores a 10 metros



El clima de viento y potencial eólico en todos los sectores a 10m se detallan en la **Tabla 13**.

Tabla 13

Clima de Viento y Potencial Eólico a 10 metros

Sector		Clima de viento				Energía	
#	Angulo (°)	Frecuencia (%)	Weibull-A (m/s)	Weibull-k	Velocidad media (m/s)	Potencial eólico (W/m ²)	
1	0	9.4	1.5	1.13	1.46	9	
2	30	15.4	2.9	1.53	2.63	30	
3	60	11.6	2.2	1.28	2.07	19	
4	90	8.3	1.1	0.94	1.15	7	
5	120	6.7	0.7	0.88	0.75	2	
6	150	7.3	0.7	0.75	0.83	5	
7	180	10.2	1.8	1.24	1.71	12	
8	210	6.0	0.7	1.24	0.67	1	
9	240	5.7	0.7	1.26	0.64	1	
10	270	6.2	0.6	0.70	0.71	4	
11	300	6.7	0.4	0.60	0.65	6	
12	330	6.4	0.7	0.94	0.73	2	
Todo	-	-	1.2	0.88	1.28	11	
Datos fuente	-	-	-	-	1.08	11	



La **Tabla 13** muestra datos relacionados con el clima de viento y el potencial eólico. El sector se identifica mediante un número del 1 al 12 y se indica el ángulo correspondiente en grados.

La columna "Clima de viento" incluye la frecuencia de ocurrencia en porcentaje de cada ángulo de viento en el sector. En la columna "Weibull-A (m/s)", se presenta el parámetro A de la distribución de Weibull, que es el parámetro de escala. En la columna "Weibull-k", se presenta el parámetro k de la distribución de Weibull, que indica la variabilidad del viento en el área. llamado "k" (o "factor de forma Weibull") para ajustar mejor la distribución a los datos observados. La columna "Velocidad media (m/s)" muestra la velocidad media del viento en el sector en m/s.

Finalmente, en la columna "Potencial eólico (W/m^2)" se muestra el potencial eólico en W/m^2 para cada sector.

En la fila "Todo" se muestran los valores promedio del parámetro A, el parámetro k, la velocidad media del viento y el potencial eólico para toda el área. En la fila "Datos fuente" se indica que no se proporcionan datos para los parámetros A y k, pero se indica la velocidad media del viento y el potencial eólico promedio para el área.

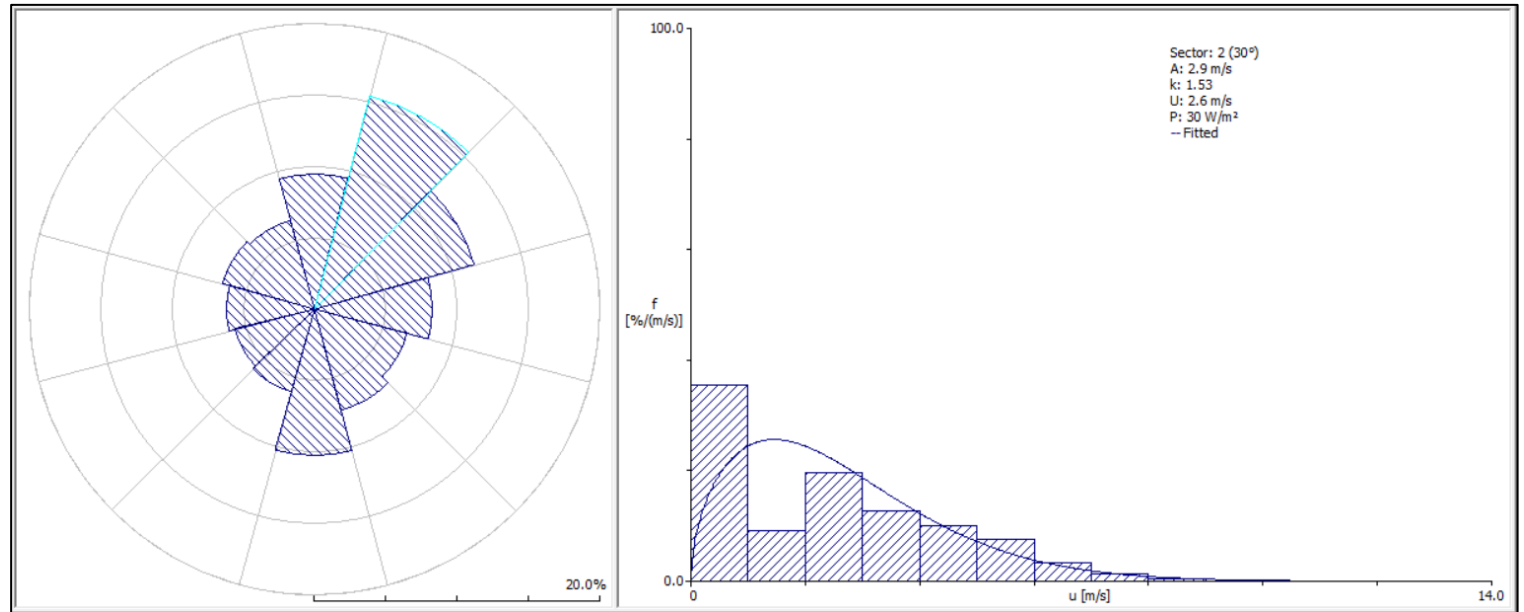
Teniendo en cuenta la **Tabla 13** y la **Figura 11** observamos que hay tres sectores que cuentan con valores mayores que los demás sectores, estos son los sectores 2, 3 y 7. A continuación explico estos sectores, sin embargo, las demás rosas de vientos de los demás sectores están en el Anexo D (Fig. 46- 54).

El sector 2, ver Figura 12, está apuntando 30° a la derecha considerando que el norte es a 0° , tiene una frecuencia de 15.4% lo que sugiere el viento en esta dirección está presente un 15.4% de todo el tiempo evaluado, tiene una Weibull-A de 2.90 m/s y una Weibull-k de 1.53, esto significa que la velocidad media del viento en la ubicación es de 2.90 m/s y que la variabilidad de la velocidad del viento es mayor sobre la media. con un valor de k ligeramente

mayor a 1. La forma de campana de la distribución de Weibull indica que la velocidad del viento en esa ubicación tiene una probabilidad de variar sobre la media en la mayoría de las veces, y que las velocidades del viento bajas y altas son menos probables. Así pues, tenemos una velocidad media de 2.63 m/s y un potencial eólico de 30 W/m² en este sector.

Figura 12

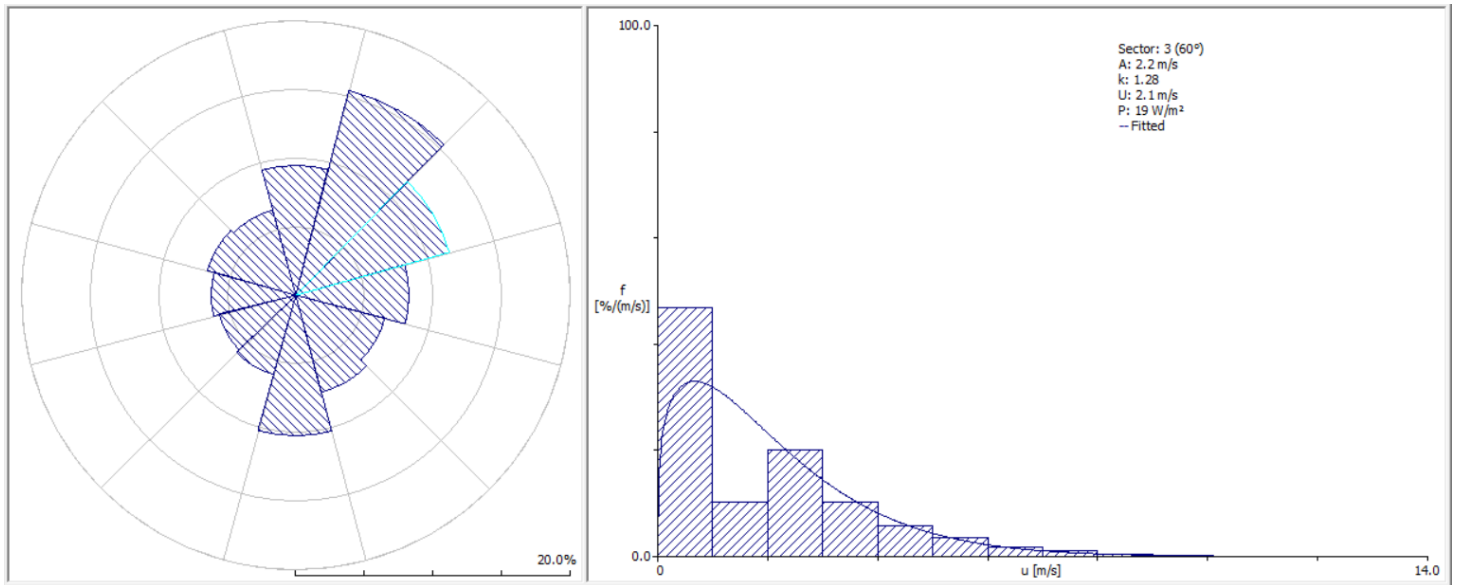
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 2, a 10 metros



El sector 3, ver **Figura 13**, está apuntando 60° a la derecha considerando que el norte es a 0°, tiene una frecuencia de 11.6% lo que sugiere el viento en esta dirección está presente un 11.6% del tiempo evaluado, tiene una Weibull-A de 2.2m/s y una Weibull-k de 1.28, esto significa que la velocidad media del viento en la ubicación es de 2.20 m/s y que la variabilidad de la velocidad del viento es mayor sobre la media. con un valor de k ligeramente mayor a 1. Tenemos una velocidad media de 2.07 m/s y un potencial eólico de 19 W/m² en este sector.

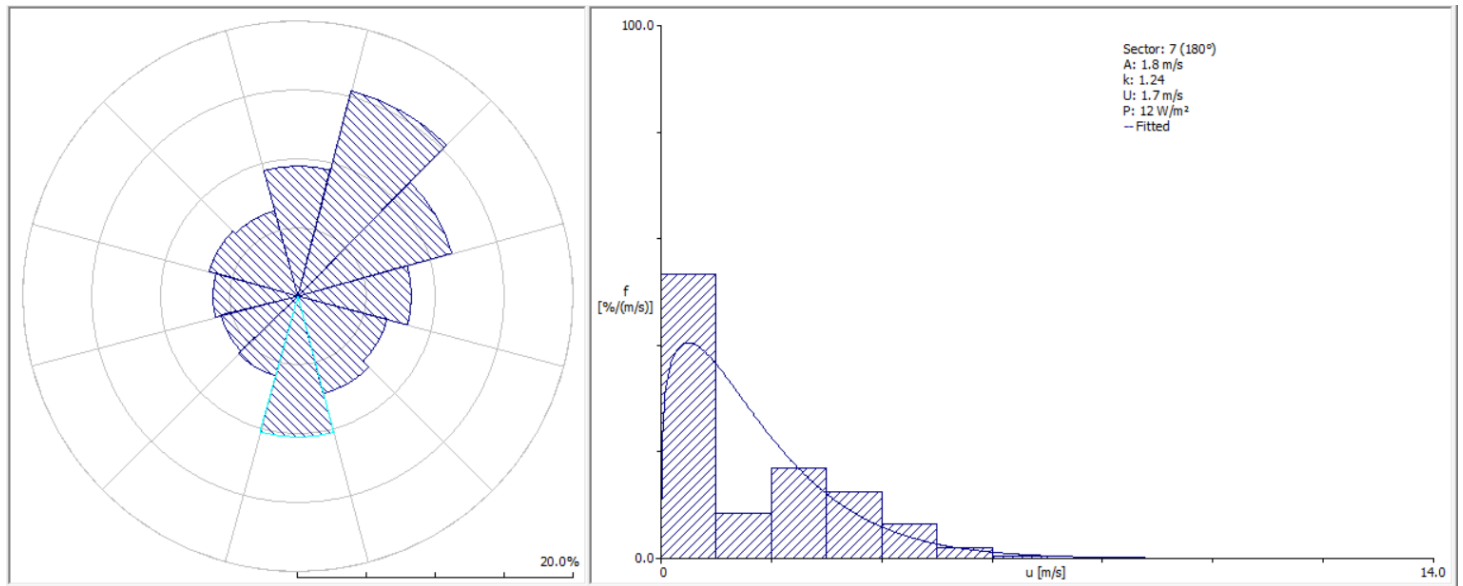
Figura 13

Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 3, a 10 metros.



El sector 7, ver **Figura 14**, está apuntando 180° a la derecha considerando que el norte es a 0°, tiene una frecuencia de 10.2% lo que sugiere el viento en esta dirección está presente un 10.2% de todo el tiempo evaluado, tiene una Weibull-A de 1.8 m/s y una Weibull-k de 1.24, esto significa que la velocidad media del viento en la ubicación es de 1.8 m/s y que la variabilidad de la velocidad del viento es mayor sobre la media. con un valor de k ligeramente mayor a 1. Tenemos una velocidad media de 1.71 m/s y un potencial eólico de 12 W/m² en este sector.

Figura 14
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 7, a 10 metros



4.2.1.1. Variaciones Horarias y Estacionales del Viento a 10 metros

La **Tabla 14** muestra las velocidades medias del viento cada hora por mes en el lugar de estudio a una altura de 10 metros. Cada columna representa un mes y cada fila representa una hora del día.

Tabla 14

Velocidades Medias del Viento (cada hora, por mes) a 10 metros

Velocidades medias del viento (cada hora, por mes) a 10 metros													
Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
0	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	1.0	0.7	0.5
1	0.7	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1	0.3	0.4	0.5	0.8	0.9	0.5
2	0.7	0.6	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	0.7	0.8	0.4
3	0.5	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.6	0.4
4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.1	0.2	0.1	0.2	0.4	0.4	0.5	0.4	0.3
5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3
6	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3
7	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.4	0.3
8	0.7	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.5	0.7	0.7	1.2	0.7	0.6
9	1.1	0.8	0.9	1.0	0.7	0.7	0.6	1.1	1.3	1.5	1.7	1.1	1.0
10	1.3	1.2	1.3	1.5	1.3	1.4	1.3	1.9	1.9	2.0	1.9	1.5	1.5
11	1.6	1.6	1.5	1.8	2.0	2.1	2.0	2.4	2.0	2.1	2.1	1.9	1.9
12	1.9	1.8	1.8	2.1	2.2	2.5	2.4	2.6	2.4	2.7	2.5	2.1	2.3
13	2.3	2.1	2.2	2.2	2.5	2.6	2.5	2.7	3.4	3.5	2.8	2.5	2.6



14	2.5	2.4	2.4	2.6	3.1	3.0	2.8	3.4	4.5	3.9	3.1	2.9	3.0
15	2.6	2.2	2.5	3.0	3.3	3.2	3.4	4.4	4.2	3.8	3.2	2.6	3.2
16	2.4	2.1	2.2	2.7	3.5	4.0	3.9	4.7	4.0	3.5	2.9	2.5	3.2
17	1.7	1.7	1.7	2.0	2.9	3.4	3.4	4.1	3.5	2.8	2.4	2.1	2.6
18	1.5	1.3	1.4	1.5	1.9	2.1	2.3	3.0	2.7	2.3	2.1	1.8	2.0
19	1.3	1.1	1.4	1.1	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	1.8	2.0	1.6	1.6
20	1.0	1.0	0.9	0.7	1.0	1.1	1.0	1.3	1.0	1.4	1.5	1.3	1.1
21	1.0	0.9	0.7	0.5	0.5	0.5	0.6	0.8	0.7	1.0	1.3	1.2	0.8
22	0.7	0.8	0.7	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.6	0.8	0.9	0.9	0.6
23	0.8	0.7	0.7	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.6	0.8	0.9	0.9	0.6
Promedio	1.2	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	1.2	1.6	1.6	1.6	1.6	1.3	1.3

La **Tabla 14** muestra que las velocidades del viento disminuyen de diciembre a agosto, aumentan de agosto a noviembre. Las velocidades son más altas durante los meses de lluvia

Bajas, de 0 a 4.7 metros por segundo. Además, el promedio anual de las velocidades medias del viento ha disminuido ligeramente en un período de cinco años.

Las velocidades medias más altas se registran entre las horas 10 y 19 y en general las velocidades medias del viento aumentan a medida que avanza el día, alcanzando su máximo alrededor de las 14:00 horas y disminuyendo a medida que avanza la noche.

La **Tabla 15** muestra las velocidades medias del viento, en metros por segundo, en el punto de monitoreo de la estación automática de Calca durante los años 2017-2022, por mes. Los valores faltantes se indican con "---".

Tabla 15

Velocidades Medias del Viento (cada año, por mes) a 10 metros

Velocidades medias del viento (cada año, por mes)													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
2017	1.2	1.2	1.1	---	---	---	---	1.6	1.7	1.6	1.4	1.5	1.4
2018	1.1	1.2	1.1	1.1	1.3	1.3	1.1	1.7	1.4	1.3	1.4	1.3	1.3
2019	1.1	1.0	1.0	0.9	1.0	1.1	1.3	1.4	1.6	1.7	1.5	1.3	1.3
2020	1.1	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.7	2.7	2.5	1.6	1.3	1.5
2021	1.4	1.1	1.1	1.0	1.1	1.3	1.3	1.6	1.6	1.6	1.6	1.3	1.3
2022	1.1	1.0	1.1	1.2	1.3	1.2	1.2	1.4	1.6	1.5	1.8	1.4	1.3
Promedio	1.2	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	1.2	1.6	1.8	1.7	1.6	1.3	1.4

Algunas observaciones que se pueden hacer a partir de la **Tabla 15** son:



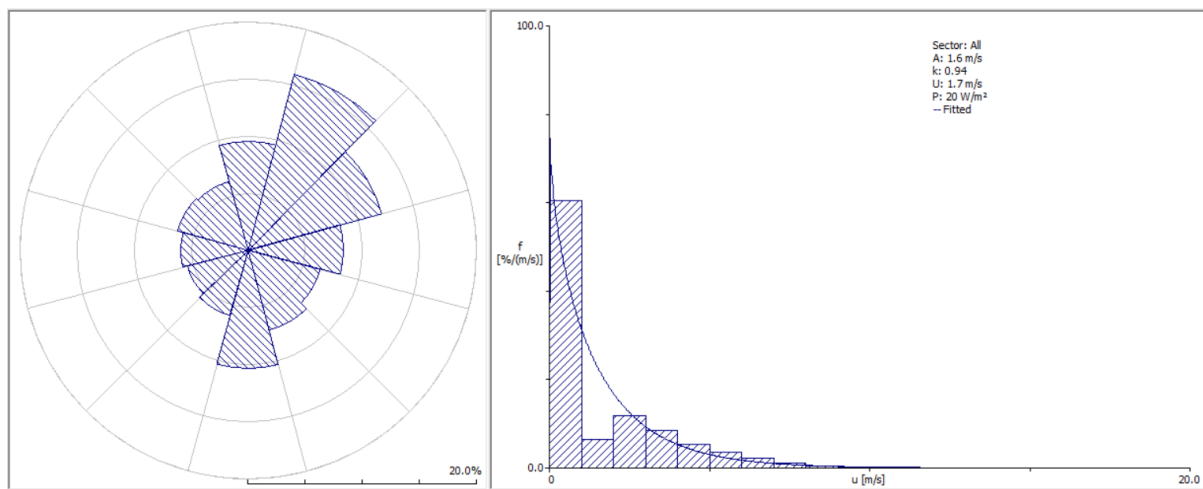
- Las velocidades medias del viento son generalmente bajas, en el rango de 1.0 a 2.7 metros por segundo.
- Hay variaciones estacionales en las velocidades medias del viento. En particular, las velocidades medias del viento son más altas en los meses de septiembre y octubre en comparación con los demás meses.
- También hay variaciones interanuales en las velocidades medias del viento, lo que indica que el patrón del viento puede ser bastante variable de un año a otro.
- En general, las velocidades medias del viento parecen haber disminuido en los últimos años, especialmente en los meses de enero y febrero.
- El promedio anual de las velocidades medias del viento parece haber disminuido ligeramente durante el período de cinco años.

4.2.2. Análisis del Potencial Eólico a 30 metros

Se utilizó el software WAsP Climate Analyst v3 para el análisis solamente de la velocidad del viento y su dirección y así se obtuvo los parámetros de Weibull A y K, la velocidad media, y el potencial eólico (densidad de energía eólica) a una altura de 30 metros sobre el suelo, en la Figura 15 se muestra la curva de frecuencias relacionada con el potencial eólico en todos los sectores. “k” representa el parámetro de forma de la distribución de Weibull, que indica la variabilidad del viento en el área. “U” es la velocidad media y “P” es el potencial eólico del lugar. También se presenta la rosa de viento para todos los sectores.

Figura 15

Rosa de Viento y Distribución de Weibull, todos los sectores a 30 metros



El clima de viento y potencial eólico en todos los sectores a 10m se detallan en la **Tabla 20**.

Tabla 16

Clima de Viento y Potencial Eólico a 30 metros

#	Sector	Angulo (°)	Frecuencia (%)	Clima de viento		Energía	
				Weibull-A (m/s)	Weibull- k	Velocidad media (m/s)	Potencial eólico (W/m ²)
1		0	9.5	2.0	1.21	1.90	16
2		30	15.9	3.4	1.44	3.13	54
3		60	12.2	2.7	1.25	2.50	35
4		90	8.4	1.5	1.01	1.50	12
5		120	6.5	0.6	0.71	0.73	4
6		150	7.2	1.0	0.79	1.09	9
7		180	10.3	2.3	1.30	2.17	21
8		210	5.9	0.7	1.03	0.73	1
9		240	5.5	0.7	1.04	0.70	1
10		270	5.9	0.4	0.55	0.61	8
11		300	6.4	0.6	0.61	0.85	12
12		330	6.2	0.6	0.75	0.72	3
	Todo	-	-	1.6	0.94	1.67	20
	Datos fuente	-	-	-	-	1.44	21

La **Tabla 16** muestra datos relacionados con el clima de viento y el potencial eólico. El sector se identifica mediante un número del 1 al 12 y se indica el ángulo correspondiente en grados.



La columna "Clima de viento" incluye la frecuencia de ocurrencia en porcentaje de cada ángulo de viento en el sector. En la columna "Weibull-A (m/s)", se presenta el parámetro A de la distribución de Weibull, que es el parámetro de escala. En la columna "Weibull-k", se presenta el parámetro k de la distribución de Weibull, que indica la variabilidad del viento en el área. llamado "k" (o "factor de forma Weibull") para ajustar mejor la distribución a los datos observados. La columna "Velocidad media (m/s)" muestra la velocidad media del viento en el sector en m/s.

Finalmente, en la columna "Potencial eólico (W/m^2)" se muestra el potencial eólico en W/m^2 para cada sector.

En la fila "Todo" se muestran los valores promedio del parámetro A, el parámetro k, la velocidad media del viento y el potencial eólico para toda el área. En la fila "Datos fuente" se indica que no se proporcionan datos para los parámetros A y k, pero se indica la velocidad media del viento y el potencial eólico promedio para el área.

Teniendo en cuenta la **Tabla 16** y la **Figura 15** observamos que hay tres sectores que cuentan con valores mayores que los demás sectores, estos son los sectores 2, 3 y 7. A continuación explico estos sectores, sin embargo, las demás rosas de vientos de los demás sectores están en el Anexo D (Fig. 55- 63).

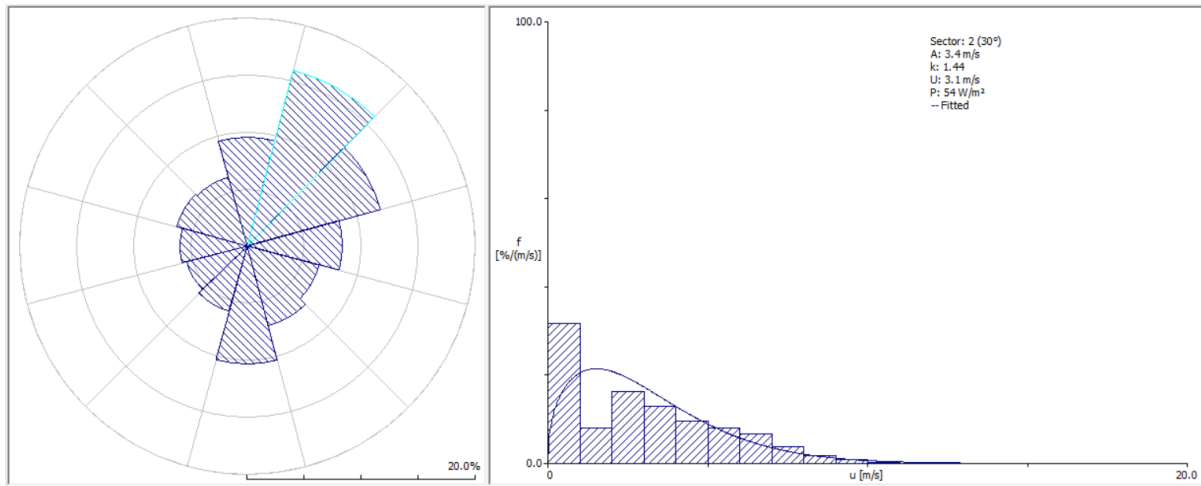
El sector 2, ver **Figura 16**, está apuntando 30° a la derecha considerando que el norte es a 0° , tiene una frecuencia de 15.9% lo que sugiere el viento en esta dirección está presente un 15.9% de todo el tiempo evaluado, tiene una Weibull-A de 3.4 m/s y una Weibull-k de 1.44, esto significa que la velocidad media del viento en la ubicación es de 3.4 m/s y que la variabilidad de la velocidad del viento es mayor sobre la media. con un valor de k ligeramente mayor a 1. La forma de campana de la distribución de Weibull indica que la velocidad del viento en esa ubicación tiene una probabilidad de variar sobre la media en la mayoría de las



veces, y que las velocidades del viento bajas y altas son menos probables. Así pues, tenemos una velocidad media de 3.13 m/s y un potencial eólico de 54 W/m² en este sector.

Figura 16

Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 2, a 30 metros

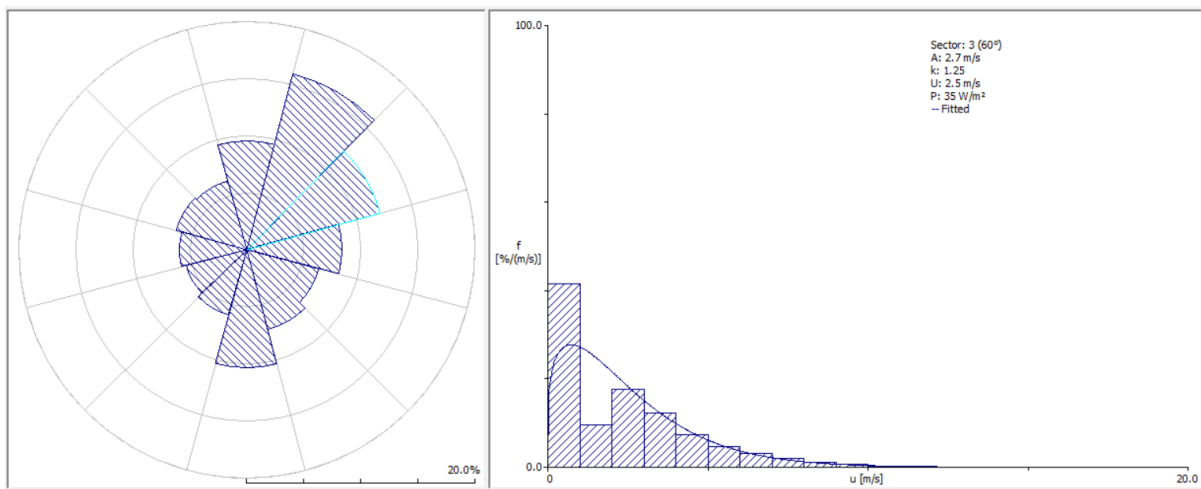


El sector 3, ver **Figura 17**, está apuntando 60° a la derecha considerando que el norte es a 0°, tiene una frecuencia de 12.2 % lo que sugiere el viento en esta dirección está presente un 12.2 % del tiempo evaluado, tiene una Weibull-A de 2.7 m/s y una Weibull-k de 1.25, esto significa que la velocidad media del viento en la ubicación es de 2.7 m/s y que la variabilidad de la velocidad del viento es mayor sobre la media. con un valor de k ligeramente mayor a 1. Tenemos una velocidad media de 2.50 m/s y un potencial eólico de 35 W/m² en este sector.



Figura 17

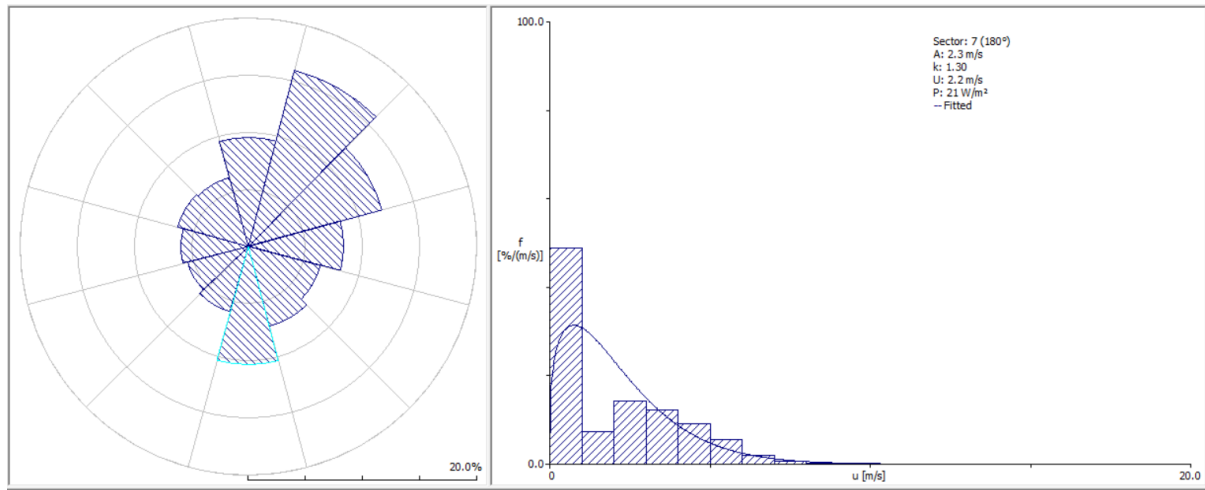
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 3, a 30 metros.



El sector 7, ver **Figura 18**, está apuntando 180° a la derecha considerando que el norte es a 0°, tiene una frecuencia de 10.3% lo que sugiere el viento en esta dirección está presente un 10.3% de todo el tiempo evaluado, tiene una Weibull-A de 2.3 m/s y una Weibull-k de 1.30, esto significa que la velocidad media del viento en la ubicación es de 2.3 m/s y que la variabilidad de la velocidad del viento es mayor sobre la media. con un valor de k ligeramente mayor a 1. Tenemos una velocidad media de 2.17 m/s y un potencial eólico de 21 W/m² en este sector.

Figura 18

Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 7, a 30 metros



4.2.2.1. Variaciones Horarias y Estacionales del Viento a 30 metros

La **Tabla 17** muestra las velocidades medias del viento cada hora por mes en el lugar de estudio a una altura de 30 metros. Cada columna representa un mes y cada fila representa una hora del día.

Tabla 17

Velocidades Medias del Viento (cada hora, por mes) a 30 metros

Velocidades medias del viento (cada hora, por mes) a 30 metros													
Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
8	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1
10	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
11	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2
12	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
13	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	3	3	3
14	3	3	3	3	4	4	4	4	6	5	4	4	4
15	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	4	3	4
16	3	3	3	3	4	5	5	6	5	4	4	3	4
17	2	2	2	2	4	4	4	5	4	4	3	3	3



18	2	2	2	2	2	3	3	4	3	3	3	2	2
19	2	1	2	1	2	2	2	3	3	2	2	2	2
20	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	1
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1
22	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
Promedio	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2

La **Tabla 17** muestra que desde noviembre a marzo las velocidades del viento tienden a ser bajas, con valores predominantes de 0 y 1 m/s. A partir de abril, las velocidades del viento comienzan a aumentar gradualmente. Durante los meses de mayo a septiembre, las velocidades del viento son generalmente más altas, con valores predominantes de 2 m/s.

Oscilan entre 0 a 6 Muestra que la mayoría de las horas y meses tienen valores de 0, 1 o 2 m/s.

Las velocidades medias más altas se registran entre las horas 13 y 18. En general, las velocidades medias del viento aumentan a medida que avanza el día, con un máximo alrededor de las 15 y 16 horas; y disminuyen a medida que avanza la noche.

La **Tabla 18** muestra las velocidades medias del viento, en metros por segundo, en el punto de monitoreo de la estación automática de Calca durante los años 2017-2022, por mes. Los valores faltantes se indican con "---".

Tabla 18

Velocidades Medias del Viento (cada año, por mes) a 30 metros

Velocidades medias del viento (cada año, por mes)													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
2017	2	2	1	---	---	---	---	2	2	2	2	2	2
2018	1	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2
2019	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
2020	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	2	2	2
2021	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
2022	1	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2
Promedio	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2

Algunas observaciones que se pueden hacer a partir de la **Tabla 18** son:



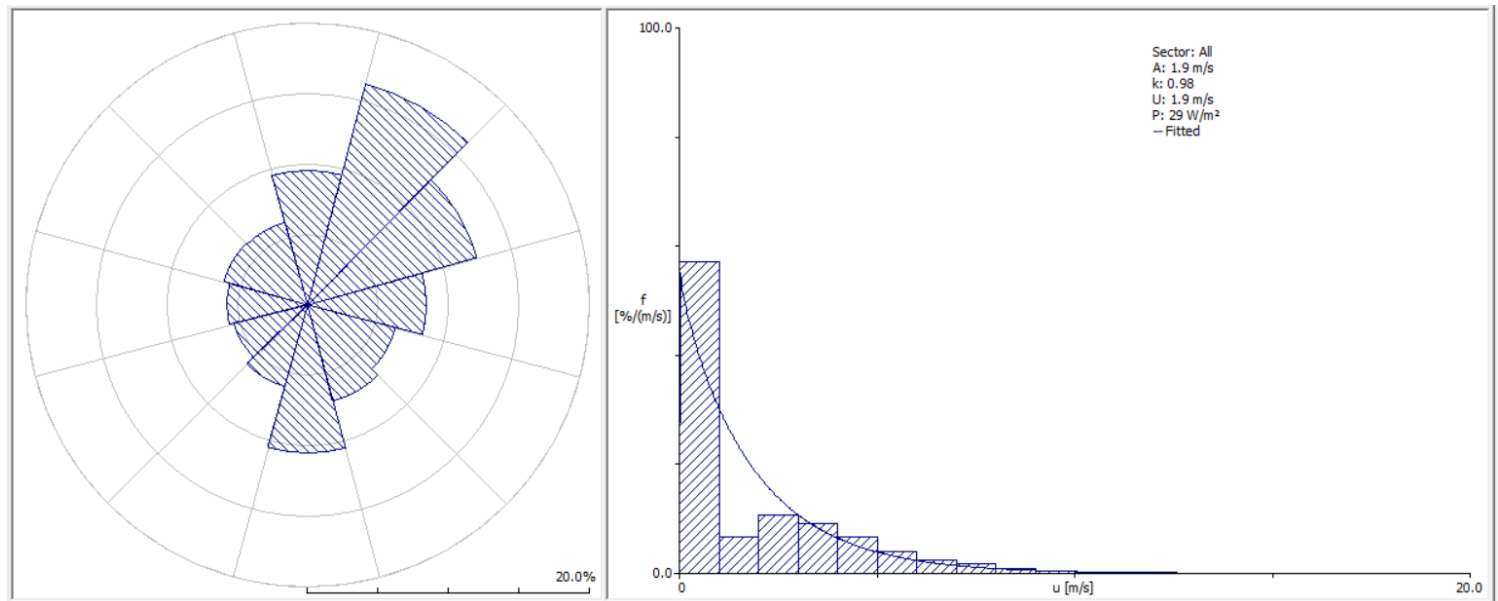
- Las velocidades medias del viento son moderadas a lo largo del año en todos los años registrados.
- Durante los meses de enero a marzo, así como en noviembre y diciembre, las velocidades del viento tienden a ser bajas, con valores predominantes de 1 m/s.
- A partir de abril, las velocidades del viento se mantienen en niveles moderados con valores predominantes de 1 y 2 m/s.
- Los años 2020 y 2021 presentan una mayor variabilidad en las velocidades del viento, con algunos meses con valores de 3, indicando velocidades más altas.
- El promedio anual muestra que las velocidades medias del viento son constantes a lo largo de los años, con un valor de 2m/s.
- Se observa una consistencia en las velocidades del viento a lo largo de los años.

4.2.3. Análisis del Potencial Eólico a 50 metros

De igual manera se utilizó el software WAsP Climate Analyst v3 para el análisis solamente de la velocidad del viento extrapolado a una altura de 50 metros sobre el suelo y su dirección y así se obtuvo los parámetros de Weibull A y K, la velocidad media, y el potencial eólico (densidad de energía eólica).

En la Figura 19 se muestra la curva de frecuencias relacionada con el potencial eólico en todos los sectores. En la figura “k”, representa el parámetro de forma de la distribución de Weibull, que indica la variabilidad del viento en el área. “U”, es la velocidad media y “P” es el potencial eólico del lugar. También se presenta la rosa de viento para todos los sectores.

Figura 19
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, todos los sectores a 50 metros



La **Tabla 19** muestra datos relacionados con el clima de viento y el potencial eólico a 50 metros. El sector se identifica mediante un número del 1 al 12 y se indica el ángulo correspondiente en grados.

Tabla 19

Clima de Viento y Potencial Eólico a 50 metros

Sector		Clima de viento			Energía	
#	Angulo (°)	Frecuencia (%)	Weibull-A (m/s)	Weibull-k	Velocidad media (m/s)	Potencial eólico (W/m ²)
1	0	9.6	2.3	1.25	2.16	23
2	30	16.2	3.9	1.47	3.51	74
3	60	12.4	3.0	1.26	2.80	49
4	90	8.4	1.8	1.06	1.75	17
5	120	6.4	0.8	0.75	0.89	6
6	150	7.0	1.2	0.83	1.30	13
7	180	10.5	2.6	1.31	2.43	30
8	210	6.0	0.7	0.93	0.78	2
9	240	5.4	0.7	0.92	0.73	2
10	270	5.7	0.4	0.52	0.65	12
11	300	6.2	0.7	0.63	1.01	18
12	330	6.1	0.6	0.67	0.73	5
Todo	-	-	1.9	0.98	1.95	29
Datos fuente	-	-	-	-	1.64	28



La columna "Clima de viento" incluye la frecuencia de ocurrencia en porcentaje de cada ángulo de viento en el sector. En la columna "Weibull-A (m/s)", se presenta el parámetro A de la distribución de Weibull, que es el parámetro de escala. En la columna "Weibull-k", se presenta el parámetro k de la distribución de Weibull, que indica la variabilidad del viento en el área. llamado "k" (o "factor de forma Weibull") para ajustar mejor la distribución a los datos observados. La columna "Velocidad media (m/s)" muestra la velocidad media del viento en el sector en m/s.

Finalmente, en la columna "Potencial eólico (W/m^2)" se muestra el potencial eólico en W/m^2 para cada sector.

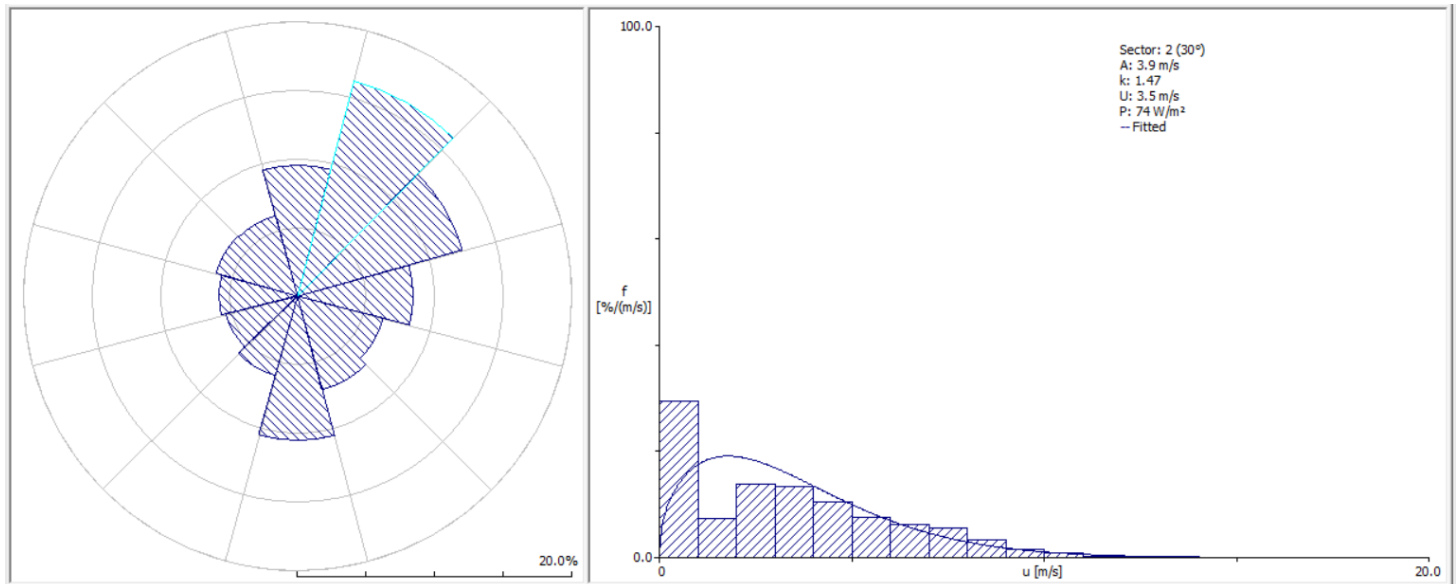
En la fila "Todo" se muestran los valores promedio del parámetro A, el parámetro k, la velocidad media del viento y el potencial eólico para toda el área. En la fila "Datos fuente" se indica que no se proporcionan datos para los parámetros A y k, pero se indica la velocidad media del viento y el potencial eólico promedio para el área.

Teniendo en cuenta la **Tabla 19** y la **Figura 19** observamos que hay tres sectores que cuentan con valores mayores que los demás sectores, estos son los sectores 2, 3 y 7. A continuación explico estos sectores, sin embargo, las demás rosas de vientos de los demás sectores están en el Anexo D (Fig. 64- 72).

El sector 2, ver Figura 20, está apuntando 30° a la derecha considerando que el norte es a 0° , tiene una frecuencia de 16.2% lo que sugiere el viento en esta dirección está presente un 16.2% de todo el tiempo evaluado, tiene una Weibull-A de 3.9m/s y una Weibull-k de 1.47, esto significa que la velocidad media del viento en la ubicación es de 3.9 m/s y que la variabilidad de la velocidad del viento es mayor sobre la media. con un valor de k ligeramente mayor a 1. La forma de campana de la distribución de Weibull indica que la velocidad del viento en esa ubicación tiene una probabilidad moderada de ser moderada en la mayoría de las

veces, y que las velocidades del viento bajas y altas son menos probables. Así pues, tenemos una velocidad media de 3.51 m/s y un potencial eólico de 74 W/m² en este sector.

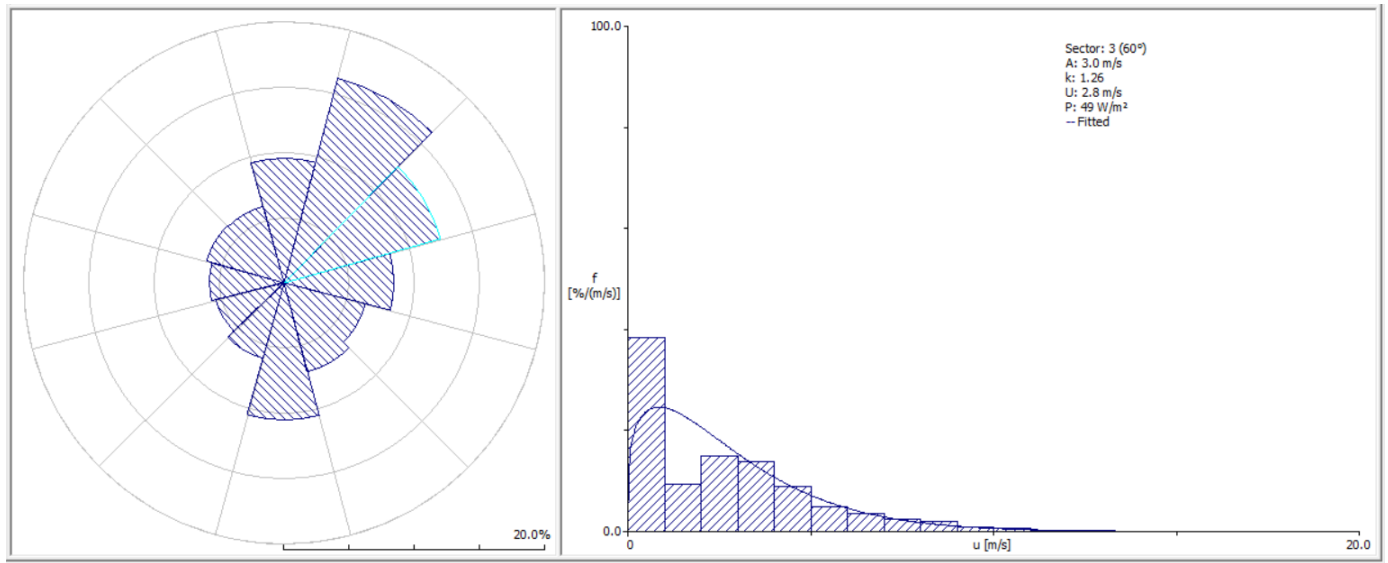
Figura 20
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 2, a 50 metros



El sector 3, ver **Figura 21**, está apuntando 60° a la derecha considerando que el norte es a 0°, tiene una frecuencia de 12.4% lo que sugiere el viento en esta dirección está presente un 12.4% de todo el tiempo evaluado, tiene una Weibull-A de 3m/s y una Weibull-k de 1.26, esto significa que la velocidad media del viento en la ubicación es de 3 m/s y que la variabilidad de la velocidad del viento es mayor sobre la media. con un valor de k ligeramente mayor a 1. Tenemos una velocidad media de 2.8 m/s y un potencial eólico de 49 W/m² en este sector.

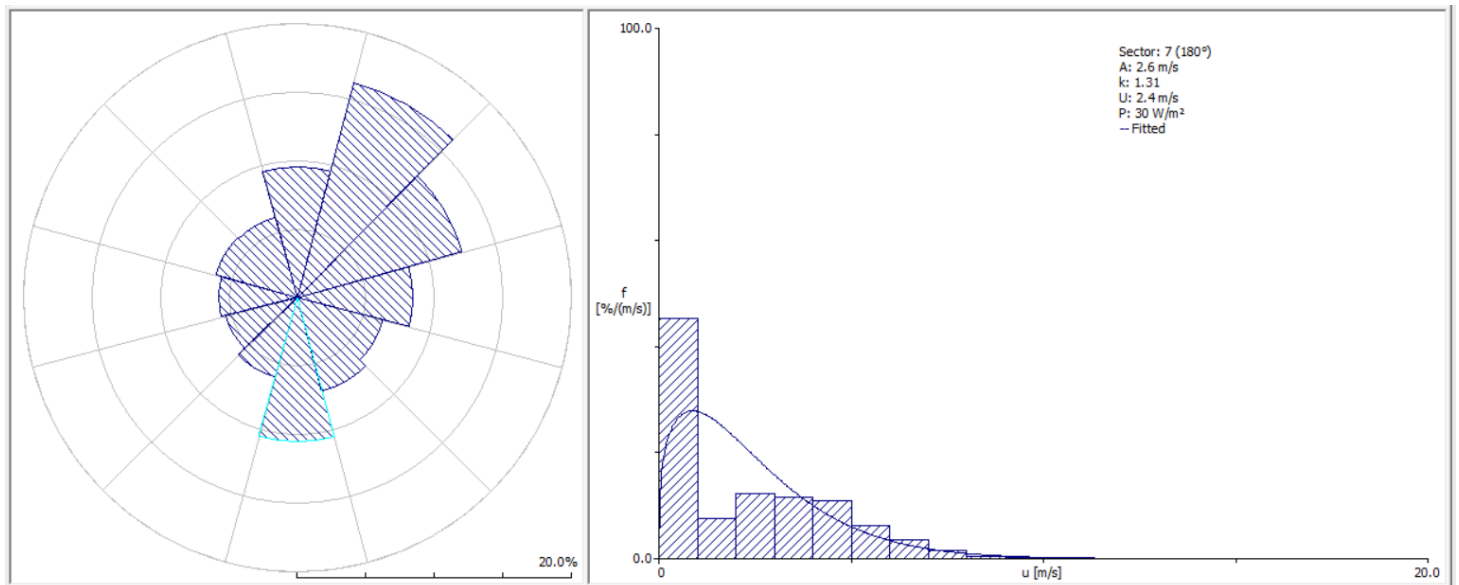


Figura 21
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 3, a 50 metros.



El sector 7, ver **Figura 22**, está apuntando 180° a la derecha considerando que el norte es a 0°, tiene una frecuencia de 10.5% lo que sugiere el viento en esta dirección está presente un 10.5% de todo el tiempo evaluado, tiene una Weibull-A de 2.6 m/s y una Weibull-k de 1.31, esto significa que la velocidad media del viento en la ubicación es de 1.8 m/s y que la variabilidad de la velocidad del viento es mayor sobre la media. con un valor de k ligeramente mayor a 1. Tenemos una velocidad media de 2.43 m/s y un potencial eólico de 30 W/m² en este sector.

Figura 22
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 7, a 50 metros



4.2.3.1. Variaciones Horarias y Estacionales del Viento a 50 metros

La **Tabla 20** muestra las velocidades medias del viento cada hora por mes en el lugar de estudio a una altura de 50 metros. Cada columna representa un mes y cada fila representa una hora del día.

Tabla 20

Velocidades Medias del Viento (cada hora, por mes) a 50 metros

Velocidades medias del viento (cada hora, por mes) a 50 metros													
Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
2	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
3	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
4	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
8	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	2	1	1
9	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1
10	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2
11	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
12	3	3	2	3	3	3	3	4	3	4	3	3	3
13	3	3	3	3	3	4	3	4	5	5	4	4	4



14	3	3	3	4	4	4	4	5	6	5	4	4	4
15	4	3	3	4	5	4	5	6	6	5	4	4	4
16	3	3	3	4	5	6	5	6	6	5	4	3	4
17	2	2	2	3	4	5	5	6	5	4	3	3	4
18	2	2	2	2	3	3	3	4	4	3	3	2	3
19	2	2	2	1	2	2	2	3	3	2	3	2	2
20	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	2	2	2
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1
22	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
Promedio	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2

La **Tabla 20**, las velocidades disminuyen de enero a septiembre, aumenta de septiembre a noviembre y disminuye en diciembre. Las velocidades medias del viento varían significativamente de un mes a otro, siendo más alta en junio, julio y agosto y más baja en abril, mayo y enero. Además, hay variaciones interanuales que sugieren que el patrón del viento puede ser bastante variable de un año a otro.

Oscilan entre 0 y 6 metros por segundo. Durante un período de cinco años, se observó una ligera disminución en el promedio anual de las velocidades medias del viento.

La velocidad media del viento varía según la hora del día, siendo más alta entre las 13:00 y las 15:00 y más baja entre las 6:00, las 5:00 y las 23:00. La velocidad del viento es más alta durante las horas del día, especialmente en la tarde, y más baja durante la noche y la madrugada

La **Tabla 21** muestra las velocidades medias del viento, en metros por segundo, en el punto de monitoreo de la estación automática de Calca durante los años 2017-2022, por mes. Los valores faltantes se indican con "---".

Tabla 21

Velocidades Medias del Viento (cada año, por mes) a 50 metros

Velocidades medias del viento (cada año, por mes)													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
2017	2	2	2	---	---	---	---	2	2	2	2	2	2
2018	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2019	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
2020	2	1	1	2	2	2	2	2	4	3	2	2	2



2021	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2022	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2
Promedio	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Algunas observaciones que se pueden hacer a partir de la **Tabla 21** son:

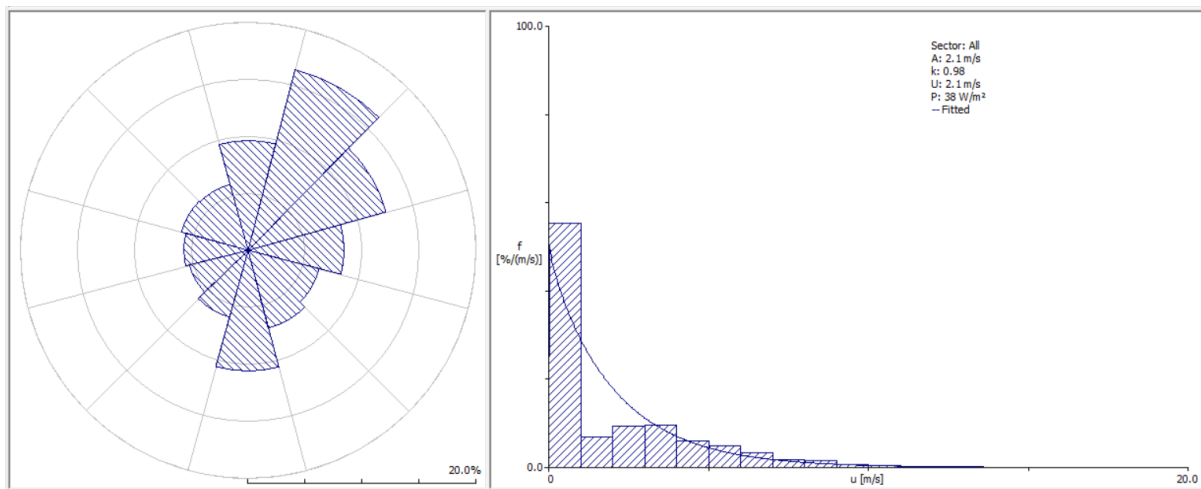
- Las velocidades medias del viento están en el rango de 1.0 a 4 metros por segundo.
- Hay variaciones estacionales en las velocidades medias del viento. En particular, las velocidades medias del viento son más altas en los meses de septiembre y octubre en comparación con los demás meses.
- También hay variaciones interanuales en las velocidades medias del viento, lo que indica que el patrón del viento puede ser bastante variable de un año a otro.
- En general, las velocidades medias del viento parecen haber disminuido en los últimos años, especialmente en los meses de enero y febrero.
- El promedio anual de las velocidades medias del viento parece haber disminuido ligeramente durante el período de cinco años.

4.2.4. Análisis del Potencial Eólico a 80 metros

Se utilizó el software WAsP Climate Analyst v3 para el análisis solamente de la velocidad del viento y su dirección y así se obtuvo los parámetros de Weibull A y K, la velocidad media, y el potencial eólico (densidad de energía eólica) a una altura de 80 metros sobre el suelo, en la **Figura 23** se muestra la curva de frecuencias relacionada con el potencial eólico en todos los sectores. “k” representa el parámetro de forma de la distribución de Weibull, que indica la variabilidad del viento en el área. “U” es la velocidad media y “P” es el potencial eólico del lugar. También se presenta la rosa de viento para todos los sectores.

Figura 23

Rosa de Viento y Distribución de Weibull, todos los sectores a 80 metros



El clima de viento y potencial eólico en todos los sectores a 80m se detallan en la **Tabla 22**.

Tabla 22

Clima de Viento y Potencial Eólico a 80 metros

#	Sector	Angulo (°)	Frecuencia (%)	Clima de viento		Energía	
				Weibull-A (m/s)	Weibull-k	Velocidad media (m/s)	Potencial eólico (W/m ²)
1		0	9.6	2.5	1.24	2.36	30
2		30	16.4	4.2	1.44	3.81	98
3		60	12.5	3.3	1.25	3.05	64
4		90	8.4	2.0	1.07	1.93	23
5		120	6.4	0.9	0.76	1.00	8
6		150	7.0	1.3	0.85	1.46	18
7		180	10.6	2.9	1.29	2.64	39
8		210	6.0	0.7	0.86	0.79	3
9		240	5.3	0.7	0.86	0.75	2
10		270	5.6	0.4	0.54	0.74	15
11		300	6.1	0.8	0.64	1.14	24
12		330	6.0	0.6	0.68	0.82	7
Todo		-	-	2.1	0.98	2.14	38
Datos fuente		-	-	-	-	1.84	37

La **Tabla 22** muestra datos relacionados con el clima de viento y el potencial eólico. El sector se identifica mediante un número del 1 al 12 y se indica el ángulo correspondiente en grados.



La columna "Clima de viento" incluye la frecuencia de ocurrencia en porcentaje de cada ángulo de viento en el sector. En la columna "Weibull-A (m/s)", se presenta el parámetro A de la distribución de Weibull, que es el parámetro de escala. En la columna "Weibull-k", se presenta el parámetro k de la distribución de Weibull, que indica la variabilidad del viento en el área. llamado "k" (o "factor de forma Weibull") para ajustar mejor la distribución a los datos observados. La columna "Velocidad media (m/s)" muestra la velocidad media del viento en el sector en m/s.

Finalmente, en la columna "Potencial eólico (W/m^2)" se muestra el potencial eólico en W/m^2 para cada sector.

En la fila "Todo" se muestran los valores promedio del parámetro A, el parámetro k, la velocidad media del viento y el potencial eólico para toda el área. En la fila "Datos fuente" se indica que no se proporcionan datos para los parámetros A y k, pero se indica la velocidad media del viento y el potencial eólico promedio para el área.

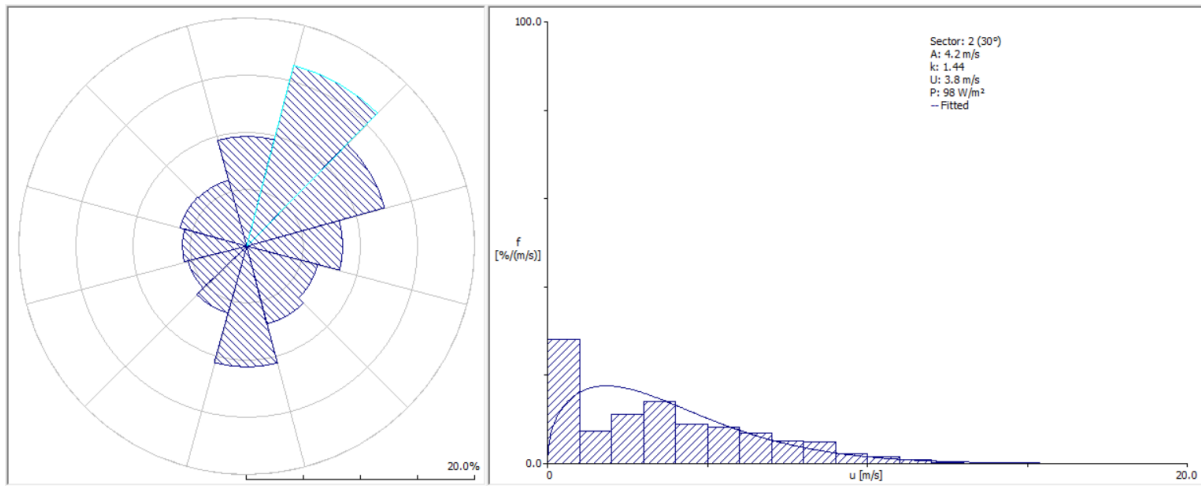
Teniendo en cuenta la **Tabla 22** y la **Figura 23** observamos que hay tres sectores que cuentan con valores mayores que los demás sectores, estos son los sectores 2, 3 y 7. A continuación explico estos sectores, sin embargo, las demás rosas de vientos de los demás sectores están en el Anexo D (Fig. 73 - 81).

El sector 2, ver **Figura 24**, está apuntando 30° a la derecha considerando que el norte es a 0° , tiene una frecuencia de 16.4% lo que sugiere el viento en esta dirección está presente un 16.4% de todo el tiempo evaluado, tiene una Weibull-A de 4.2 m/s y una Weibull-k de 1.44, esto significa que la velocidad media del viento en la ubicación es de 2.9 m/s y que la variabilidad de la velocidad del viento es mayor sobre la media. con un valor de k ligeramente mayor a 1. La forma de campana de la distribución de Weibull indica que la velocidad del viento en esa ubicación tiene una probabilidad de variar sobre la media en la mayoría de las



veces, y que las velocidades del viento bajas y altas son menos probables. Así pues, tenemos una velocidad media de 3.81 m/s y un potencial eólico de 98 W/m² en este sector.

Figura 24
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 2, a 80 metros

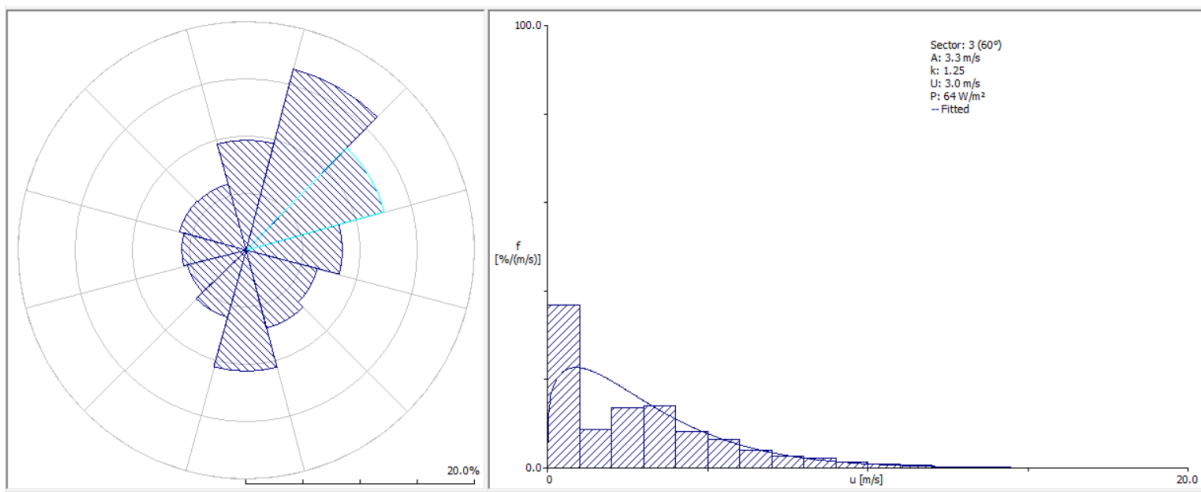


El sector 3, ver **Figura 25**, está apuntando 60° a la derecha considerando que el norte es a 0°, tiene una frecuencia de 12.5% lo que sugiere el viento en esta dirección está presente un 12.5% del tiempo evaluado, tiene una Weibull-A de 3.3 m/s y una Weibull-k de 1.25, esto significa que la velocidad media del viento en la ubicación es de 3.3 m/s y que la variabilidad de la velocidad del viento es mayor sobre la media. con un valor de k ligeramente mayor a 1. Tenemos una velocidad media de 3.05 m/s y un potencial eólico de 64 W/m² en este sector.



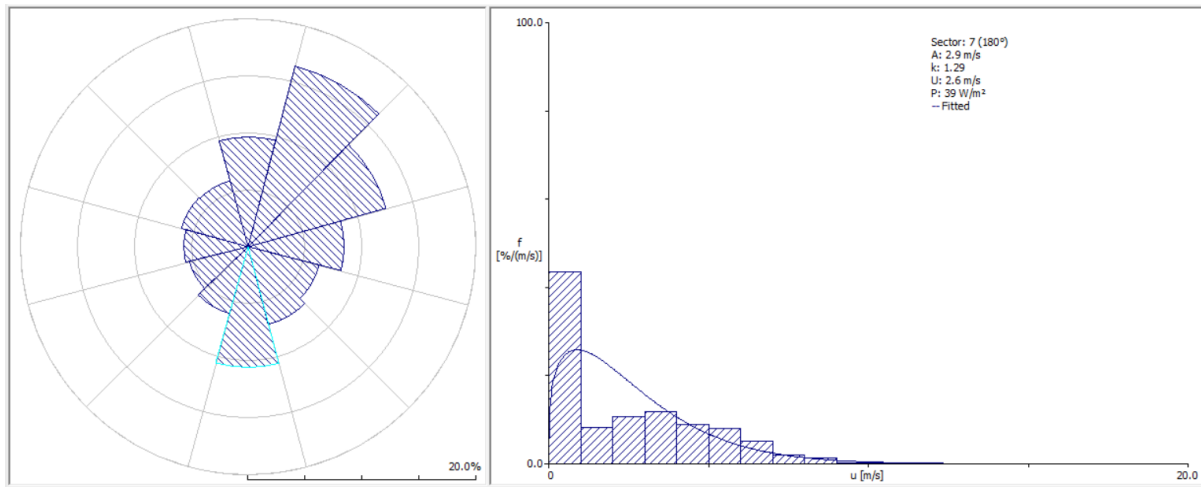
Figura 25

Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 3, a 80 metros.



El sector 7, ver **Figura 26**, está apuntando 180° a la derecha considerando que el norte es a 0°, tiene una frecuencia de 10.6% lo que sugiere el viento en esta dirección está presente un 10.6% de todo el tiempo evaluado, tiene una Weibull-A de 2.9 m/s y una Weibull-k de 1.29, esto significa que la velocidad media del viento en la ubicación es de 2.9 m/s y que la variabilidad de la velocidad del viento es mayor sobre la media. con un valor de k ligeramente mayor a 1. Tenemos una velocidad media de 2.64 m/s y un potencial eólico de 39 W/m² en este sector.

Figura 26
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 7, a 80 metros



4.2.4.1. Variaciones Horarias y Estacionales del Viento a 80 metros

La **Tabla 23** muestra las velocidades medias del viento cada hora por mes en el lugar de estudio a una altura de 80 metros. Cada columna representa un mes y cada fila representa una hora del día.

Tabla 23

Velocidades Medias del Viento (cada hora, por mes) a 80 metros

Velocidades medias del viento (cada hora, por mes) a 80 metros													
Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1
3	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
4	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
8	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	2	1	1
9	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	2	2
10	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2
11	3	2	2	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3
12	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	3	3
13	4	3	3	3	4	4	4	4	5	5	4	4	4
14	4	4	4	4	5	5	4	5	7	6	5	4	5
15	4	3	4	5	5	5	5	7	6	6	5	4	5
16	4	3	3	4	5	6	6	7	6	5	4	4	5
17	3	3	3	3	4	5	5	6	5	4	4	3	4



18	2	2	2	2	3	3	3	4	4	3	3	3	3
19	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2
20	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
21	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1
22	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
Promedio	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

La **Tabla 23** muestra que durante los meses de enero a abril las velocidades del viento tienden a ser más bajas, con valores predominantes de 1 y 2 m/s. Durante los meses de mayo a septiembre, las velocidades del viento son generalmente más altas, con valores predominantes de 2 y 3 m/s. El promedio anual muestra que las velocidades medias del viento son constantes a lo largo del año, con un valor de 2m/s.

Muestra que las velocidades medias del viento son moderadas a altas a lo largo del año en el distrito de Calca, oscilando entre 0 y 7 m/s. La mayoría de las horas y meses tienen valores de 1, 2, o 3 m/s.

Las velocidades medias más altas se registran entre las horas 13 y 17. En general, las velocidades medias del viento aumentan a medida que avanza el día, con un máximo alrededor de las 12 y 16 horas; y disminuyen a medida que avanza la noche.

La **Tabla 24** muestra las velocidades medias del viento, en metros por segundo, en el punto de monitoreo de la estación automática de Calca durante los años 2017-2022, por mes. Los valores faltantes se indican con "---".

Tabla 24

Velocidades Medias del Viento (cada año, por mes) a 80 metros

Velocidades medias del viento (cada año, por mes)													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
2017	2	2	2	---	---	---	---	2	3	2	2	2	2
2018	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2
2019	2	2	1	1	2	2	2	2	2	3	2	2	2
2020	2	1	2	2	2	2	2	3	4	4	2	2	2
2021	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2022	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2
Promedio		2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2	2



Algunas observaciones que se pueden hacer a partir de la **Tabla 24** son:

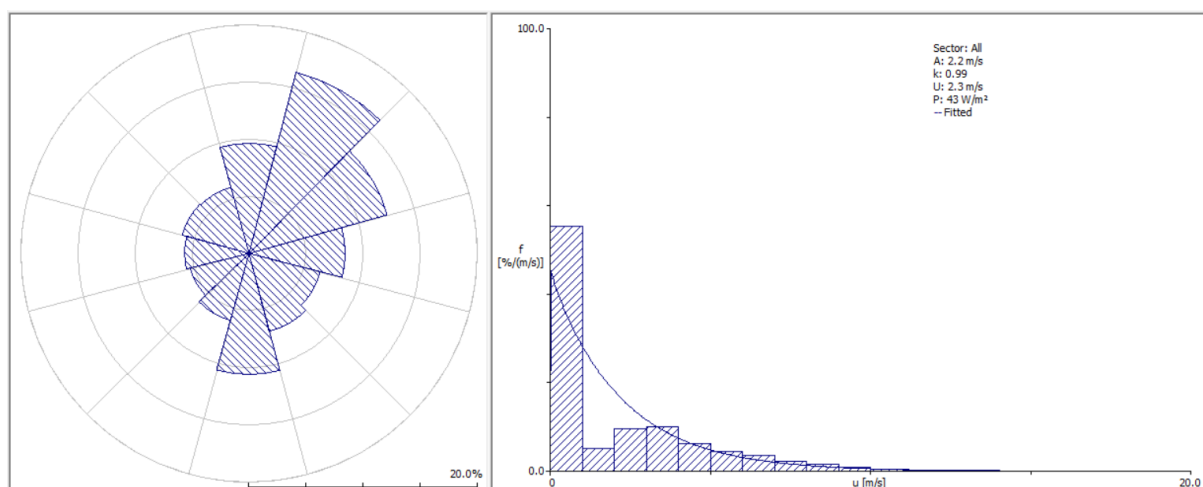
- Las velocidades medias del viento son moderadas a lo largo del año en todos los años registrados, con valores predominantes de 2 m/s.
- El año 2020 presenta una variabilidad en las velocidades del viento, con algunos meses con valores de 1m/s indicando velocidades bajas y otros con valores de 3 y 4 m/s indicando velocidades más altas.

4.2.5. Análisis del Potencial Eólico a 100 metros

Se utilizó el software WAsP Climate Analyst v3 para el análisis solamente de la velocidad del viento y su dirección y así se obtuvo los parámetros de Weibull A y K, la velocidad media, y el potencial eólico (densidad de energía eólica) a una altura de 100 metros sobre el suelo, en la **Figura 27** se muestra la curva de frecuencias relacionada con el potencial eólico en todos los sectores. “k” representa el parámetro de forma de la distribución de Weibull, que indica la variabilidad del viento en el área. “U” es la velocidad media y “P” es el potencial eólico del lugar. También se presenta la rosa de viento para todos los sectores.

Figura 27

Rosa de Viento y Distribución de Weibull, todos los sectores a 100 metros





El clima de viento y potencial eólico en todos los sectores a 100m se detallan en la **Tabla 25**.

Tabla 25

Clima de Viento y Potencial Eólico a 100 metros

Sector		Clima de viento				Energía
#	Angulo (°)	Frecuencia (%)	Weibull-A (m/s)	Weibull-k	Velocidad media (m/s)	Potencial eólico (W/m ²)
1	0	9.6	2.7	1.26	2.49	34
2	30	16.4	4.3	1.42	3.94	111
3	60	12.5	3.4	1.26	3.20	73
4	90	8.4	2.1	1.10	2.06	26
5	120	6.4	0.9	0.76	1.05	9
6	150	7.0	1.4	0.85	1.53	20
7	180	10.6	3.0	1.31	2.78	45
8	210	6.0	0.7	0.81	0.78	3
9	240	5.3	0.7	0.82	0.75	3
10	270	5.6	0.4	0.53	0.77	18
11	300	6.1	0.8	0.64	1.18	27
12	330	6.0	0.7	0.68	0.85	8
Todo	-	-	2.2	0.99	2.25	43
Datos fuente	-	-	-	-	1.92	43

La **Tabla 25** muestra datos relacionados con el clima de viento y el potencial eólico. El sector se identifica mediante un número del 1 al 12 y se indica el ángulo correspondiente en grados.

La columna "Clima de viento" incluye la frecuencia de ocurrencia en porcentaje de cada ángulo de viento en el sector. En la columna "Weibull-A (m/s)", se presenta el parámetro A de la distribución de Weibull, que es el parámetro de escala. En la columna "Weibull-k", se presenta el parámetro k de la distribución de Weibull, que indica la variabilidad del viento en el área. llamado "k" (o "factor de forma Weibull") para ajustar mejor la distribución a los datos observados. La columna "Velocidad media (m/s)" muestra la velocidad media del viento en el sector en m/s.



Finalmente, en la columna "Potencial eólico (W/m^2)" se muestra el potencial eólico en W/m^2 para cada sector.

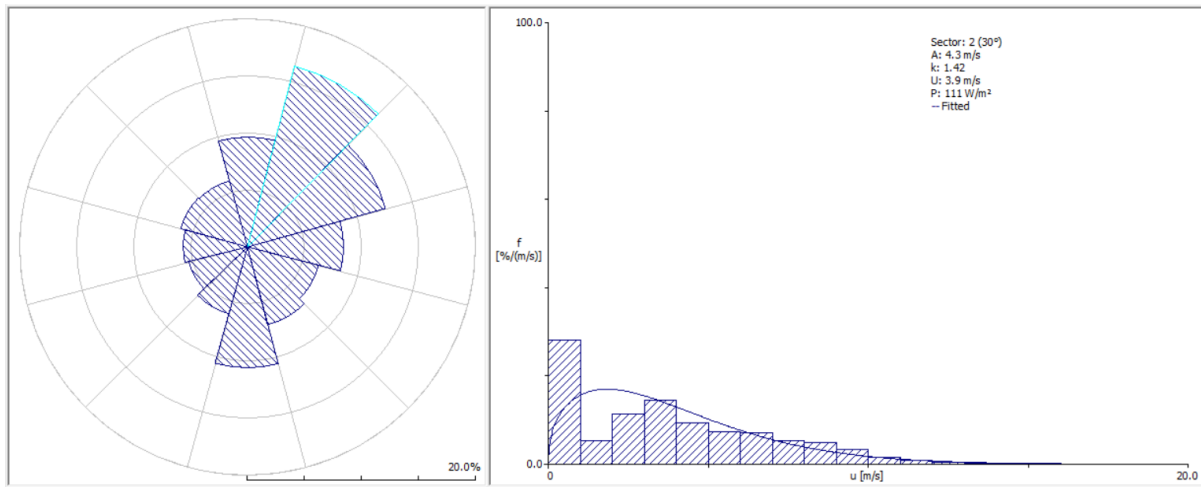
En la fila "Todo" se muestran los valores promedio del parámetro A, el parámetro k, la velocidad media del viento y el potencial eólico para toda el área. En la fila "Datos fuente" se indica que no se proporcionan datos para los parámetros A y k, pero se indica la velocidad media del viento y el potencial eólico promedio para el área.

Teniendo en cuenta la **Tabla 25** y la **Figura 27** observamos que hay tres sectores que cuentan con valores mayores que los demás sectores, estos son los sectores 2, 3 y 7. A continuación explico estos sectores, sin embargo, las demás rosas de vientos de los demás sectores están en el Anexo D (Fig. 82 - 90).

El sector 2, ver **Figura 28**, está apuntando 30° a la derecha considerando que el norte es a 0° , tiene una frecuencia de 16.4% lo que sugiere el viento en esta dirección está presente un 16.4% de todo el tiempo evaluado, tiene una Weibull-A de 4.3 m/s y una Weibull-k de 1.42, esto significa que la velocidad media del viento en la ubicación es de 4.3 m/s y que la variabilidad de la velocidad del viento es mayor sobre la media. con un valor de k ligeramente mayor a 1. La forma de campana de la distribución de Weibull indica que la velocidad del viento en esa ubicación tiene una probabilidad de variar sobre la media en la mayoría de las veces, y que las velocidades del viento bajas y altas son menos probables. Así pues, tenemos una velocidad media de 3.94 m/s y un potencial eólico de $111 W/m^2$ en este sector.

Figura 28

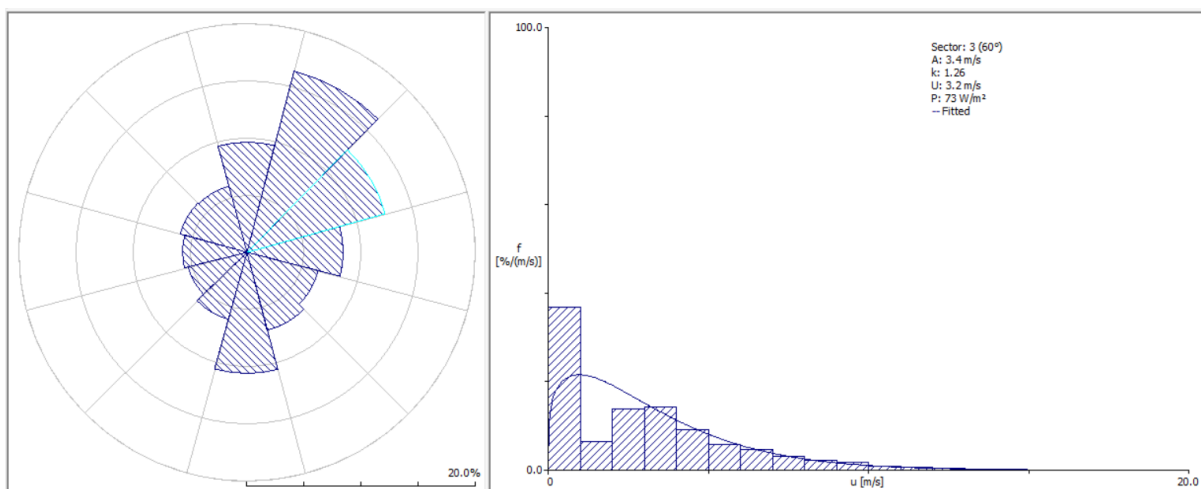
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 2, a 100 metros



El sector 3, ver **Figura 29**, está apuntando 60° a la derecha considerando que el norte es a 0° , tiene una frecuencia de 12.5% lo que sugiere el viento en esta dirección está presente un 12.5% del tiempo evaluado, tiene una Weibull-A de 3.4 m/s y una Weibull-k de 1.26, esto significa que la velocidad media del viento en la ubicación es de 3.4 m/s y que la variabilidad de la velocidad del viento es mayor sobre la media. con un valor de k ligeramente mayor a 1. Tenemos una velocidad media de 3.20 m/s y un potencial eólico de 73 W/m^2 en este sector.

Figura 29

Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 3, a 100 metros.



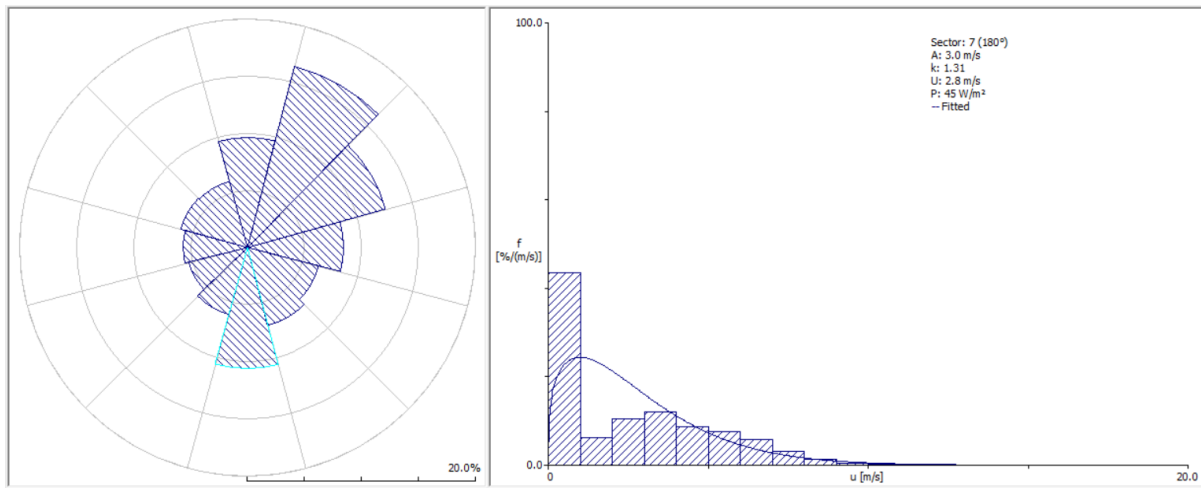
El sector 7, ver **Figura 30**, está apuntando 180° a la derecha considerando que el norte es a 0° , tiene una frecuencia de 10.6 % lo que sugiere el viento en esta dirección está presente un



10.2% de todo el tiempo evaluado, tiene una Weibull-A de 3 m/s y una Weibull-k de 1.31, esto significa que la velocidad media del viento en la ubicación es de 3 m/s y que la variabilidad de la velocidad del viento es mayor sobre la media. con un valor de k ligeramente mayor a 1. Tenemos una velocidad media de 2.78 m/s y un potencial eólico de 45 W/m² en este sector.

Figura 30

Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 7, a 100 metros



4.2.5.1. Variaciones Horarias y Estacionales del Viento a 100 metros

La **Tabla 26** muestra las velocidades medias del viento cada hora por mes en el lugar de estudio a una altura de 100 metros. Cada columna representa un mes y cada fila representa una hora del día.

Tabla 26

Velocidades Medias del Viento (cada hora, por mes) a 100 metros

Velocidades medias del viento (cada hora, por mes) a 100 metros													
Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	2	1	1
1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1
3	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
4	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
5	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1



9	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2	3	2	2
10	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2
11	3	2	2	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3
12	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	3	4
13	4	3	4	3	4	4	4	4	5	6	4	4	4
14	4	4	4	4	5	5	4	5	7	6	5	5	5
15	4	4	4	5	5	5	5	7	7	6	5	4	5
16	4	3	3	4	5	6	6	7	6	5	5	4	5
17	3	3	3	3	5	5	5	6	5	4	4	3	4
18	2	2	2	2	3	3	4	5	4	4	3	3	3
19	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
20	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
21	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1
22	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
Promedio	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2

La **Tabla 26** muestra que las velocidades no varían significativamente con respecto a los años. En algunos meses, entre junio y noviembre, se observan aumentos en las velocidades del viento, llegando a valores de 6 y 7 m/s indicando velocidades más altas.

Oscilan entre 0 a 7 Muestra que la mayoría de las horas y meses tienen valores de 0, 1 o 2 m/s.

Las horas del día no muestran patrones claros en las velocidades del viento. Sin embargo, se puede observar que durante la noche (especialmente entre las 22:00 y las 6:00) las velocidades del viento tienden a disminuir. Las velocidades medias más altas se registran entre las horas 14 y 16.

La **Tabla 27** muestra las velocidades medias del viento, en metros por segundo, en el punto de monitoreo de la estación automática de Calca durante los años 2017-2022, por mes. Los valores faltantes se indican con "---".

Tabla 27

Velocidades Medias del Viento (cada año, por mes) a 100 metros

Velocidades medias del viento (cada año, por mes)													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
2017	2	2	2	---	---	---	---	3	3	3	2	2	2
2018	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2



2019	2	2	2	1	2	2	2	2	3	3	2	2	2
2020	2	2	2	2	2	2	2	3	4	4	3	2	2
2021	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2	2
2022	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	3	2	2
Promedio	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2

Algunas observaciones que se pueden hacer a partir de la **Tabla 15** son:

- Hay variaciones estacionales en las velocidades medias del viento. En particular, las velocidades medias del viento son más altas en los meses de septiembre y octubre en comparación con los demás meses.
- En algunos meses, como agosto, septiembre y octubre, se observa un aumento en las velocidades del viento, con valores de 3 m/s indicando velocidades ligeramente más altas.

4.3. Determinación de la Producción de Energía Anual (AEP)

Para la determinación de la producción de energía eólica anual aprovechable se utilizó las siguientes ecuaciones, estos resultados son sólo referenciales para poder visualizar la posible cantidad de energía que se podría aprovechar con el viento existente en el distrito de Calca.

4.3.1. AEP a 10 metros

Teniendo el promedio de WPD o densidad de energía eólica en W/m^2 a 10m sobre el suelo de $11 W/m^2$ y usando como ejemplo las turbinas de ICEWIND y de SKYWIND (ver Anexo F), se tiene la Tabla 28:

Tabla 28
Potencial Eólico Estimado a 10 metros

$P_w = A \times WPD$ $P_w = \pi R^2 \times WPD$	ICEWIND: RW100 Turbine (vertical)	Wind (turbina de eje horizontal)	SKYWIND NG (turbina de eje horizontal)
AREA DE BARRIDO A(m ²)	1.65		$9/16 \pi$
Pw	18.15 W		19.43...W

Podemos estimar cuanto de producción de energía anual se obtendría con la cantidad de viento en el distrito de Calca. Este potencial eólico representa a el promedio así que se puede



multiplicar con el total de horas en un año que es 8760 horas. Con un C_p máximo de 0.33 (Beller, 2011) y con un valor de $\eta = 0.25$, tendríamos

Tabla 29

Producción de Energía Anual (AEP) estimada a 10 metros

$AEP = P_w \times 8760(h) \times 0.25 \times 0.33$	ICEWIND: RW100 Turbine (turbina de eje vertical)	Wind de eje horizontal	SKYWIND NG (turbina de eje horizontal)
P_w	18.15 W		19.4386...W
AEP	13,117.00 W.h-año		14,048.27 W.h-año
AEP	13.11 kW.h-año		14.04 kW.h-año

O si se quisiera saber cuánto de energía puede producir en una hora, se podría utilizar la misma ecuación con una hora:

Tabla 30

Producción de Energía estimada en una hora a 10 metros

$AEP = P_w \times 1(h) \times 0.25 \times 0.33$	ICEWIND: RW100 Turbine (turbina de eje vertical)	Wind de eje horizontal	SKYWIND NG (turbina de eje horizontal)
P_w	18.15 W		19.43...W
AEP-h	1.5 W.h		1.6 W.h

4.3.2. AEP a 30 metros

Teniendo el promedio de WPD o densidad de energía eólica en W/m^2 a 30m sobre el suelo de 20 W/m^2 y usando como ejemplo las turbinas de ICEWIND y de SKYWIND (ver Anexo F), se tiene la **Tabla 31**:

Tabla 31

Potencial Eólico Estimado a 30 metros

$P_w = A \times WPD$ $P_w = \pi R^2 \times WPD$	ICEWIND: RW100 Turbine (turbina de eje vertical)	Wind de eje horizontal	SKYWIND NG (turbina de eje horizontal)
AREA DE BARRIDO A(m2)	1.65		$9/16 \pi$
P_w	33 W		35.34...W

Podemos estimar cuanto de producción de energía anual se obtendría con la cantidad de viento en el distrito de Calca. Este potencial eólico representa a el promedio así que se puede multiplicar con el total de horas en un año que es 8760 horas. Con un C_p máximo de 0.33 (Beller, 2011) y con un valor de $\eta = 0.25$, tendríamos



Tabla 32

Producción de Energía Anual (AEP) estimada a 30 metros

$AEP = P_w \times 8760(h)$ $\times 0.25$ $\times 0.33$	ICEWIND: RW100 Turbine (turbina de vertical)	Wind de eje	SKYWIND NG (turbina de eje horizontal)
P_w	33 W		35.3429...W
AEP	23,849.1W.h-año		25,542.32W.h-año
AEP	23.84 kW.h-año		25.54 kW.h-año

O si se quisiera saber cuánto de energía puede producir en una hora, se podría utilizar la misma ecuación con una hora:

Tabla 33

Producción de Energía estimada en una hora a 30 metros

$AEP = P_w \times 1(h) \times 0.25$ $\times 0.33$	ICEWIND: RW100 Turbine (turbina de vertical)	Wind de eje	SKYWIND NG (turbina de eje horizontal)
P_w	33 W		35.34...W
AEP-h	2.7 W.h		2.91 W.h

4.3.3. AEP a 50 metros

Teniendo el promedio de WPD o densidad de energía eólica en W/m² a 50m sobre el suelo de 29 W/m² y usando como ejemplo las turbinas de ICEWIND y de SKYWIND (ver Anexo F), se tiene la **Tabla 34**:

Tabla 34

Potencial Eólico Estimado a 50 metros

$P_w = A \times WPD$ $P_w = \pi R^2 \times WPD$	ICEWIND: RW100 Turbine (turbina de vertical)	Wind de eje	SKYWIND NG (turbina de eje horizontal)
AREA DE BARRIDO A(m²)	1.65		$9/16 \pi$
P_w	47.85W		$261/16 \pi = 51.24...W$

Podemos estimar cuanto de producción de energía anual se obtendría con la cantidad de viento en el distrito de Calca. Este potencial eólico representa a el promedio así que se puede multiplicar con el total de horas en un año que es 8760 horas. Con un Cp máximo de 0.33 (Beller, 2011) y con un valor de $\eta = 0.25$, tendríamos:



Tabla 35

Producción de Energía Anual (AEP) estimada a 50 metros

$AEP = P_w \times 8760(h) \times 0.25 \times 0.33$	ICEWIND: RW100 Turbine (turbina de eje vertical)	Wind (turbina de eje horizontal)	SKYWIND NG (turbina de eje horizontal)
P_w	47.85W		$261/16 \pi = 51.24723...W$
AEP	34,581.195 W.h-año		37,036.37... W.h-año
AEP	34.58 kW.h-año		37.04 kW.h-año

O si se quisiera saber cuánto de energía puede producir en una hora, se podría utilizar la misma ecuación con una hora:

Tabla 36

Producción de Energía estimada en una hora

$AEP = P_w \times 1(h) \times 0.25 \times 0.33$	ICEWIND: RW100 Turbine (turbina de eje vertical)	Wind (turbina de eje horizontal)	SKYWIND NG (turbina de eje horizontal)
P_w	47.85W		$261/16 \pi = 51.24...W$
AEP	3.94 W.h		4.22 W.h

4.3.4. AEP a 80 metros

Teniendo el promedio de WPD o densidad de energía eólica en W/m^2 a 80m sobre el suelo de $38 W/m^2$ y usando como ejemplo las turbinas de ICEWIND y de SKYWIND (ver Anexo F), se tiene la **Tabla 37**:

Tabla 37

Potencial Eólico Estimado a 80 metros

$P_w = A \times WPD$ $P_w = \pi R^2 \times WPD$	ICEWIND: RW100 Turbine (turbina de eje vertical)	Wind (turbina de eje horizontal)	SKYWIND NG (turbina de eje horizontal)
AREA DE BARRIDO A(m²)	1.65		$9/16 \pi$
P_w	62.7 W		67.15...W

Podemos estimar cuanto de producción de energía anual se obtendría con la cantidad de viento en el distrito de Calca. Este potencial eólico representa a el promedio así que se puede multiplicar con el total de horas en un año que es 8760 horas. Con un C_p máximo de 0.33 (Beller, 2011) y con un valor de $\eta = 0.25$, tendríamos:



Tabla 38

Producción de Energía Anual (AEP) estimada a 80 metros

$AEP = P_w \times 8760(h)$ $\times 0.25$ $\times 0.33$	ICEWIND: RW100 Turbine (turbina de vertical)	Wind de eje horizontal)	SKYWIND NG (turbina de eje horizontal)
P_w	62.7 W		67.1515...W
AEP	45,313.29 W.h-año		48,530.38 W.h-año
AEP	45.31 kW.h-año		48.53 kW.h-año

O si se quisiera saber cuánto de energía puede producir en una hora, se podría utilizar la misma ecuación con una hora:

Tabla 39

Producción de Energía estimada en una hora 80 metros

$AEP = P_w \times 1(h) \times 0.25$ $\times 0.33$	ICEWIND: RW100 Turbine (turbina de vertical)	Wind de eje horizontal)	SKYWIND NG (turbina de eje horizontal)
P_w	62.7 W		67.15...W
AEP-h	5.1 W.h		5.5 W.h

4.3.5. AEP a 100 metros

Teniendo el promedio de WPD o densidad de energía eólica en W/m² a 100m sobre el suelo de 43 W/m² y usando como ejemplo las turbinas de ICEWIND y de SKYWIND (ver Anexo F), se tiene la **Tabla 40**:

Tabla 40

Potencial Eólico Estimado a 100 metros

$P_w = A \times WPD$ $P_w = \pi R^2 \times WPD$	ICEWIND: RW100 Turbine (turbina de vertical)	Wind de eje horizontal)	SKYWIND NG (turbina de eje horizontal)
AREA DE BARRIDO A(m²)	1.65		$9/16 \pi$
P_w	70.95 W		75.98...W

Podemos estimar cuanto de producción de energía anual se obtendría con la cantidad de viento en el distrito de Calca. Este potencial eólico representa a el promedio así que se puede multiplicar con el total de horas en un año que es 8760 horas. Con un Cp máximo de 0.33 (Beller, 2011) y con un valor de $\eta = 0.25$, tendríamos:



Tabla 41

Producción de Energía Anual (AEP) estimada a 100 metros

$AEP = P_w \times 8760(h) \times 0.25 \times 0.33$	ICEWIND: RW100 Turbine (turbina de eje vertical)	Wind de eje	SKYWIND NG (turbina de eje horizontal)
P_w	70.95 W		75.9872...W
AEP	51,275.56 W.h-año		54,915.94 W.h-año
AEP	51.27 kW.h-año		54.91 kW.h-año

O si se quisiera saber cuánto de energía puede producir en una hora, se podría utilizar la misma ecuación con una hora:

Tabla 42

Producción de Energía estimada en una hora

$AEP = P_w \times 1(h) \times 0.25 \times 0.33$	ICEWIND: RW100 Turbine (turbina de eje vertical)	Wind de eje	SKYWIND NG (turbina de eje horizontal)
P_w	70.95 W		75.98...W
AEP-h	5.85 W.h		6.27 W.h



Capítulo V

5. Discusión de Resultados

5.1. Descripción de los Hallazgos más Relevantes y Significativos

En el presente trabajo de investigación, los hallazgos más relevantes son la determinación de la velocidad promedio, la dirección promedio y la energía eólica. Los resultados arrojan que el punto exacto de la investigación no es adecuado ya su velocidad del viento promedio es de 1.28 a 1.90 m/s, siendo los valores óptimos mayores a 5 m/s (Realpe Jiménez et al., 2012), sin embargo existen otros lugares en el distrito de Calca que deben ser evaluados sus potenciales eólico por tener valores mayores a 5m/s según el Global Wind Atlas (ver **Figura 4**).

Otro hallazgo relevante es que el presente trabajo de investigación puede ser replicado en otros lugares que cuenten con velocidades mayores según los atlas eólicos, sin embargo, es necesario hacer esfuerzos de recolectar la data de estos lugares, ya que no siempre se tiene data de más de 1 año como mínimo. A continuación, detallo los hallazgos más importantes.

5.1.1. Comparación de Estadísticos Descriptivos entre 10, 30, 50, 80 y 100 metros

En la **Tabla 43** se presenta una tabla comparativa entre los datos la prueba de estadísticos descriptivos de los parámetros de densidad del aire, velocidad del viento, energía eólica, temperatura, humedad, dirección del viento; a 10, 30, 50, 80 y 100 metros sobre el suelo, la tabla muestra que la densidad del aire es relativamente constante en todas las alturas. La velocidad del viento y la energía eólica promedio son mayores conforme se aumenta la altura, pero con una mayor variabilidad en la zona de estudio. La temperatura, humedad y dirección del viento varían teóricamente con el aumento de la altura, sin embargo, no se tomó en cuenta sus variaciones en esta investigación.



Tabla 43

Comparativa entre los datos a 10, 30, 50, 80 y 100 metros

Estadísticos descriptivos	A 10 metros	A 30 metros	A 50 metros	A 80 metros	A 100 metros
Densidad del aire	Media de 0.85 kg/m ³	Media de 0.85 kg/m ³	Media de 0.84 kg/m ³	Media de 0.84 kg/m ³	Media de 0.84 kg/m ³
	Desv. estándar de 0.02 kg/m ³				
Velocidad del viento	Media de 1.33 m/s Desv. estándar de 1.57 m/s	Media de 1.65 m/s Desv. estándar de 1.95 m/s	Media de 1.83 m/s Desv. estándar de 2.16 m/s	Media de 2.01 m/s Desv. estándar de 2.37 m/s	Media de 2.10 m/s Desv. estándar de 2.48 m/s
Energía eólica	Media de 7.27 W/m ² Desv. estándar de 21.50 W/m ²	Media de 14.00 W/m ² Desv. estándar de 41.43 W/m ²	Media de 18.97 W/m ² Desv. estándar de 56.14 W/m ²	Media de 25.07 W/m ² Desv. estándar de 74.16 W/m ²	Media de 28.59 W/m ² Desv. estándar de 84.57 W/m ²
Temperatura	Media de 14.20°C Desv. estándar de 5.5°C				
Humedad	Media del 62.39% Desv. estándar de 23.39%				
Dirección del viento	Media de 142.61° Desv. estándar de 96.79°				

5.1.2. Comparación WASP entre 10, 30, 50, 80 y 100 metros

Así mismo es importante comparar la evaluación del potencial eólico a 10, 30, 50, 80 y 100 metros sobre el suelo, ya que esto permite tener la perspectiva de que a mayor altura mejor es el potencial eólico, ver la **Tabla 44** y la **Tabla 45**.

Tabla 44

Comparativa de los sectores 2, 3 y 7 en 10 metros y 50 metros

Altura (m)	Sector	Frecuencia	Velocidad media del viento (m/s)	Potencial eólico (W/m ²)
10	2	15.4%	2.9	30
10	3	11.6%	2.2	19
10	7	10.2%	1.8	12
30	2	15.9%	3.13	54
30	3	12.2%	2.50	35
30	7	10.3%	2.17	21
50	2	16.2%	3.51	74
50	3	12.4%	2.8	49
50	7	10.5%	2.43	30
80	2	16.4%	3.81	98
80	3	12.5%	3.05	64
80	7	10.6%	2.64	39
100	2	16.4%	3.94	111



100	3	12.5%	3.20	73
100	7	10.6%	2.78	45

De la **Tabla 44** se puede observar que los valores de frecuencia en la altura de 100 metros son ligeramente mayores que las demás alturas en los tres sectores. Se puede afirmar que los sectores 2, 3 y 7 son los más adecuados para la orientación de aerogeneradores debido a su alta frecuencia de ocurrencia del viento y potencial eólico. Además, la mejor altura para el aprovechamiento del viento en el punto de medición del distrito de Calca es a 100 metros sobre el nivel del suelo.

Tabla 45
Comparativa de velocidad media y potencial eólico promedio a 10, 30, 50, 80 y 100 metros

	Velocidad media del viento	Potencial eólico promedio
A 10 metros	1.28 m/s	11 W/m ²
A 30 metros	1.67 m/s	20 W/m ²
A 50 metros	1.90 m/s	29 W/m ²
A 80 metros	2.14 m/s	38 W/m ²
A 100 metros	2.25 m/s	43 W/m ²

En la **Tabla 45** podemos observar que la velocidad media del viento aumenta de 1.28 m/s a 2.25 m/s a medida que la altura de medición se eleva de 10 a 100 metros. Esto es consistente con lo que se espera, ya que el viento tiende a ser mayor a mayores alturas, debido a la menor fricción en la superficie terrestre y la menor interferencia de la topografía.

En cuanto al potencial eólico, también se puede observar un aumento significativo de 11 W/m² a 43 W/m² a medida que la altura de medición aumenta de 10 a 100 metros. Esto ya que el potencial eólico es proporcional al cubo de la velocidad del viento, lo que significa que incluso un pequeño aumento en la velocidad del viento puede llevar a un aumento significativo en la cantidad de energía que puede ser generada.



5.1.3. Comparativa entre variaciones estacionales, velocidad media y variaciones horarias a 10, 30, 50, 80 y 100 metros

También se hizo una comparativa de la **Tabla 14**, **Tabla 17**, **Tabla 20**, **Tabla 23** y la **Tabla 26** se tiene como resultado la **Tabla 46**.

Tabla 46 Comparativa entre variaciones estacionales, velocidad media y variaciones horarias a 10,30, 50, 80 y 100 metros

	A 10 metros	A 30 metros	A 50 metros	A 80 metros	A 100 metros
Variaciones estacionales	Disminuye de diciembre a agosto, aumenta de agosto a noviembre.	Disminuye de noviembre a marzo, aumenta de abril a octubre.	Disminuye de diciembre a septiembre, aumenta de septiembre a noviembre, siendo más alta en junio, julio y agosto y más baja en abril, mayo y enero.	Disminuye de diciembre a abril, aumenta de mayo a noviembre.	Disminuye de diciembre a mayo, aumenta de junio a noviembre.
Velocidades medias (m/s)	0 a 4.7	0 a 6	0 a 6	0 a 7	0 a 7
Velocidades medias más altas entre las horas (hrs.)	10 y 19	13 y 18	13 y 15	13 y 17	14 y 16

En resumen, la velocidad del viento a 100 metros es mayor que a 10 metros y tiene una variación estacional menos amplia. Además, las variaciones horarias son similares en todas las alturas, pero las velocidades medias del viento son generalmente más altas durante el día y a medida que se aumenta la altura. Se ha observado una ligera disminución en las velocidades medias del viento en los últimos años, especialmente durante los meses de enero y febrero.



5.1.4. Potencia Eólica Aprovechable

La máxima Producción de Energía Anual (AEP) para el distrito de Calca es a 100 metros de altura sobre el nivel del suelo, aproximadamente 54.91 kW.h-año con la turbina ICEWIND: RW100 Wind Turbine (turbina de eje vertical) y aproximadamente 51.27 kW.h-año kW.h-año con la turbina SKYWIND NG (turbina de eje horizontal).

Sin embargo, existen lugares cercanos a Calca que cuentan con velocidades mayores de hasta 10 m/s según la figura 3 y 4 (Atlas Eólico Global - Global Wind Atlas) y las figuras 5 y 6 (Atlas eólico del Perú), pero estos lugares no cuentan con data de parámetros del viento para evaluar su potencial eólico. Si se hace unos cálculos con una velocidad de 6m/s y una turbina de 18 metros de diámetro, y usando las mismas ecuaciones para hallar la Producción de Energía Anual (AEP), tendríamos un aproximado de 4.7 MW.h-año, solamente con una turbina de estas dimensiones.

5.2. Limitaciones del Estudio

Las principales limitaciones del presente trabajo de investigación son:

- Escasos antecedentes locales y nacionales, sin embargo, la información y antecedentes internacionales son de gran ayuda para llevar a cabo la investigación.
- Uso de softwares para el análisis del potencial eólico es una limitación ya que los mejores softwares para la evaluación de potencial eólico, así como para el dimensionamiento de las turbinas y de parques eólicos, corresponden una inversión económica considerable, puesto que esta supone un incremento de los costos de la investigación.
- Escasez de datos, puesto que para tener mayor confiabilidad de los resultados de los análisis de los datos de velocidad de viento, se necesitan más puntos de monitoreo con anemómetros certificados y más tiempo de toma de datos puesto que lo recomendable es de 10 años (Faiella et al., 2008).



- La cantidad de datos ya que solamente se obtuvo data de parámetros climáticos de 5 años con 9 meses, esto concuerda con autores como Dioses (2013) que menciona que es necesario como mínimo data de 5 años. Se verificó la existencia y continuidad de datos del 2017 al 2022 de la estación automática de Calca con código 472976f8, sin embargo, se tiene data inexistente de los meses de abril, mayo, junio y julio del año 2017.

5.3. Comparación Crítica con la Literatura Existente

5.3.1. Contrastación con Hipótesis Específica N°1

Según Realpe Jiménez et al. (2012) en general, se requiere una velocidad del viento superior a 5 m/s para una aplicación rentable. Así mismo Minguet Requeni (2019) menciona que para filtrar zonas con potencial suficiente para emplazamientos en tierra, se deben localizar las zonas que presenten una velocidad media anual de 6 m/s a 80 m sobre el nivel de suelo, esto se debe a que un aerogenerador necesita una velocidad de viento mínima, que aunque varía dependiendo del aerogenerador, oscila entre 3 – 5 m/s. A partir de los hallazgos encontrados en el presente trabajo de investigación se rechaza la hipótesis específica N°1 debido a que la velocidad y dirección promedio del viento del distrito de Calca no tiene valores adecuados para el aprovechamiento del viento como fuente de energía eléctrica para turbinas de gran escala. Cuya velocidad promedio máxima a 100 metros sobre el suelo es de 2.1 a 2.3 m/s. Sin embargo, en el distrito de Calca, existen velocidades a ciertas horas del día mayores que 5 m/s, y con estas velocidades es posible el aprovechamiento del viento para producir energía dependiendo del tipo de turbina eólica.

Beller (2011) Menciona que las bajas velocidades del viento son bastante frecuentes en el área residencial y la velocidad media es baja. (...) El enfoque más deliberado es comenzar con rotores de muy pequeña escala en el tamaño de 5W para dar una comprensión de la tecnología al habitante, trabajando como semillas en un terreno fértil. De esta manera, la aceptación, así como la tecnología, se pueden desarrollar y crecer. En el presente trabajo de investigación las



velocidades del viento de 1.5 a 2 m/s que se encuentran en el distrito de Calca, se pueden aplicar en un entorno rural o urbano, hoy en día existen mini aerogeneradores que funcionan con una velocidad mínima de 1.5 m/s-2m/s, como los siguientes:

- Ridgeblade
- Icewind 2.5 m/s
- Flower turbine - tulip turbines
- Nemoi turbine
- Aeolos 1.5 m/s
- Luvside
- Bornay

Wang et al. (2018) evaluaron la energía eólica en áreas urbanas utilizando parámetros centrales de la forma urbana y encontraron que las turbinas eólicas pequeñas y de tamaño micro que pueden adaptarse al entorno eólico urbano están aumentando estos años. Para el presente trabajo de investigación, en función de lo que menciona Wang, se recomienda el uso turbinas con palas especialmente diseñadas para beneficiar el entorno turbulento urbano del distrito de Calca, y algunas otras turbinas en pasajes conducidos para aprovechar el viento de bajas velocidades.

Mostafaeipour et al. (2014) Evaluaron el potencial de energía eólica para la ciudad de Zahedan utilizando datos de cinco años y encontraron que la mayoría de las velocidades medias mensuales del viento están entre 2 y 4 m/s, mientras que solo unos pocos valores son inferiores a 2 m/s y más de 4 m/s. Recomiendan la instalación de una turbina eólica modelo Proven 2,5 kW como la opción más rentable. Al comparar los resultados de la presente investigación con los resultados de Mostafaeipour et al. (2014) se observa que no son muy diferentes en cuanto a la velocidad del viento, puesto que en el distrito de Calca se tiene velocidades de viento similares a las de Zahedan.

En el estudio de Ucar & Balo (2009) se analizaron las características del viento en seis estaciones meteorológicas en Turquía, estos 6 puntos tienen velocidades de 8.7, 8.5, 5.9, 6.9,



7.4 y 8.0 m/s a 10 metros sobre el suelo, la velocidad mínima mensual fue de 5.3 m/s. Comparando los resultados de Ucar & Balo (2009) con los resultados del presente trabajo de investigación se reafirma que la velocidad del viento en el punto de estudio del distrito de Calca no es adecuada para turbinas eólicas de gran escala, pero sí de menor escala como turbinas mini-eólicas.

Dioses I. (2013) evalúa el potencial eólico en el emplazamiento "cerro Chocán" en la Región Norte del Perú y concluye que tiene un alto potencial eólico que debe ser utilizado para la generación de energía eléctrica, puesto que tiene velocidades entre 8 y 9 m/s a 80 metros sobre el suelo. Si se compara con los resultados de la presente investigación vemos que hay bastante diferencia con respecto a las velocidades que tiene Calca y la Región Piura, sin embargo, es necesario hacer mayores mediciones en Calca, puesto que, si existen lugares con velocidades similares a Piura, pero hace falta la realización de mediciones de la velocidad del viento en los lugares más idóneos de Calca.

Rojas Maita (2016) En su estudio concluye que si es posible la generación de energía con los aerogeneradores con la velocidad de 2-3 m/s pero no tiene un rendimiento óptimo con los valores del viento que presenta. El presente trabajo de investigación guarda relación con Rojas Maita (2016), porque los valores de las velocidades del viento se asemejan entre sí, sin embargo, no producirían un rendimiento óptimo para la producción de energía eléctrica.

5.3.2. Contrastación con Hipótesis Específica N°2

Lugares con menos humedad, menor temperatura y menor altitud son más aptos para el aprovechamiento de la energía eólica (Farkas, 2011). La medición de la temperatura, la humedad y la altitud, son esenciales para la determinación de la densidad del aire, puesto en la ecuación para determinar la Densidad de Energía Eólica (W/m^2) Eq. N°2, en la cual el papel más importante se lo lleva la velocidad del viento, pero el papel secundario se lo lleva la densidad del aire.



Farkas (2011) menciona sobre la densidad del aire, esta no es constante y su incorporación en los cálculos hacen que la evaluación sea más precisa, menciona que hasta un 16% más preciso.

Se acepta la hipótesis específica N°2, la cual dicta que: La densidad promedio del viento del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco entre los años 2017 y 2022, es aceptable para la evaluación del potencial eólico, puesto que la media es de 0.85 kg/m^3 , y es relativamente constante.

Se hizo una comparativa entre los resultados obtenidos aplicando la densidad del aire que se obtuvo con las ecuaciones respectivas «IBM SPSS Statistics V23» y los resultados obtenidos usando la densidad de aire a 1.225 kg/m^3 en «WAsP», se muestra en la **Tabla 47**:

Tabla 47
Comparativa de Energía Eólica entre IBM SPSS Statistics V23 y WAsP Climate Analyst v3:

Energía Eólica	IBM SPSS Statistics V23	WAsP Climate Analyst v3
Media a 10 metros	7.27 W/m ²	11 W/m ²
Media a 30 metros	14 W/m ²	20 W/m ²
Media a 50 metros	18.97 W/m ²	29 W/m ²
Media a 80 metros	25.07 W/m ²	38 W/m ²
Media a 100 metros	28.59 W/m ²	43 W/m ²

El porcentaje de diferencia entre los datos de IBM SPSS Statistics V23 y WAsP Climate Analyst v3, podemos usar la siguiente fórmula:

$$((\text{Valor SPSS} - \text{Valor WAsP}) / \text{Valor WAsP}) \times 100\%$$

Aplicando esta fórmula a los datos, se obtuvo:

Para 10 metros: $((7.27 - 11) / 11) \times 100\% = -33.9\%$ (aproximadamente)

Para 30 metros: $((14 - 20) / 20) \times 100\% = -30\%$ (aproximadamente)

Para 50 metros: $((18.97 - 29) / 29) \times 100\% = -34.58\%$ (aproximadamente)

Para 80 metros: $((25.07 - 38) / 38) \times 100\% = -34.03\%$ (aproximadamente)



Para 100 metros: $((28.59 - 43) / 43) \times 100\% = -33.51\%$ (aproximadamente)

Esto significa que la prueba con el software IBM SPSS Statistics V23 son aproximadamente un 30% a 34.58% más bajos que los de WAsP Climate Analyst v3 para las mediciones a 10, 30, 50, 80 y 100 metros. Es importante tener en cuenta que esta diferencia se debe a que la evaluación en IBM SPSS Statistics V23 considera los datos de densidad del aire húmedo no constante, por ende, es más precisa que la evaluación WAsP Climate Analyst v3 ya que considera los datos con una densidad del aire estándar de 1.225 kg/m^3 .

5.3.3. Contrastación con Hipótesis Específica N°3

Debido a los resultados obtenidos en la presente investigación, según la **Tabla 43** y la **Tabla 45** la densidad de la energía eólica no alcanza las clases 1 ni 2 de la **Tabla 3** de Karmikov, como ejemplo debemos mencionar que una clase buena de potencial eólico representa valores de 500 a 600 W/m^2 de densidad de energía eólica, y siendo los promedios máximos medidos en Calca de 111 W/m^2 esto dicta que el recurso eólico potencial es pobre. Si se toma la **Tabla 4** de AWS Scientific la densidad de energía eólica no es adecuada para implementar turbinas de energía eólicas de gran escala, solamente se podrían utilizar turbinas con un velocidad de entrada de 1.5 m/s. Debo señalar que hay ciertas horas en las que el viento es adecuado para la implementación de turbinas mini eólicas, es decir que funcionan con bajas velocidades de viento y se puede tomar en consideración implementar turbinas mini eólicas de 5W (Beller, 2011). Por ello se rechaza la hipótesis específica N°3, la cual dicta que: El potencial eólico del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco entre los años 2017 y 2022, alcanza valores aceptables que permiten que lo catalogan como viento aceptable para la producción de energía eléctrica.

5.3.4. Contrastación con Hipótesis General

Se acepta la Hipótesis General que dicta: El potencial eólico en el distrito de Calca es capaz de proporcionar energía eléctrica.



Puesto que los recursos eólicos que presenta el punto de evaluación del potencial eólico de Calca, si puede producir energía eléctrica con una densidad de energía eólica media desde 7.27 W/m^2 a 11 W/m^2 a 10 metros sobre el suelo, hasta 28.59 W/m^2 a 43 W/m^2 a la altura de 100 metros sobre el suelo. Esta producción de densidad de energía eólica no es óptima para la implementación de grandes turbinas eólicas (Realpe Jiménez et al., 2012), pero si para turbinas mini eólicas de bajas velocidades (Beller, 2011).

Según las estimaciones de potencia eólica aprovechable sólo se podría obtener aproximadamente como máxima Producción de Energía Anual (AEP) para el distrito de Calca a 100 metros de altura sobre el nivel del suelo, aproximadamente 54.91 kW.h-año con la turbina ICEWIND: RW100 Wind Turbine (turbina de eje vertical) y aproximadamente 51.27 kW.h-año con la turbina SKYWIND NG (turbina de eje horizontal). Estos resultados guardan semejanza con los obtenidos por Rojas Maita (2020) que tuvo velocidades de $2,7 \text{ m/s}$ y una generación de energía de 999 kWh/año , 1520 kWh/año y 10100 kWh/año con los aerogeneradores E30Pro, E70Pro y E200 respectivamente, los cuales no tienen un rendimiento óptimo con los valores del viento que obtuvo. Se puede inferir que según la turbina la cantidad de energía eléctrica que puede ser producida depende de que tamaño es la turbina, pero principalmente de la velocidad del viento del lugar.

Sin embargo, existen lugares cercanos al distrito de Calca que cuentan con velocidades mayores de hasta 10 m/s según la figura 3 y 4 del Atlas Eólico Global (Global Wind Atlas) y las figuras 5 y 6 del Atlas eólico del Perú, pero estos lugares no cuentan con data de parámetros del viento para evaluar su potencial eólico. Como dice Dioses, (2013) Es necesario contar con un registro de datos de las velocidades y direcciones del viento con el mayor número de años posible, no menor a 5 años. En la presente investigación se tiene data de parámetros climáticos desde el año 2017 empezando del mes de enero y terminando el 2022 en el mes de diciembre,



sumando así una cantidad de 5 años y 9 meses descontando los meses que la data era errónea o estaba vacía por falta de registro de datos del SENAMHI.

5.4. Implicancias del Estudio

Con la presente investigación se proporciona una base teórica para que futuros investigadores, sector público o sector privado, puedan realizar sus evaluaciones de potencial eólico de diferentes localidades, al haber mayores investigaciones del potencial eólico se podrá realizar inversiones tanto públicas como privadas para aprovechar el viento como fuente de energía renovable para las poblaciones que más lo necesiten.

Además, con los hallazgos de esta investigación se logró determinar científicamente el potencial eólico del distrito de Calca, ya que para saber qué lugares son idóneos para aprovechar el viento como recurso eólico, es necesario la elaboración de una evaluación de su potencial eólico usando de base la teoría existente.



Conclusiones

1. En la presente investigación se logró cumplir con los objetivos propuestos, con ello se llegó a la conclusión de que los recursos eólicos que posee el punto de estudio de la estación automática del SENAMHI ubicada en el distrito de Calca no son suficientes como para ser una fuente de energía para emplazamientos de gran escala, pero si es posible la implementación de turbinas en pequeña escala para zonas rurales o urbanas.

2. La velocidad del viento media analizada con el software SPSS es de 1.33 m/s a 10m, 1.65 m/s a 30m, 1.83m/s a 50m, 2.01 m/s a 80m y 2.1 m/s a 100 metros sobre el suelo; con el software WAsP Climate Analyst v3 se obtuvo una media de 1.28m/s a 10m, 1.67 m/s a 30m, 1.95 m/s a 50m, 2.14 m/s a 80m y 2.25 m/s a 100 metros sobre el suelo; la dirección promedio del viento con el software SPSS es de 142.61° ; con el software WAsP Climate Analyst v3 se obtuvo que las direcciones en las que el viento se presenta con una frecuencia mayor de ocurrencia, son los sectores 2, 3 y 7, con máximas frecuencias de ocurrencia a 100 metros de 16.4%, 12.5% y 10.6% respectivamente. Los valores variaron por la densidad en cada software puesto que WAsP considera una densidad a la altura del mar.

3. La densidad promedio del aire es de 0.85 kg/m^3 a 10 metros sobre el suelo, disminuyendo ligeramente a medida que aumenta la altura, considerada relativamente apta para el aprovechamiento de viento.

4. Con el potencial eólico medio a 100 metros sobre el suelo de 43 W/m^2 se determinó la Producción de Energía Anual (AEP), que representa aproximadamente 54.91 kW.h-año con la turbina ICEWIND: RW100 Wind Turbine (turbina de eje vertical) y aproximadamente 51.27 kW.h-año con la turbina SKYWIND NG (turbina de eje horizontal). Se acepta la Hipótesis General que dicta: El potencial eólico en el distrito de Calca es capaz de proporcionar energía eléctrica, con una densidad de energía eólica media desde 7.27 W/m^2 a 11 W/m^2 a 10 metros sobre el suelo, hasta 28.59 W/m^2 a 43 W/m^2 a la altura de 100 metros sobre el suelo.



Recomendaciones

1. Al Estado Peruano, es muy necesario que se implementen estaciones automáticas que puedan medir la velocidad del viento, dirección del viento, temperatura del aire, humedad del aire, presión barométrica. Especialmente en lugares que previamente hayan sido evaluado por el atlas eólico del Perú, así se asegura tener una evaluación favorable del potencial eólico y se puede seguir con los siguientes pasos para el emplazamiento de centrales eólicas.

2. En esta investigación solo se está llegando a la evaluación de la densidad de energía eólica, es dada la complejidad de la evaluación de los lugares que puedan tener los recursos eólicos adecuados, por ello se exhorta a aquellos que utilicen esta tesis como referencia o antecedente que: es necesario la complementación de más medidas de evaluación del micrositio, de las características más idóneas de los aerogeneradores para el lugar, así como las condiciones ambientales a las que puede afectar el proyecto.

3. Al Estado Peruano se propone como idea la implementación un Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía en Perú, así como lo hizo España con el objetivo de evaluar el potencial eólico disponible a nivel de planificación, incluyendo la explotación de sus resultados mediante un sistema de información de consulta pública (Minguet Requeni, 2019).

4. Esta investigación cumple con ser una base teórica para futuras evaluaciones de potencial eólico en otros distritos y localidades, pero cabe resaltar que es muy necesario la data de parámetros climáticos y del viento de más de 5 años para obtener mayor confiabilidad en los resultados y así poder estimar como se comportará el viento en los siguientes años.



Referencias

- Aparicio Ortega, W., & Polo Gamarra, E. (2001). *Diseño y Evaluación de un Sistema de Aerogeneración en la Comunidad de Huaccoto*. Universidad San Antonio Abad del Cusco.
- Asian Development Bank. (2016). *Guidelines for wind resource assessment: best practices for countries initiating wind development*. <http://www.adb.org/sites/default/files/publication/0A42032/guidelines-wind-resource-assessment.pdf>
- AWS Scientific. (1997). *Fundamentals for Conducting a Successful Monitoring Program*. National Renewable Energy Laboratory (NREL), April, 79.
- Aybar, C. C., & Lavado, C. W. (2017). Atlas de Zonas de Vida del Perú. Guía Explicativa. *Senamhi*, 30. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-9.pdf>
- Badger, J., Mortensen, N., Hahmann, A., & Bingol, A. (2009). Introduction to mesoscale and microscale wind resource mapping. En *Proceedings of mesoscale mapping of RE resources ESMAP knowledge exchange forum*.
- Beller, C. (2011). Urban wind energy. En *Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi*.
- Bruce H. Bailey, & McDonald, S. L. (1997). *Wind resource assessment handbook*. AWS Scientific Inc.
- Bueche, F. J., & Hecht, E. (2007). *Física General de Shaum* (10a ed.). Mc Graw Hill.
- Burton, T., Jenkins, N., Bossanyi, E., Sharpe, D., & Graham, M. (2021). Wind Energy Handbook. En *Wind Energy Handbook* (3a ed.). <https://doi.org/10.1002/9781119992714>
- Callasi, J. (2020). Impactos por la integración de la generación distribuida con energía solar fotovoltaica en redes de media tensión de la ciudad del Cusco. En *Universidad Andina del Cusco*. Universidad Andina del Cusco.
- Castro, A., Davila, C., Laura, W., Cubas, F., Avalos, G., Lopez, C., Villena, D., Valdez, M., Urbiola, J., Trebejo, I., Menis, L., & Marin, D. (2020). Climas del Perú - Mapa de Clasificación Climática Nacional. En *SENAMHI* (Vol. 53, Número 9). <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>
- Cataldo, J., & Nunes, V. (2006). Aplicación de la Modelación Física en la Evaluación del Potencial Eólico para la Instalación de Parques Eólicos en Zonas de Topografía Compleja. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10, 6–47.
- Columbus Miyasato, C. E., Del Río Mendoza, M. S., Esquivel Sosa, P. S., & Martínez San



- Martín, R. (2018). Planeamiento Estratégico para el Sector de Energía Eólica del Perú. En *Pontificia Universidad Católica del Perú*.
<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/12586>
- Dioses, I. (2013). *Evaluación Del Potencial Eólico Para Un Emplazamiento Seleccionado En La Región Piura Utilizando GHWINDFARMER*. Universidad de Piura.
- Faiella, L., Gesino, A., & Asociación Argentina de Energía Eólica. (2008). *Gestión de Variables Meteorológicas y Mapeo Eólico* (p. 7). Asociación Argentina de Energía Eólica.
- Farkas, Z. (2011). *Considering Air Density in Wind Power Production*. 2, 1–6.
<https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1103.2198>
- Francis, F. A., & Nalamutt, T. D. (2019). Statistical analysis of wind speed and evaluation of wind power density for Colaba, Mumbai. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 10(1), 20–33.
<https://doi.org/10.34218/IJARET.10.1.2019.003>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, P. (2018). Metodología de la investigación. En *MC Graw Hill Education*.
- Hoogwijk, M., & Graus, W. (2008). Global potential of renewable energy resources: a literature assessment. En *Ecofys*.
- Jangamshetti, S., & Rau, V. (2001). Normalized power curves as a tool for identification of Optimum Wind Turbine Generator Parameters. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 16(3), 283–288. <https://doi.org/10.1109/60.937209>
- Kalmikov, A. (2017). Wind Power Fundamentals. En *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines* (pp. 17–24). Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809451-8.00002-3>
- Lu, X., McElroy, M. B., & Kiviluoma, J. (2009). Global potencial for wind-generated electricity. *Pro Natl Sci*, 106(27).
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). *Wind Energy Explained Theory, Design and Application* (2a ed.). WILEY.
- MINEM. (2016). *Atlas Eólico del Perú*.
- Minguet Requeni, C. (2019). *Estudio del recurso eólico aprovechable de la Comunidad Autónoma de Aragón para el emplazamiento y diseño de un parque eólico*. Universitat Politècnica de València.
- Moreno Diaz, H. A., & Moreno Begazo, M. A. (2017). Estudio de prefactibilidad para la instalacion de una planta de energia eolica en Paracas. En *Universidad de Lima*.
- Mostafaeipour, A., Jadidi, M., Mohammadi, K., & Sedaghat, A. (2014). An analysis of wind



- energy potential and economic evaluation in Zahedan, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 641–650. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.016>
- Osinermin. (2017). *La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático* (A. Vásquez, T. Jesús, & J. Salvador (eds.)).
- Osinermin. (2019). Energías Renovables: Experiencia y Perspectivas en la Ruta del Perú Hacia la Transición Energética. En *Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería*.
https://www.osinermin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinermin-Energias-Renovables-Experiencia-Perspectivas.pdf
- Picard, A., Davis, R. S., Gläser, M., & Fujii, K. (2008). Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). *Metrologia*, 45(2), 149–155. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/2/004>
- Prasad, R., & Bansal, R. (2011). Technologies and methods used in wind resource assessment. En *Handbook of Renewable Energy Technology*.
- Quispe, A., & Calderón, J. (2015). Evaluación, aplicación, difusión y abastecimiento de un sistema de generación eólica. *Campus*, 20(20), 57–68. <https://doi.org/10.24265/campus.2016.v20n20.06>
- Realpe Jiménez, A., Diazgranados, J. A., & Acevedo Morantes, M. T. (2012). Electricity generation and wind potential assessment in regions of Colombia. *Dyna*, 79(171), 11.
- Rojas Maita, C. P. (2020). Evaluación de los recursos eólicos para la generación de energía eléctrica a pequeña escala en el distrito de Huachac. En *Universidad Nacional Del Centro Del Centro De Posgrado*. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/5992>
- Schallenberg-Rodríguez, J., & Notario del Pino, J. (2011). Wind potential evaluation in the canary islands using GIS. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(9), 343–346. <https://doi.org/10.24084/repqj09.333>
- Shi, J., & Erdem, E. (2017). Estimation of Wind Energy Potential and Prediction of Wind Power. En *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines* (pp. 25–49). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809451-8.00003-5>
- Stathopoulos, C., Kaperoni, A., Galanis, G., & Kallos, G. (2013). Wind power prediction based on numerical and statistical models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 112, 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.09.004>
- Thema Equipo Editorial. (1999). *Enciclopedia Temática Autoevaluativa vol. II* (Lexus Editores



(ed.)). Lexus.

- Torres, J., García, A., De Blas, M., & De Francisco, A. (2005). Forecast of hourly average wind speed with ARMA models in Navarre (Spain). *Solar Energy*, 79(1), 65–77.
- Ucar, A., & Balo, F. (2009). Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey. *Applied Energy*, 86(10), 1864–1872. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.12.016>
- Wang, B., Sun, S., & Duan, M. (2018). Wind potential evaluation with urban morphology - A case study in Beijing. *Energy Procedia*, 153, 62–67. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.078>
- Warthon Ascarza, J., Negrón Zuñiga, J. J., Rubio Cáceres, J., & Inglés Atauchí, R. (2012). *Aerogenerador eólico tripala* (1a ed.).
- Young, H., & Freedman, R. (2009). *Física universitaria volumen 1* (12a ed.). Pearson Educación.
- Zepeda Cancino, R. M., & Vázquez García, V. (2021). Potencial social y ambiental de la industria eólica para una transición energética en América Latina. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 30, 66–85. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.30.2021.4598>
- Zhao, D., Han, N., Goh, E., Cater, J., & Reinecke, A. (2019). Chapter 1: General introduction to wind turbines. En *Wind Turbines and Aerodynamics Energy Harvesters* (pp. 1–20). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817135-6.00001-6>



Anexos

Anexo A. Matriz de Consistencia

Tabla 48 Matriz de Consistencia

TÍTULO: “Evaluación del potencial eólico del distrito de Calca, provincia de Calca, Cusco 2023.”.						
Autor: Ricardo Cantero Rado						
Tipo de Investigación: Investigación Cuantitativa Alcance: Descriptivo Diseño: No experimental Longitudinal						
PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS			POBLACIÓN Y MUESTRA
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	El potencial eólico en el distrito de Calca es capaz de proporcionar energía eléctrica suficiente para la población del distrito de Calca.	<p>La velocidad y dirección promedio del viento del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco entre los años 2017 y 2022, son adecuados para el aprovechamiento del viento como fuente de energía eléctrica.</p> <p>La densidad promedio del viento del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco entre los años 2017 y 2022, es aceptable para la evaluación del potencial eólico.</p> <p>El potencial eólico del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco entre los años 2017 y 2022, alcanza valores aceptables que permiten que lo catalogan como viento aceptable para instalaciones de turbinas eólicas a microescala o de manera doméstica.</p>			POBLACIÓN: Parámetro climático de viento del distrito de Calca, es decir, la caracterización de la velocidad y dirección del viento del distrito de Calca
¿Cuál es el potencial eólico del distrito de Calca comprendida entre 2017 y 2022, provincia de Calca, Cusco?	Evaluar el potencial eólico del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco entre los años 2017 y 2022.					MUESTRA: Data del estado del Viento recopilada de la estación automática Calca con código 472976f8, (SENAMHI) ubicada en Longitud: 71°57'18.85" O Latitud: 13°19'59.97" S, durante el periodo 2017-2022,
PROBLEMAS	OBJETIVOS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	TÉCNICA	INSTRUMENTO



ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS					
<p>• ¿Cuánto es la velocidad y cuál es la dirección del viento promedio del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco comprendida entre 2017 y 2022?</p> <p>• ¿Cuánto es la densidad promedio del viento del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco comprendida entre 2017 y 2022?</p> <p>• ¿Cuánto y cómo está valorado el potencial eólico del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco</p>	<p>Determinar la velocidad y dirección promedio del viento del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco entre los años 2017 y 2022.</p> <p>Calcular la densidad promedio del viento del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco entre los años 2017 y 2022.</p> <p>Determinar el potencial eólico del distrito de Calca, provincia de Calca, región Cusco entre los años 2017 y 2022.</p>	<p>Parámetros meteorológicos. (Variable de Caracterización)</p>	<p>Condiciones del viento.</p>	<p>Velocidad.</p>	<p>Instrumentos mecánicos y electrónicos, recopilación de datos, validación de datos.</p>	<p>Anemómetro de la Estación automática Calca con código 472976f8, (SENAMHI) Hoja de cálculo Excel.</p>
	<p>Dirección de viento.</p>			<p>Instrumentos mecánicos y electrónicos, recopilación de datos, validación de datos.</p>	<p>Veleta de la Estación automática Calca con código 472976f8, (SENAMHI) Hoja de cálculo Excel.</p>	
	<p>Temperatura del aire.</p>			<p>Instrumentos mecánicos y electrónicos, recopilación de datos, validación de datos.</p>	<p>Termohigrómetro de la Estación automática Calca con código 472976f8, (SENAMHI) Hoja de cálculo Excel.</p>	
	<p>Humedad del aire.</p>			<p>Instrumentos mecánicos y electrónicos, recopilación de datos, validación de datos.</p>	<p>Termohigrómetro de la Estación automática Calca con código 472976f8, (SENAMHI) Hoja de cálculo Excel.</p>	

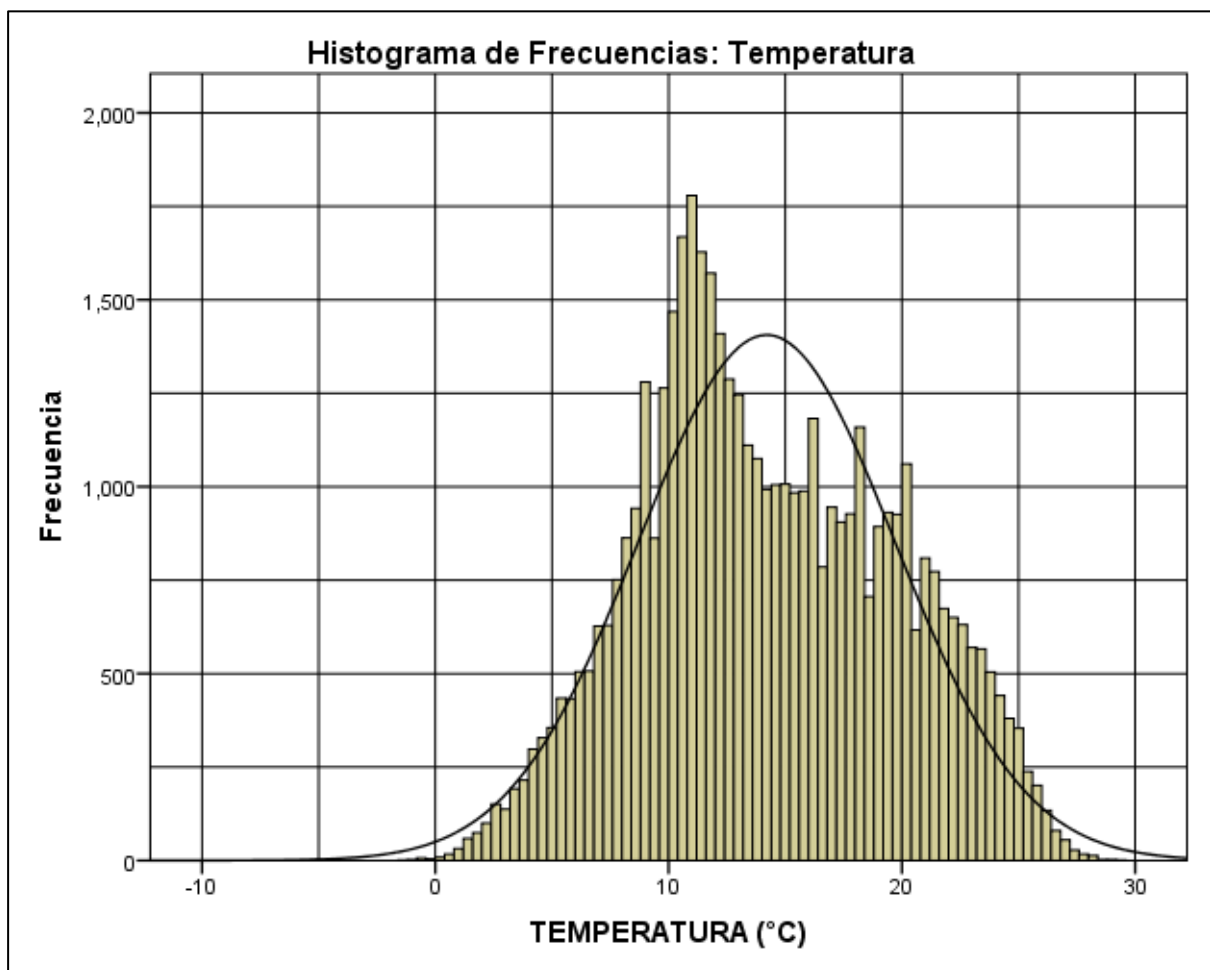


compre n dida entre 2017 y 2022?		Potencial eólico. (Variable de Interés)	Clase de Energía Eólica.	Densidad de energía eólica.	Análisis de indicador es, fórmulas y ecuacion es.	Software WAsP Climate Analyst v3.
--	--	--	--------------------------------	-----------------------------------	--	--

Anexo B. Histogramas de Frecuencias

La media del parámetro de temperatura es de 14.20°C , con una desviación estándar de 5.5°C , lo que indica que la temperatura varía significativamente en la zona de estudio, en la Figura 31 se muestra el histograma de frecuencias del parámetro temperatura para visualización y mejor comprensión de los datos.

Figura 31
Histograma de Frecuencias: Temperatura

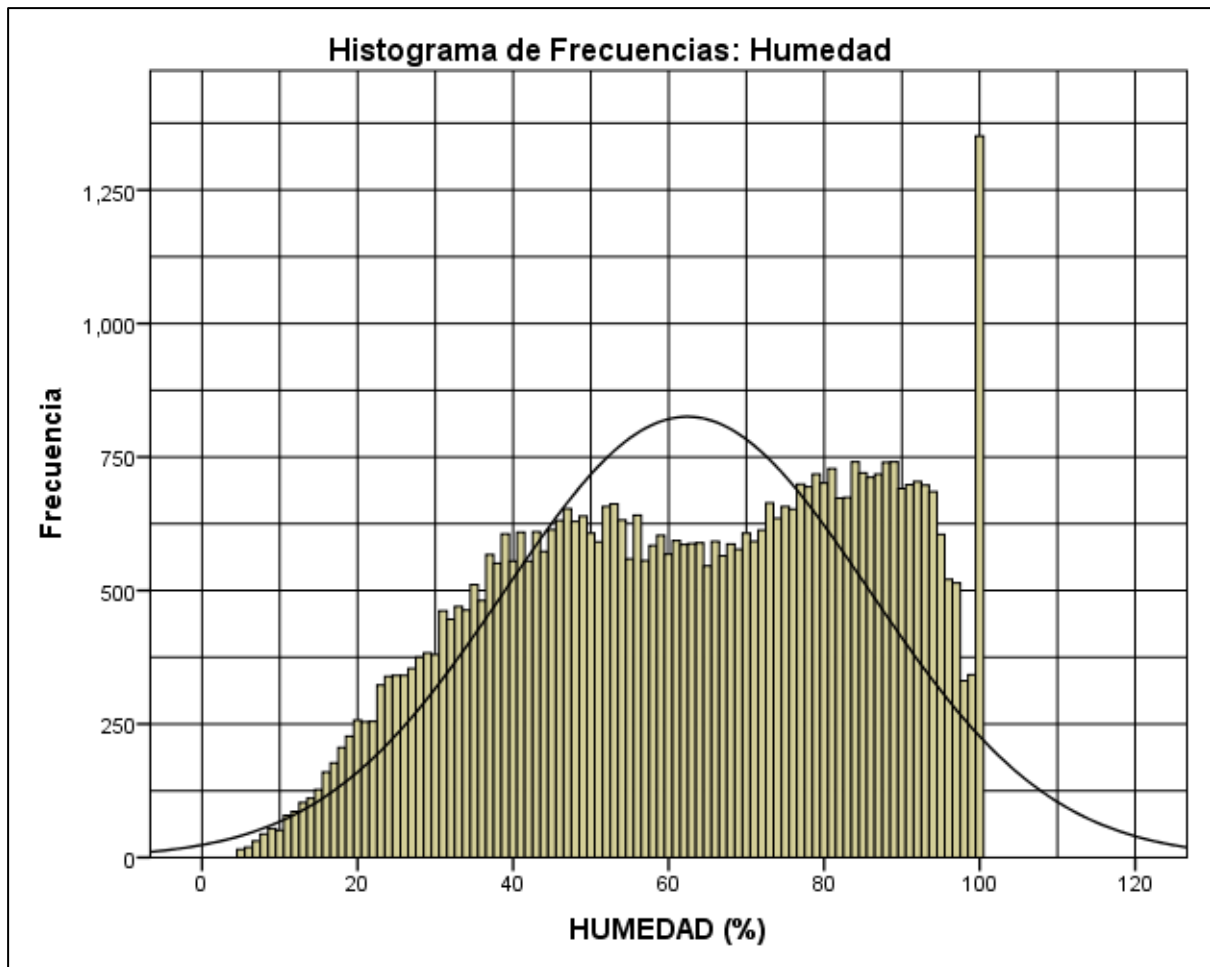




El parámetro de humedad media es 62.39%, con una desviación estándar de 23.399%, lo que sugiere que la zona es bastante húmeda, en la Figura 32 se muestra el histograma de frecuencias vs humedad para visualizar y comprender mejor los datos.

Figura 32

Histograma de Frecuencias: Humedad

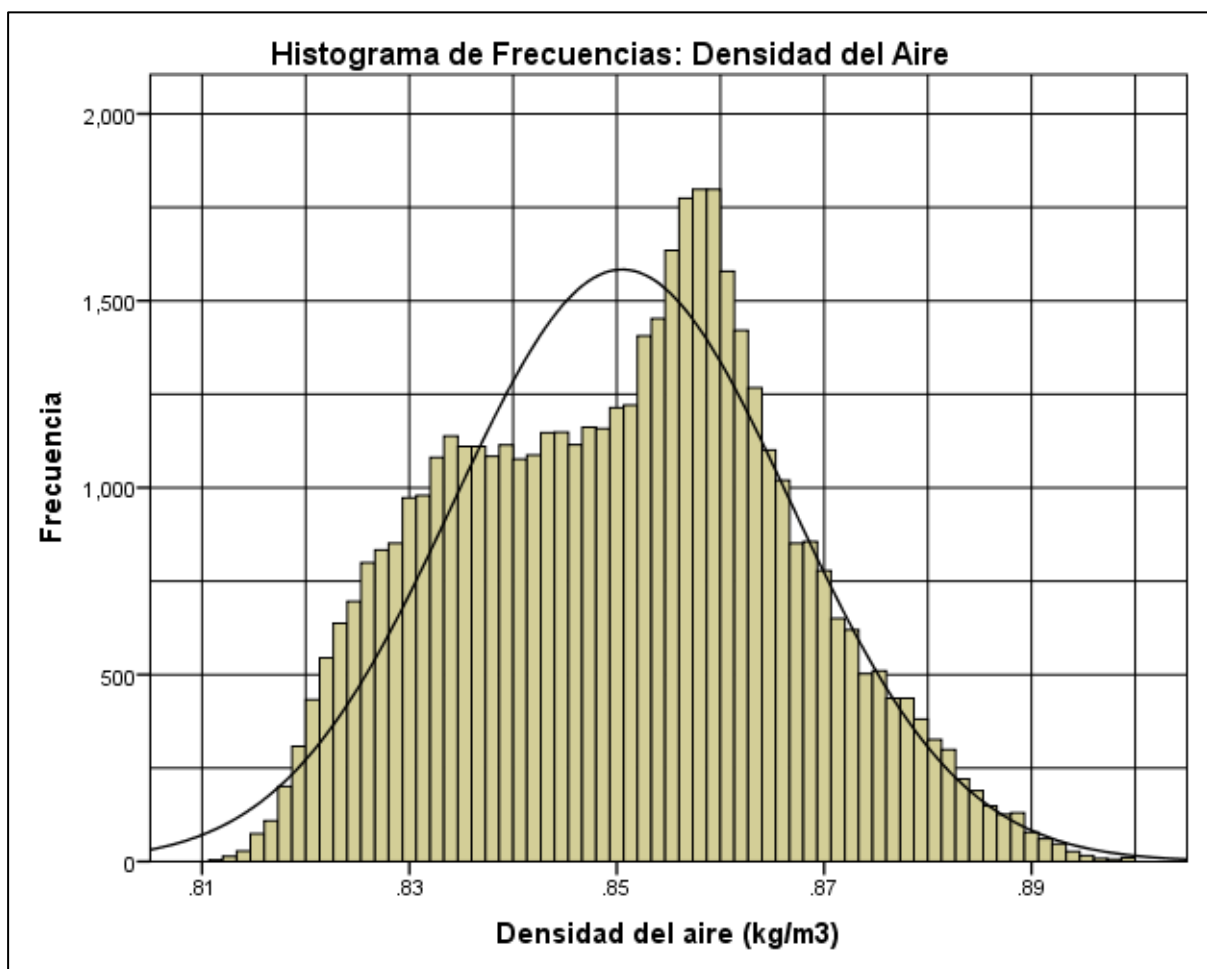




La densidad del aire promedio es de 0.8505 kg/m^3 , con una desviación estándar de 0.0162 kg/m^3 , lo que sugiere que la zona tiene una densidad de aire relativamente constante. Se observa que la moda de la densidad del aire es ambigua ya que existen múltiples modos, pero se muestra el valor más pequeño, en la Figura 33 se muestra el histograma de frecuencias de la densidad del aire para visualizar y comprender mejor los datos.

Figura 33

Histograma de Frecuencias: Densidad del Aire

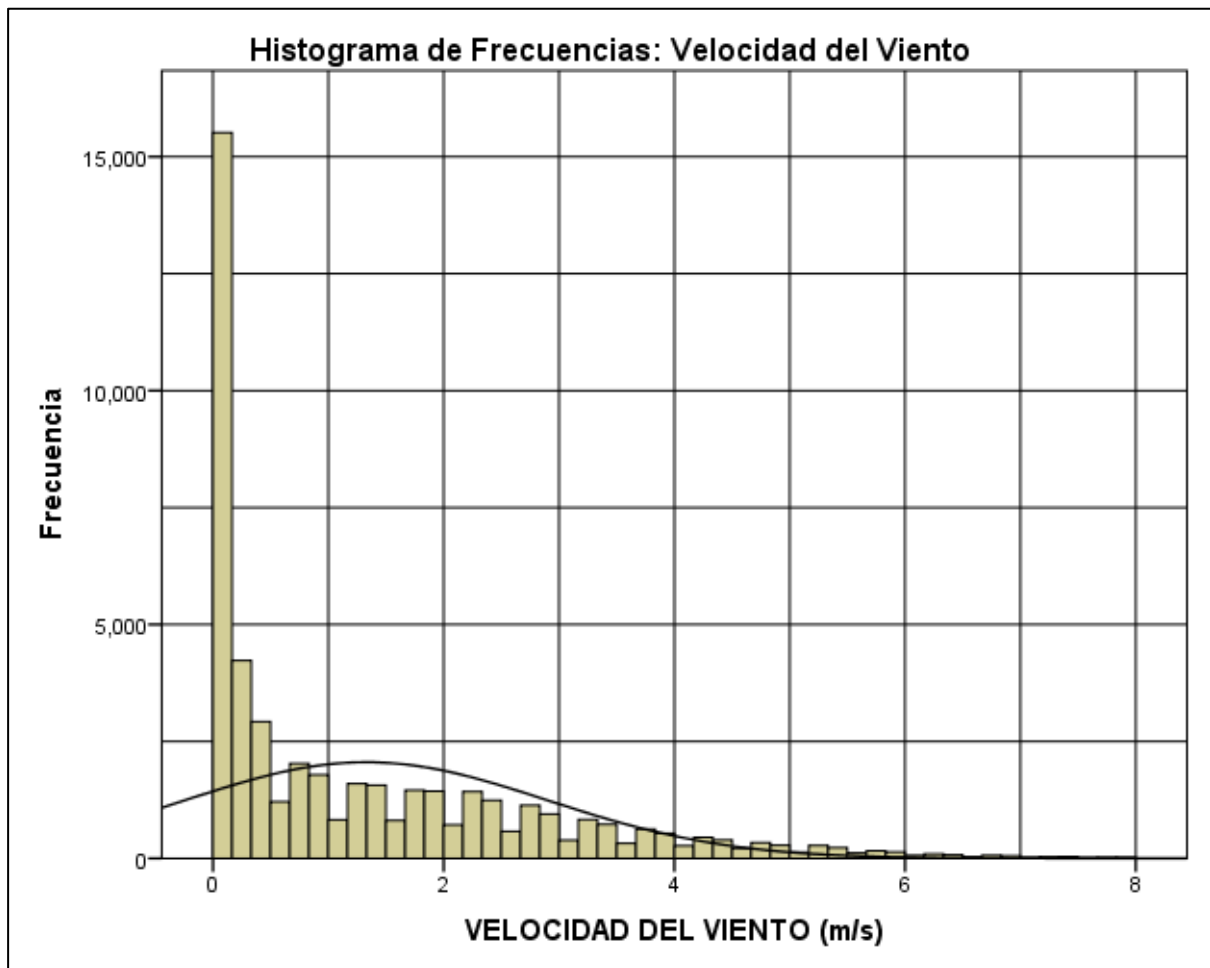




La velocidad del viento promedio es de 1.33 m/s, con una desviación estándar de 1.566 m/s, lo que sugiere que la velocidad del viento varía significativamente en la zona de estudio, en la Figura 34 se muestra el histograma de frecuencias de la velocidad del viento para visualizar y comprender mejor los datos.

Figura 34

Histograma de Frecuencias: Velocidad del Viento

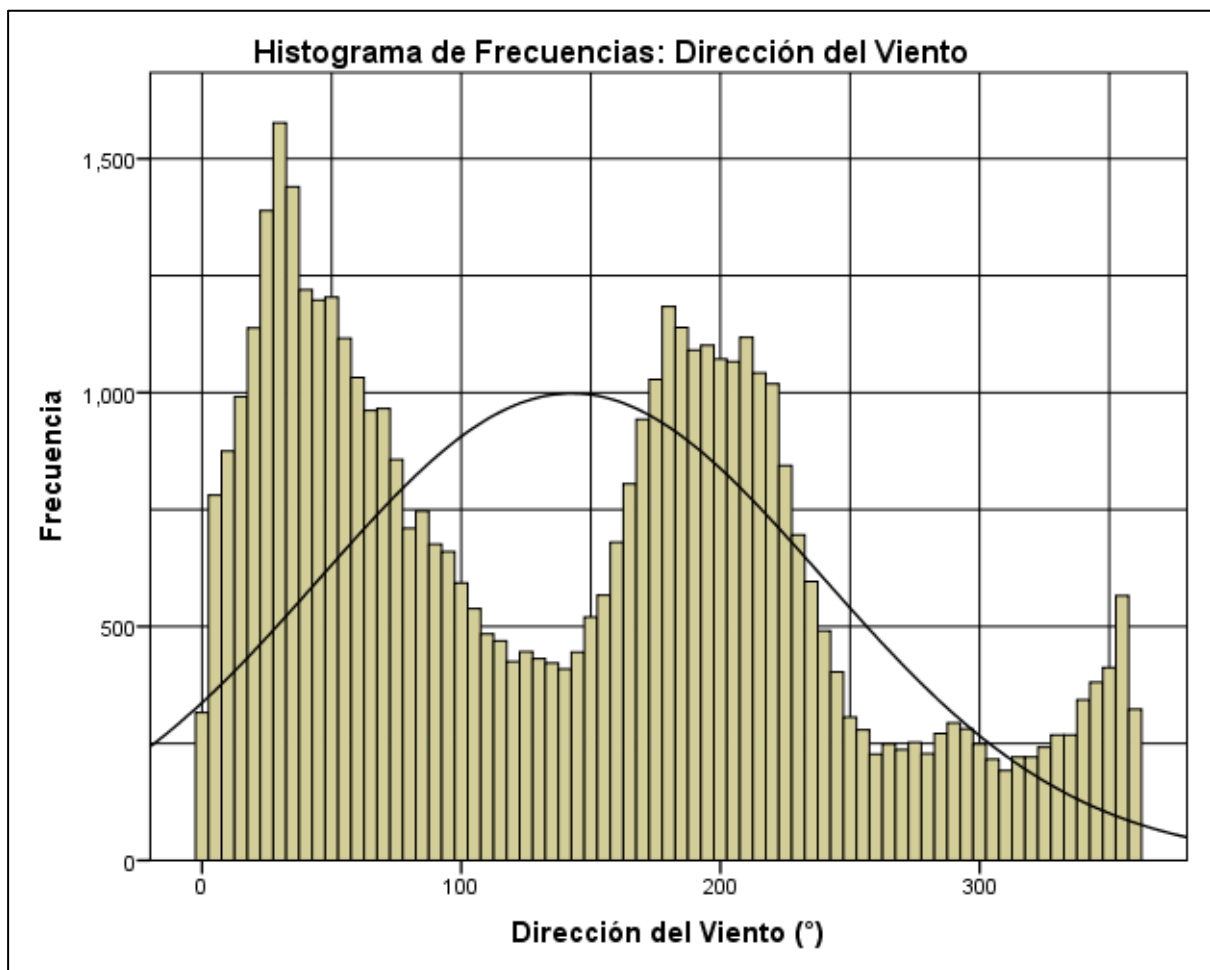




La dirección del viento promedio es de 142.61° , con una desviación estándar de 96.791° , lo que sugiere que la dirección del viento varía significativamente en la zona de estudio, en la Figura 35 se muestra el histograma de frecuencias de la dirección del viento para visualizar y comprender mejor los datos.

Figura 35

Histograma de Frecuencias: Dirección del Viento

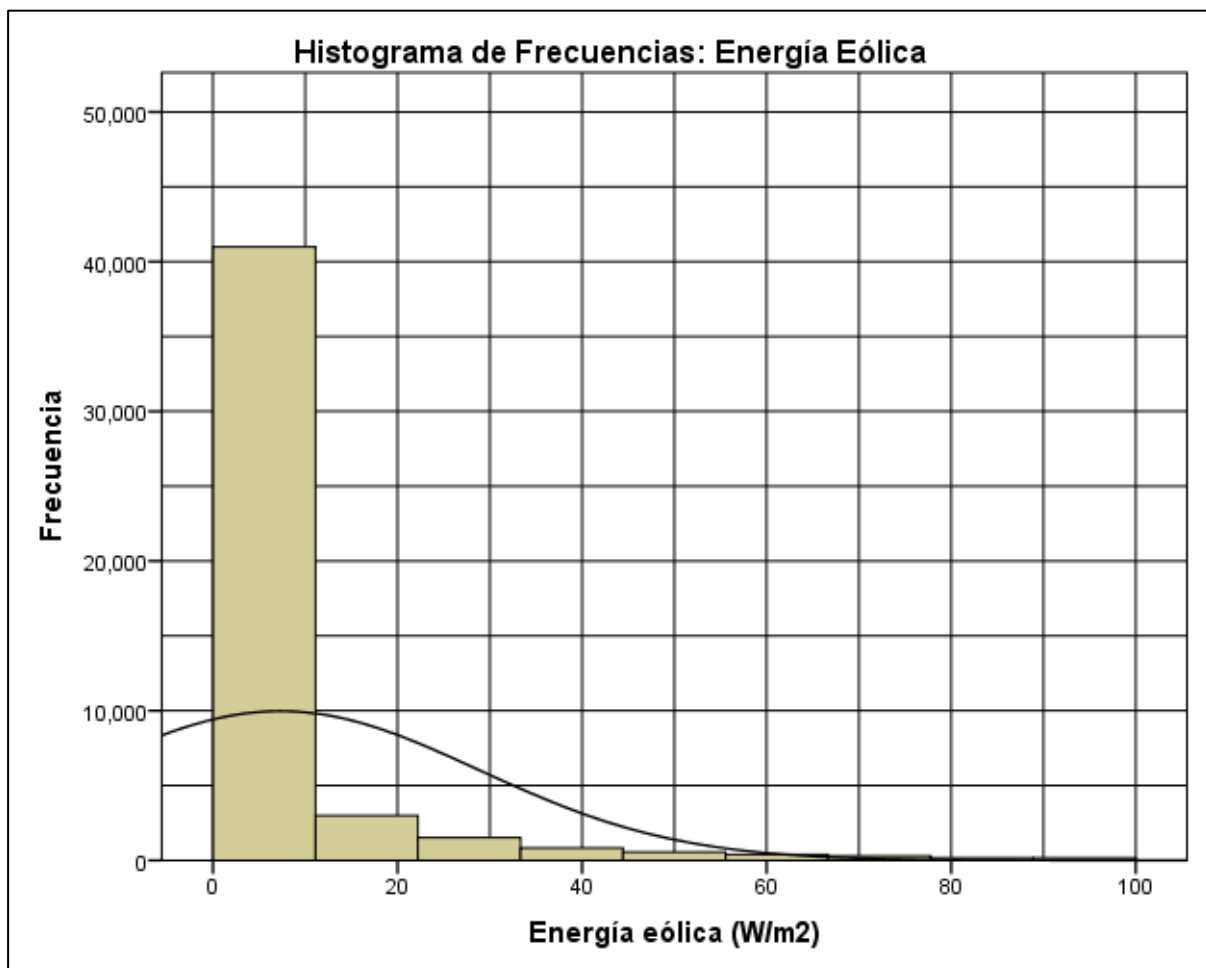




La energía eólica a 10 metros promedio es de 7.27 W/m^2 , lo que sugiere que hay una cantidad significativa de energía disponible en el viento en la zona de estudio. Sin embargo, la desviación estándar es de 21.5098 W/m^2 , indica que la cantidad de energía disponible en el viento varía significativamente en la zona. La energía eólica máxima registrada en la tabla 8 es de 789.97 W/m^2 , lo que indica que hay momentos en los que el viento tiene una cantidad de energía considerablemente mayor que la media, en la Figura 36 se muestra el histograma de frecuencias vs energía eólica para visualizar y comprender mejor los datos obtenidos.

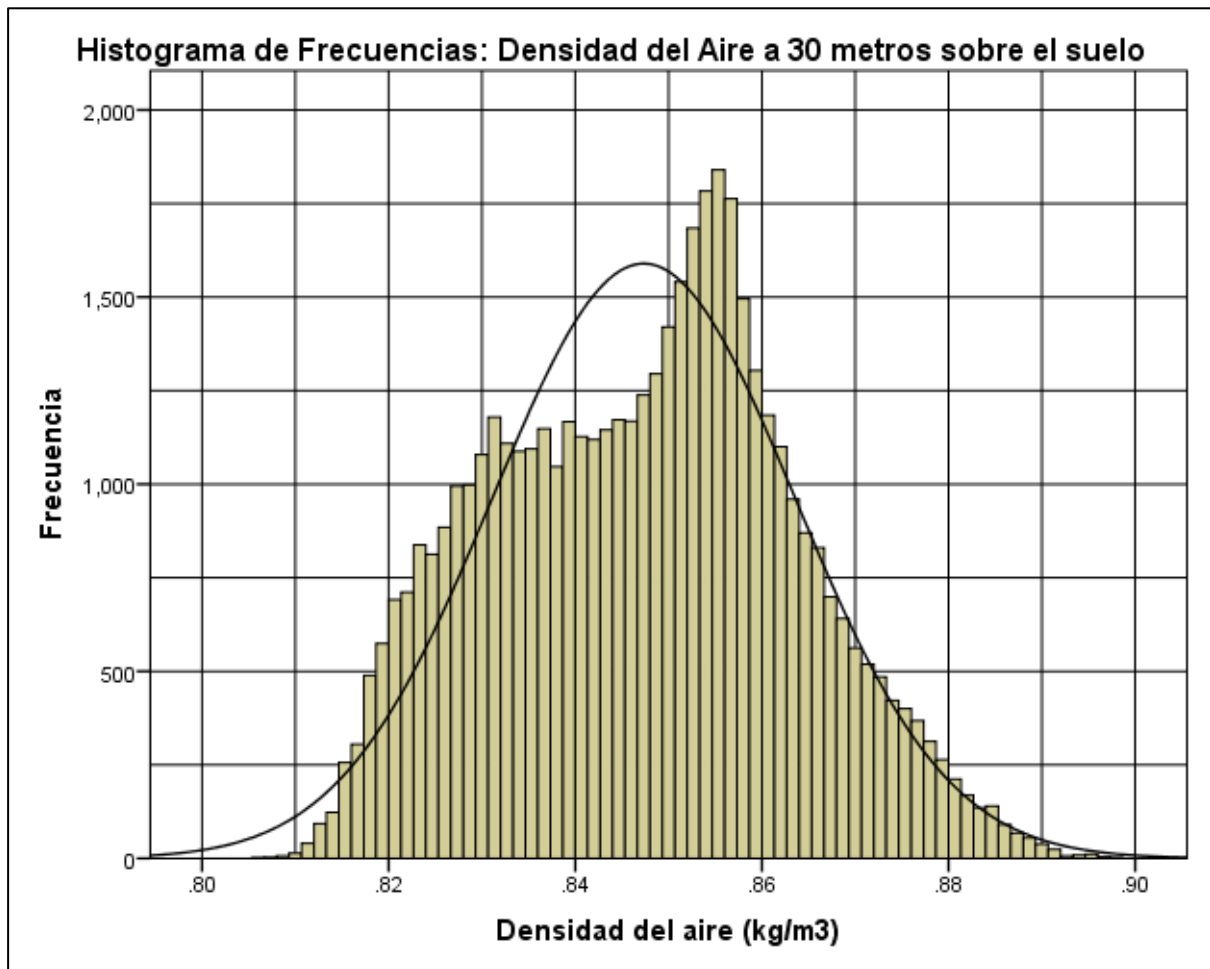
Figura 36

Histograma de Frecuencias: Energía Eólica a 10 metros



En la Figura 40 se muestra el histograma de frecuencias de la densidad del aire para visualizar y comprender mejor los datos.

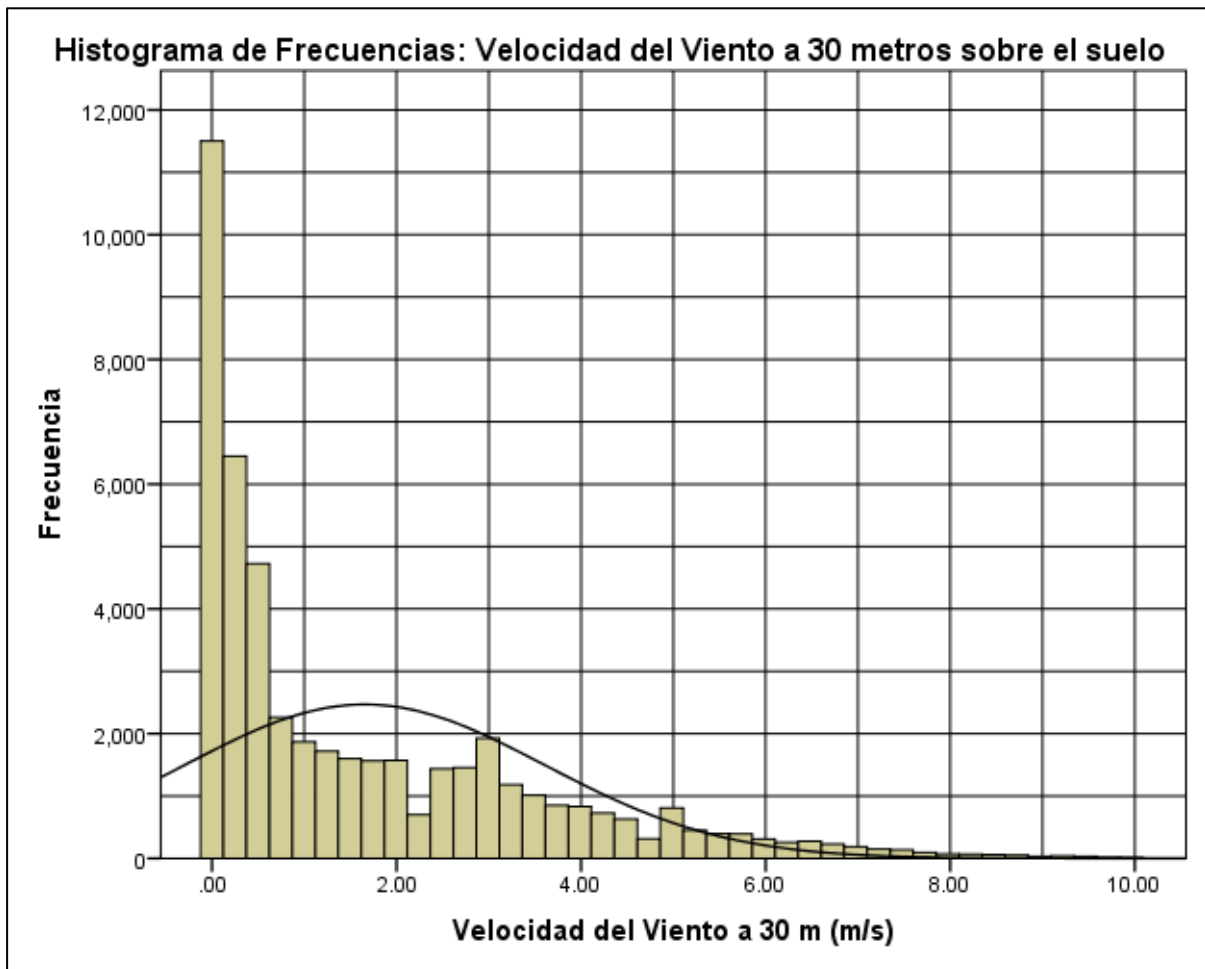
Figura 37
Histograma de Frecuencias: Densidad del Aire a 30 metros



La velocidad del viento promedio a 30 metros es de 1.65m/s, con una desviación estándar de 1.95 m/s, lo que sugiere que la velocidad del viento varía significativamente en la zona de estudio, tiene la asimetría positiva y la curtosis moderada, indican que los datos están concentrados en los valores más bajos, pero aún tienen una distribución relativamente normal en el centro de la distribución, en la

Figura 41 se muestra el histograma de frecuencias de la velocidad del viento para visualizar y comprender mejor los datos.

Figura 38
Histograma de Frecuencias: Velocidad del Viento a 30 metros



La asimetría para la velocidad del viento es positiva, lo que indica una cola larga hacia la derecha, es decir, hay valores más altos de velocidad del viento que alejan la distribución de una distribución normal.

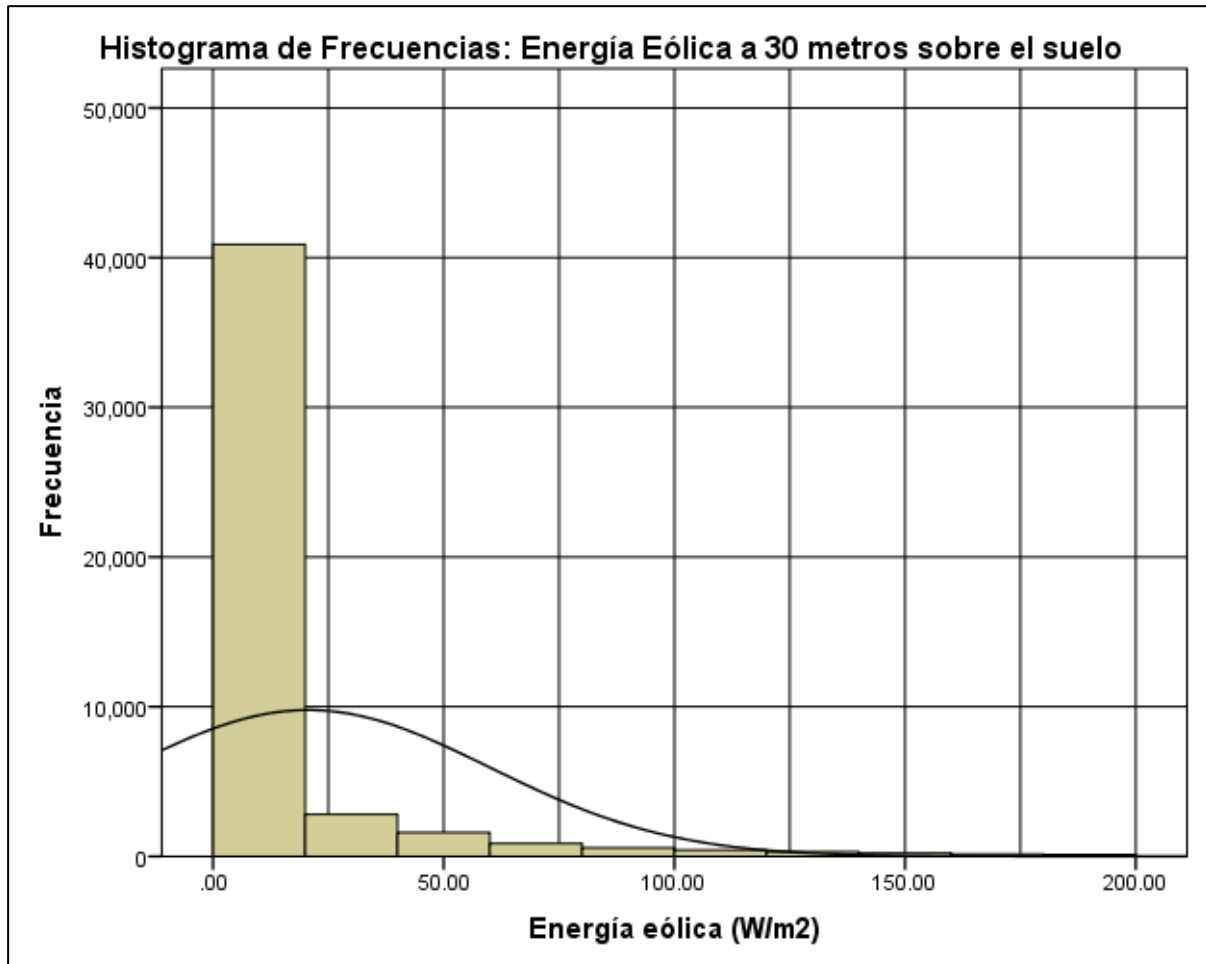
La energía eólica promedio es de 14 W/m^2 , lo que sugiere que hay una cantidad significativa de energía disponible en el viento en la zona de estudio. Sin embargo, la desviación estándar es de 41.43 W/m^2 , indica que la cantidad de energía disponible en el viento varía significativamente en la zona. La energía eólica máxima registrada en la tabla es de 1521.45 W/m^2 , lo que indica que hay momentos en los que el viento tiene una cantidad de energía considerablemente mayor que la media, la distribución de esta variable muestra una asimetría positiva y una curtosis alta, esto quiere decir que los datos están más concentrados en el lado



izquierdo de la distribución y que se está indicando que la distribución tiene una cola larga en el lado derecho, en la Figura 42 se muestra el histograma de frecuencias de la energía eólica para visualizar y comprender mejor los datos.

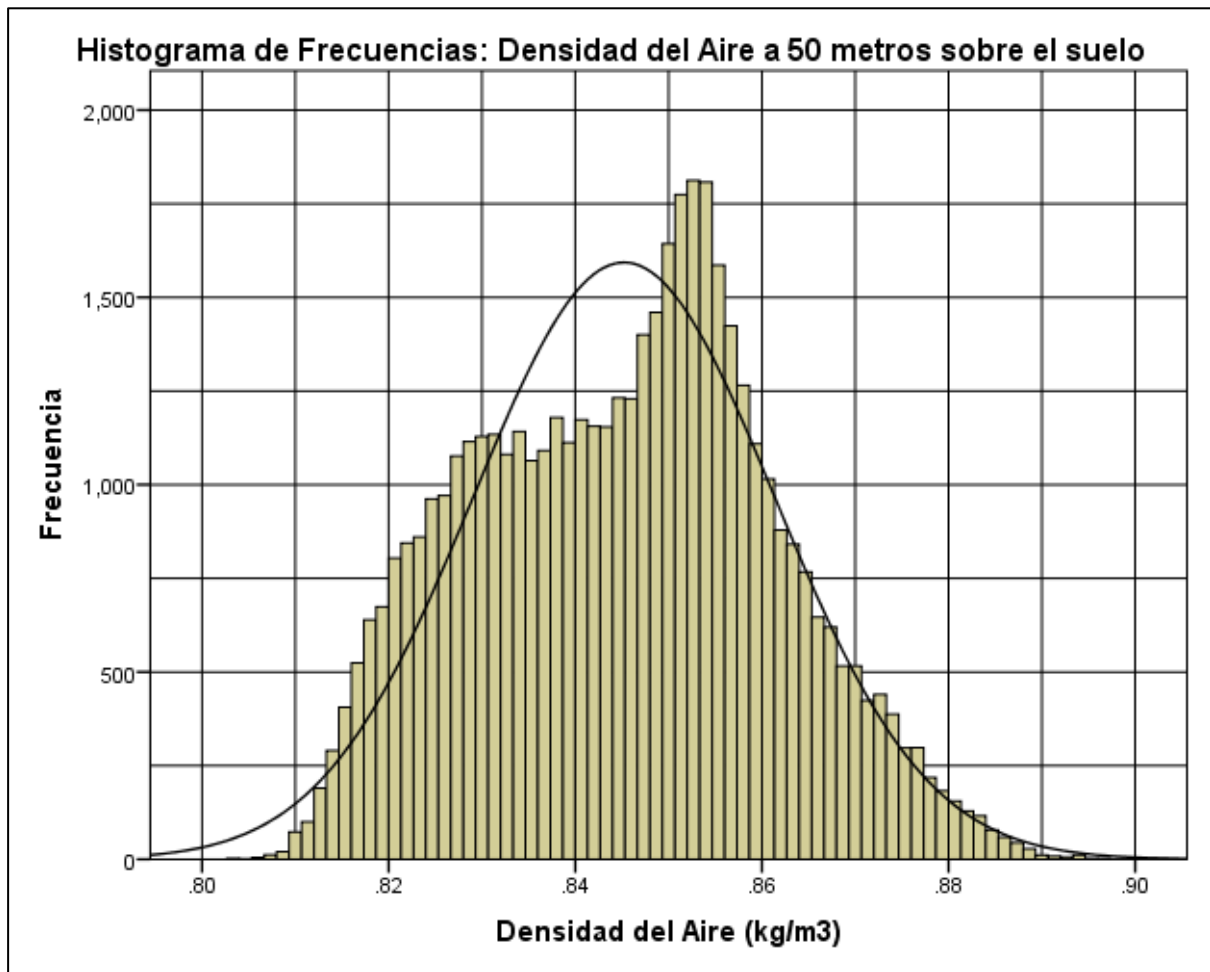
Figura 39

Histograma de Frecuencias: Energía Eólica a 30 metros



En la Figura 40 se muestra el histograma de frecuencias de la densidad del aire para visualizar y comprender mejor los datos.

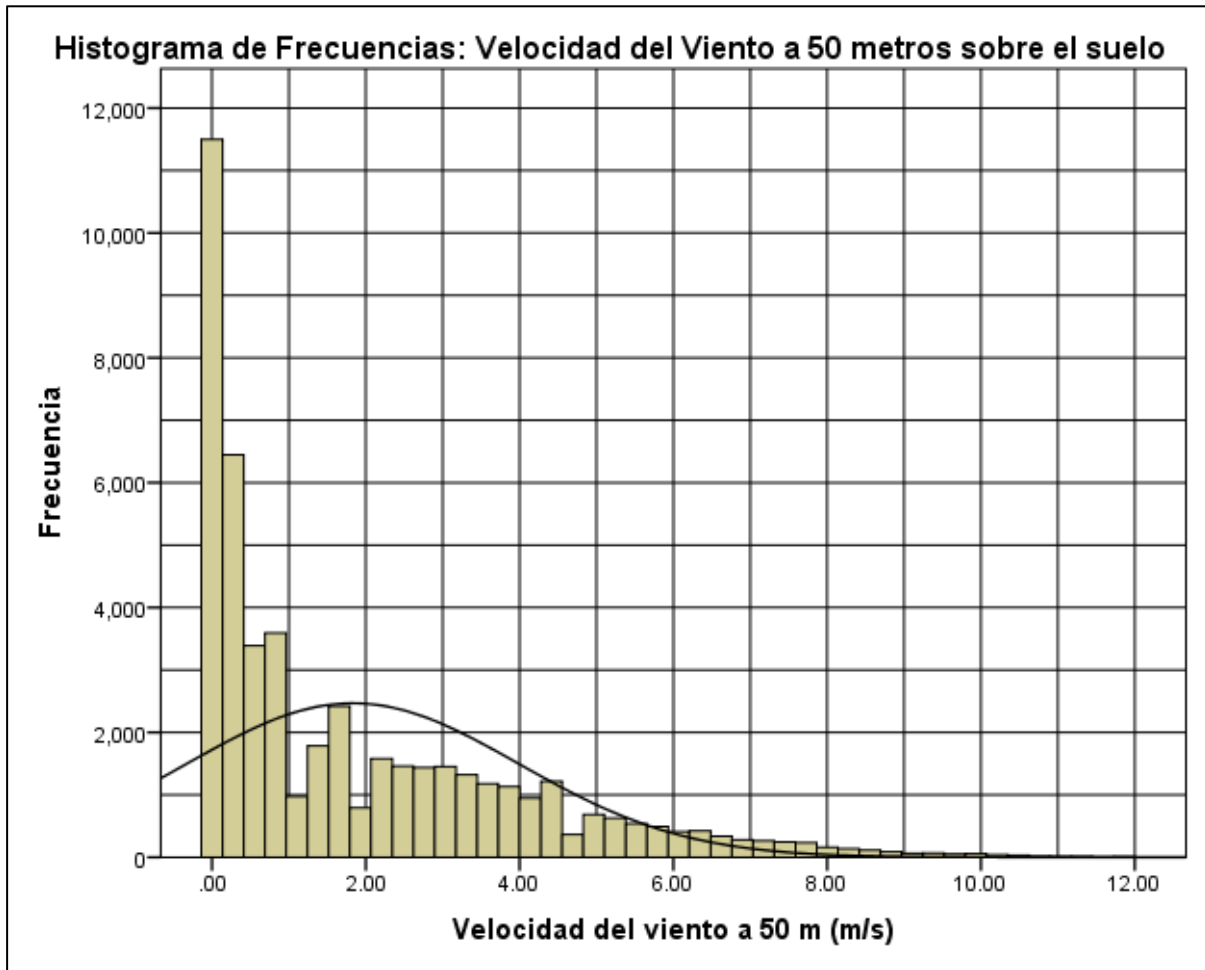
Figura 40
Histograma de Frecuencias: Densidad del Aire a 50 metros



La velocidad del viento promedio a 50 metros es de 1.83m/s, con una desviación estándar de 2.159 m/s, lo que sugiere que la velocidad del viento varía significativamente en la zona de estudio, tiene la asimetría positiva y la curtosis moderada, indican que los datos están concentrados en los valores más bajos, pero aún tienen una distribución relativamente normal en el centro de la distribución, en la

Figura 41 se muestra el histograma de frecuencias de la velocidad del viento para visualizar y comprender mejor los datos.

Figura 41
Histograma de Frecuencias: Velocidad del Viento a 50 metros



La asimetría para la velocidad del viento es positiva, lo que indica una cola larga hacia la derecha, es decir, hay valores más altos de velocidad del viento que alejan la distribución de una distribución normal.

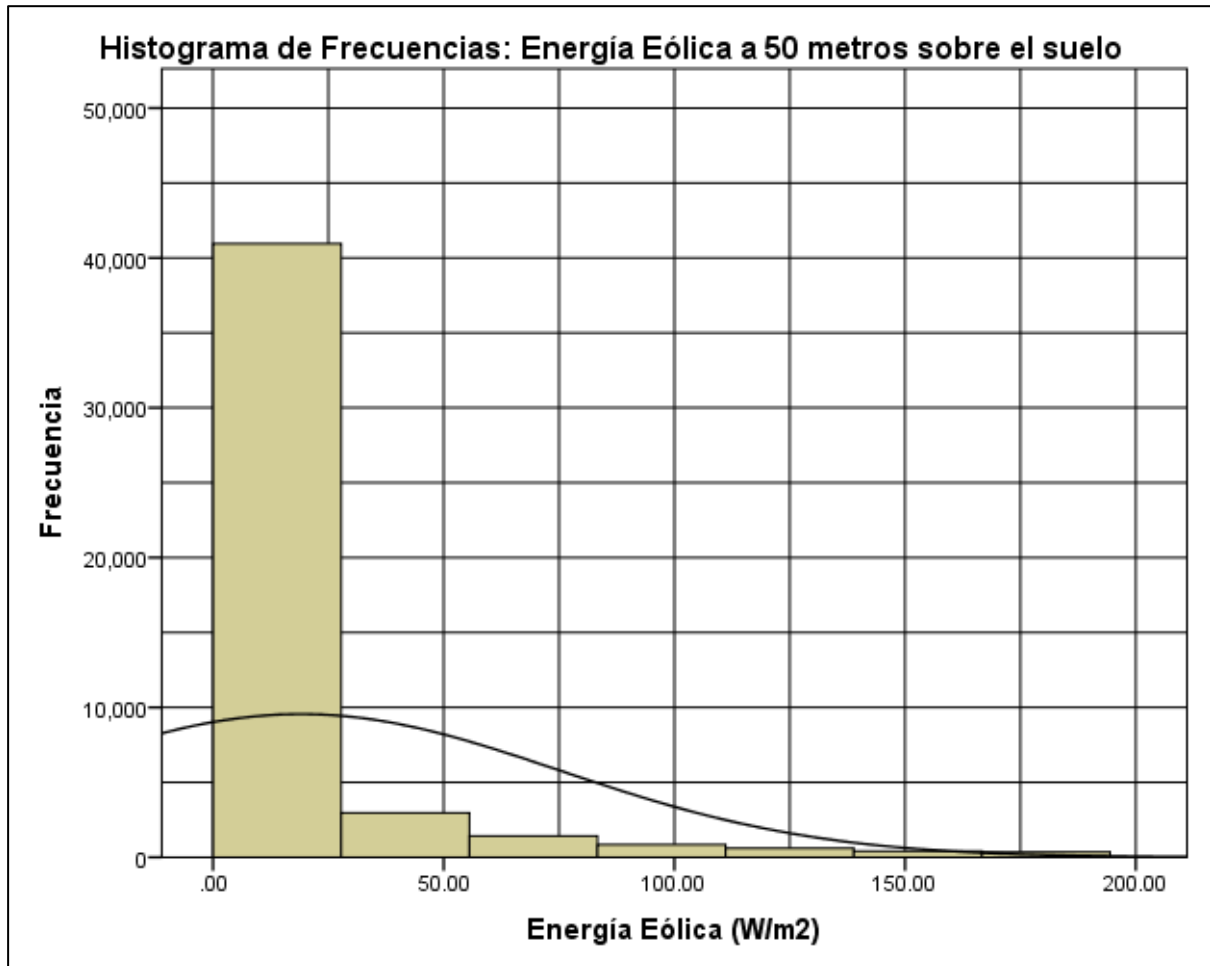
La energía eólica promedio es de 18.97 W/m², lo que sugiere que hay una cantidad significativa de energía disponible en el viento en la zona de estudio. Sin embargo, la desviación estándar es de 56.1445 W/m², indica que la cantidad de energía disponible en el viento varía significativamente en la zona. La energía eólica máxima registrada en la tabla es de 2061.97 W/m², lo que indica que hay momentos en los que el viento tiene una cantidad de energía considerablemente mayor que la media, la distribución de esta variable muestra una asimetría positiva y una curtosis alta, esto quiere decir que los datos están más concentrados en el lado



izquierdo de la distribución y que se está indicando que la distribución tiene una cola larga en el lado derecho, en la Figura 42 se muestra el histograma de frecuencias de la energía eólica para visualizar y comprender mejor los datos.

Figura 42

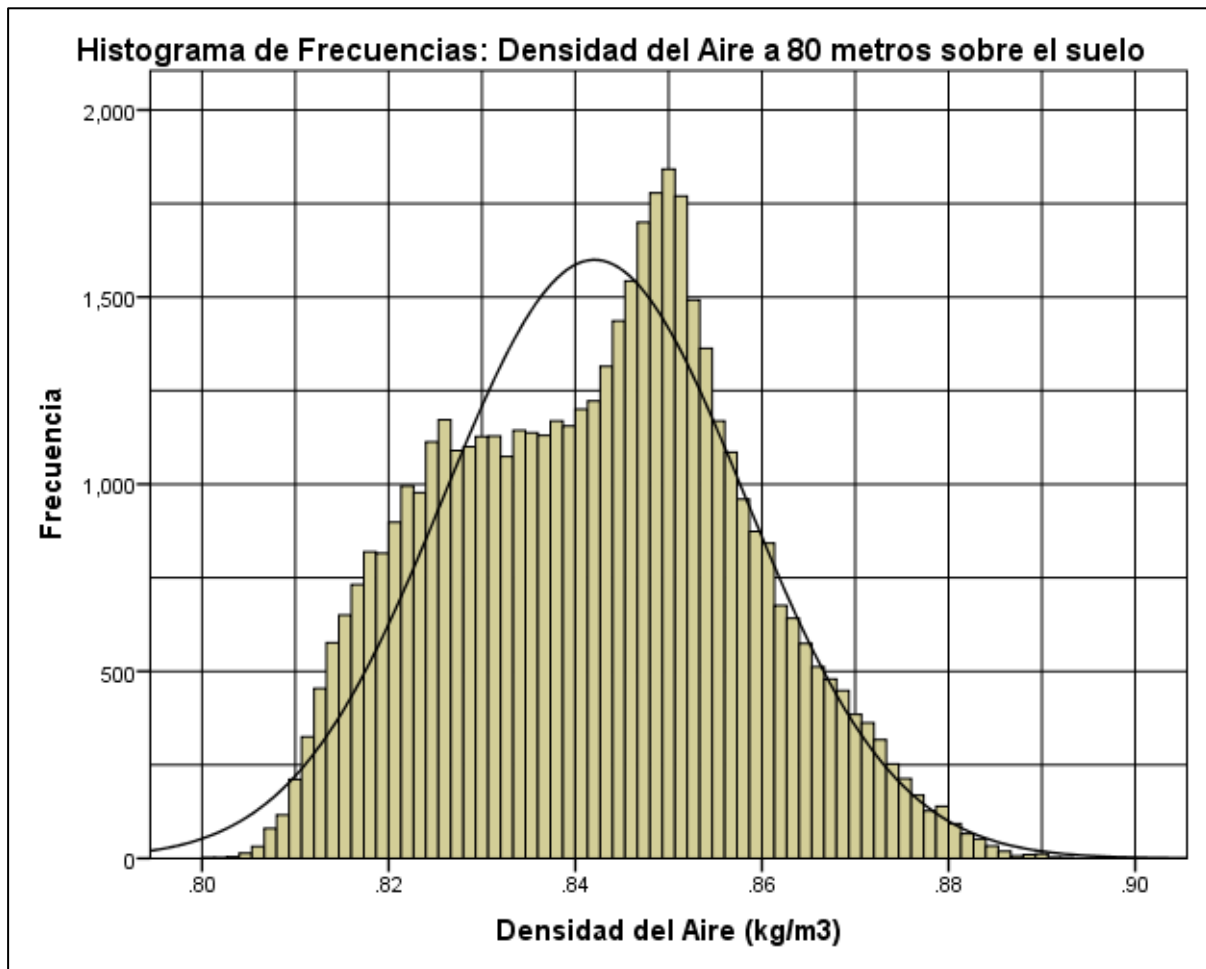
Histograma de Frecuencias: Energía Eólica a 50 metros



En la **Figura 43**

Histograma de Frecuencias: Densidad del Aire a 80 metros se muestra el histograma de frecuencias de la densidad del aire para visualizar y comprender mejor los datos.

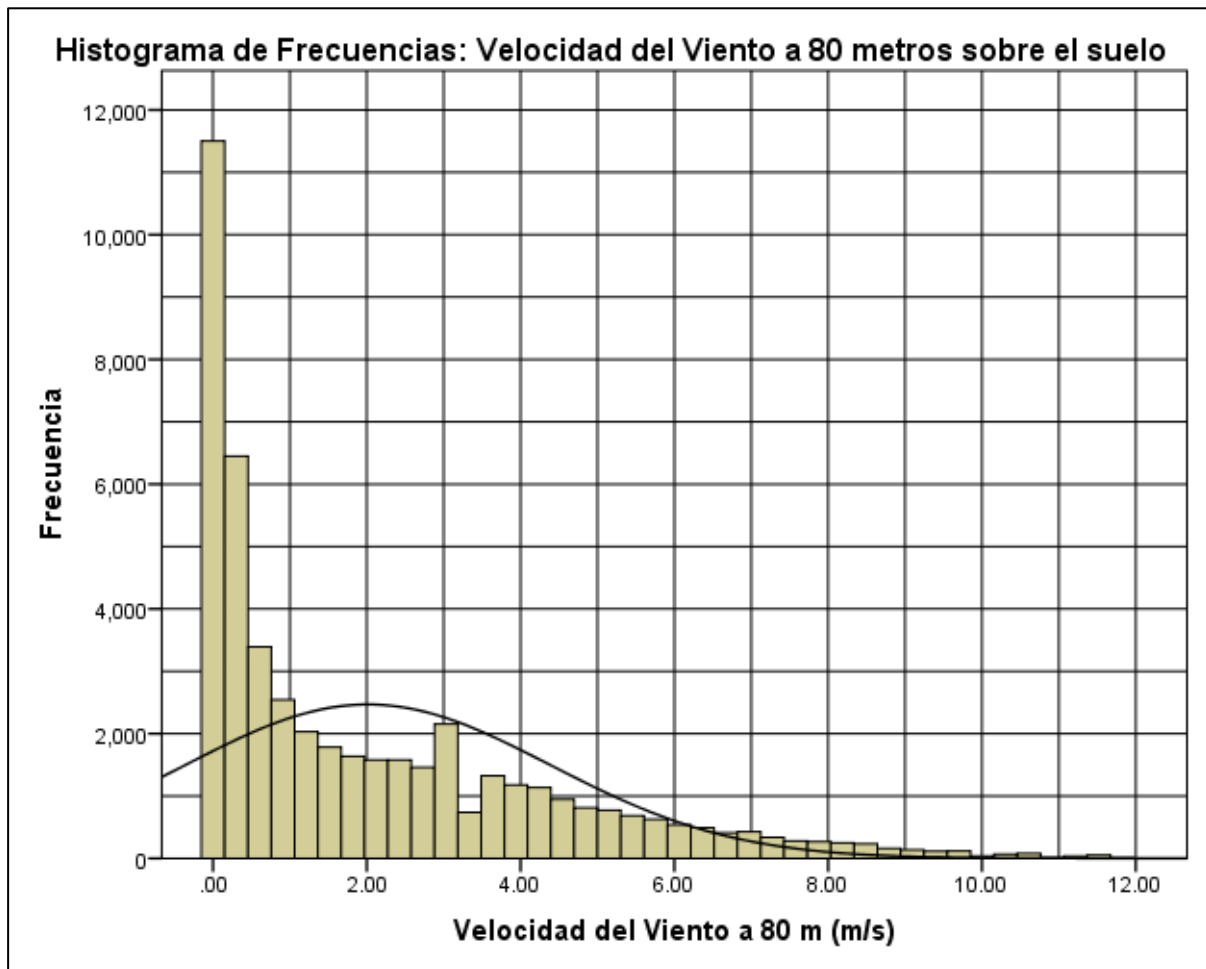
Figura 43
Histograma de Frecuencias: Densidad del Aire a 80 metros



La velocidad del viento promedio a 50 metros es de 2.01 m/s, con una desviación estándar de 2.37 m/s, lo que sugiere que la velocidad del viento varía significativamente en la zona de estudio, tiene la asimetría positiva y la curtosis moderada, indican que los datos están concentrados en los valores más bajos, pero aún tienen una distribución relativamente normal en el centro de la distribución, en la Figura 44

Histograma de Frecuencias: Velocidad del Viento a 80 metros se muestra el histograma de frecuencias de la velocidad del viento para visualizar y comprender mejor los datos.

Figura 44
Histograma de Frecuencias: Velocidad del Viento a 80 metros



La asimetría para la velocidad del viento es positiva, lo que indica una cola larga hacia la derecha, es decir, hay valores más altos de velocidad del viento que alejan la distribución de una distribución normal.

La energía eólica promedio es de 25.07 W/m², lo que sugiere que hay una cantidad significativa de energía disponible en el viento en la zona de estudio. Sin embargo, la desviación estándar es de 74.16 W/m², indica que la cantidad de energía disponible en el viento varía significativamente en la zona. La energía eólica máxima registrada en la tabla es de 2723.51 W/m², lo que indica que hay momentos en los que el viento tiene una cantidad de energía considerablemente mayor que la media, la distribución de esta variable muestra una asimetría positiva y una curtosis alta, esto quiere decir que los datos están más concentrados en el lado

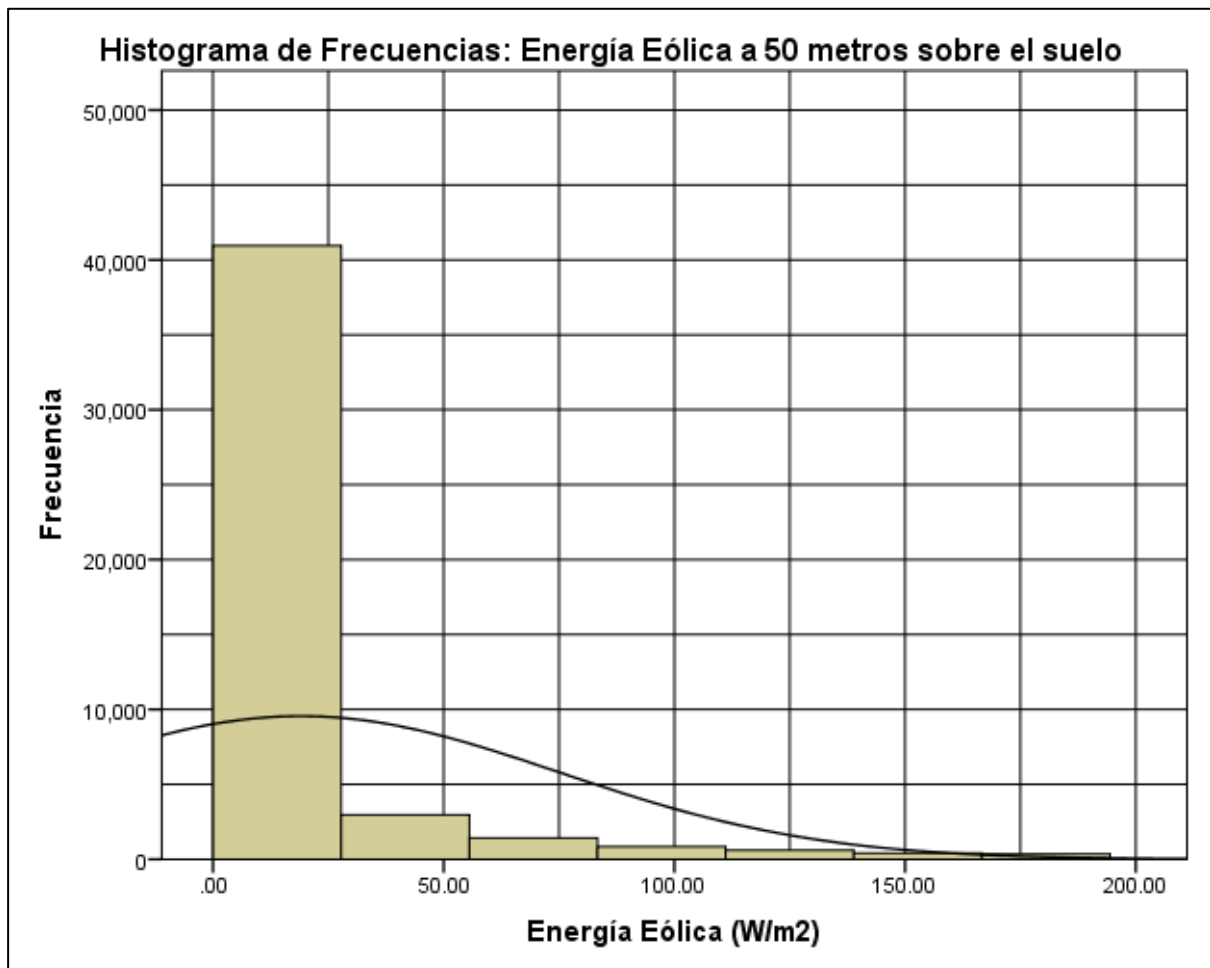


izquierdo de la distribución y que se está indicando que la distribución tiene una cola larga en el lado derecho, en la Figura 45

Histograma de Frecuencias: Energía Eólica a 80 metros se muestra el histograma de frecuencias de la energía eólica para visualizar y comprender mejor los datos.

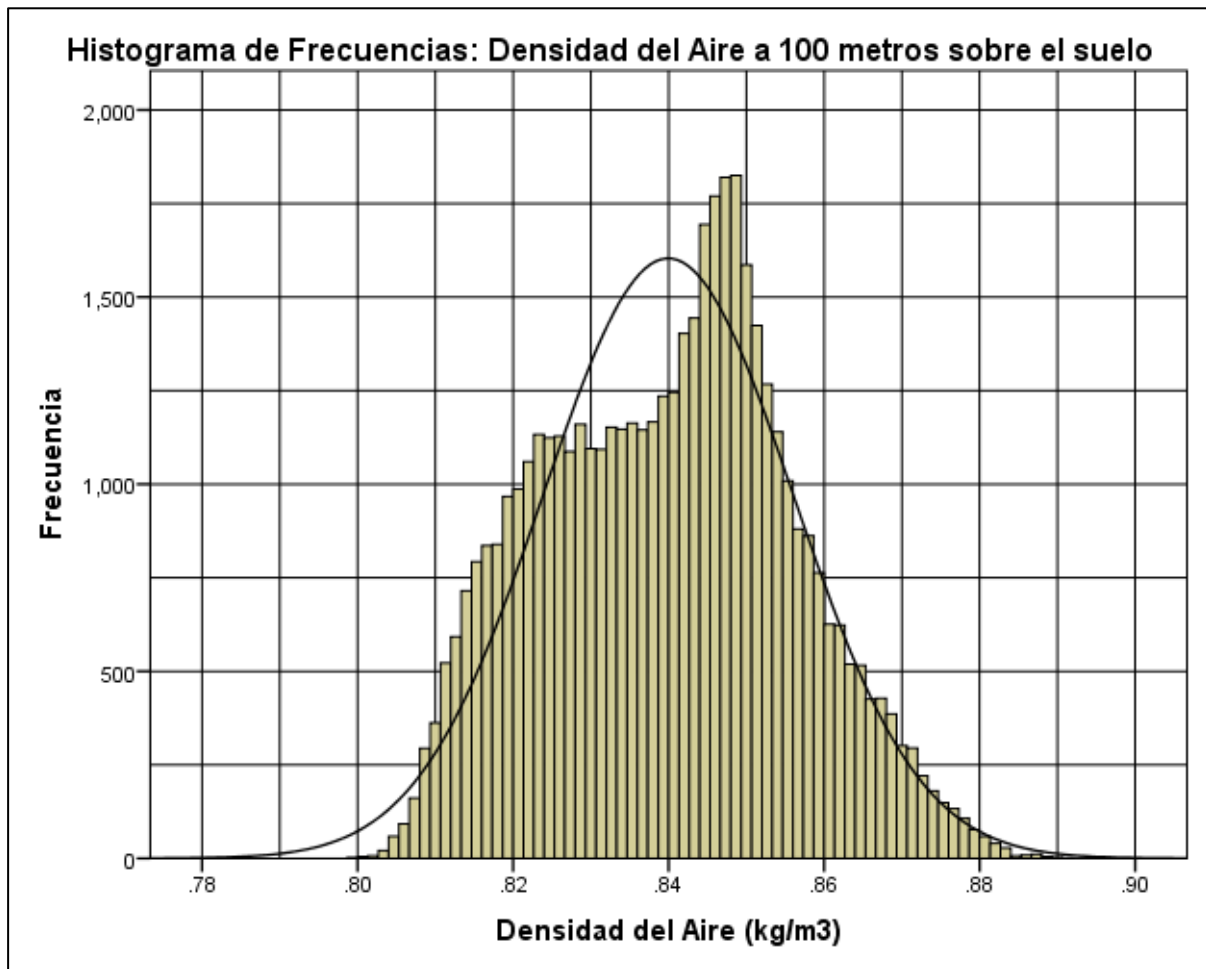
Figura 45

Histograma de Frecuencias: Energía Eólica a 80 metros



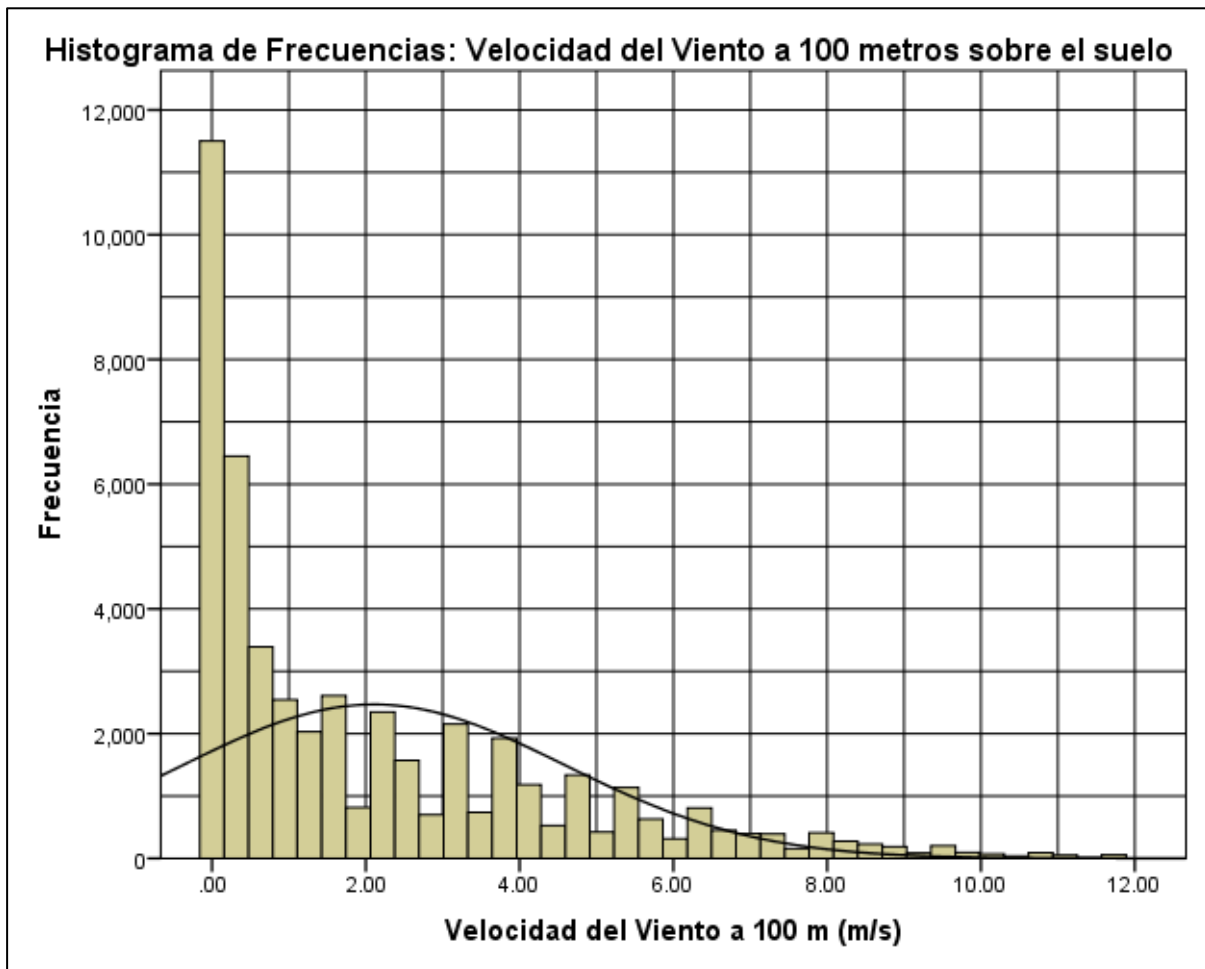
En la Figura 46 se muestra el histograma de frecuencias de la densidad del aire para visualizar y comprender mejor los datos.

Figura 46
Histograma de Frecuencias: Densidad del Aire a 100 metros



La velocidad del viento promedio a 100 metros es de 2.1 m/s, con una desviación estándar de 2.48 m/s, lo que sugiere que la velocidad del viento varía significativamente en la zona de estudio, tiene la asimetría positiva y la curtosis moderada, indican que los datos están concentrados en los valores más bajos, pero aún tienen una distribución relativamente normal en el centro de la distribución, en la Figura 47 se muestra el histograma de frecuencias de la velocidad del viento para visualizar y comprender mejor los datos.

Figura 47
Histograma de Frecuencias: Velocidad del Viento a 100 metros



La asimetría para la velocidad del viento es positiva, lo que indica una cola larga hacia la derecha, es decir, hay valores más altos de velocidad del viento que alejan la distribución de una distribución normal.

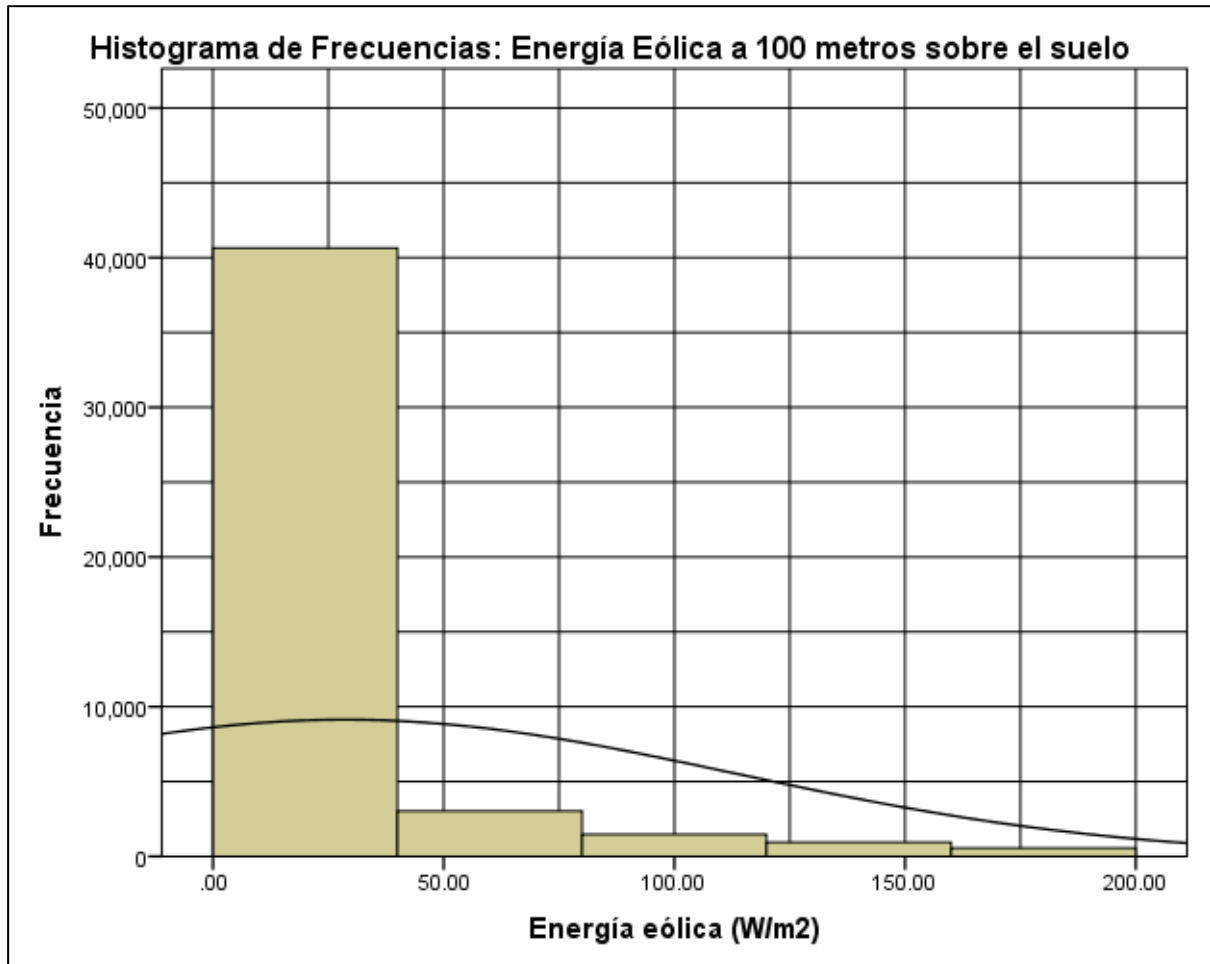
La energía eólica promedio es de 28.59 W/m², lo que sugiere que hay una cantidad significativa de energía disponible en el viento en la zona de estudio. Sin embargo, la desviación estándar es de 84.57 W/m², indica que la cantidad de energía disponible en el viento varía significativamente en la zona. La energía eólica máxima registrada en la tabla es de 3105.92 W/m², lo que indica que hay momentos en los que el viento tiene una cantidad de energía considerablemente mayor que la media, la distribución de esta variable muestra una asimetría positiva y una curtosis alta, esto quiere decir que los datos están más concentrados en el lado



izquierdo de la distribución y que se está indicando que la distribución tiene una cola larga en el lado derecho, en la Figura 48 se muestra el histograma de frecuencias de la energía eólica para visualizar y comprender mejor los datos.

Figura 48

Histograma de Frecuencias: Energía Eólica a 100 metros





Anexo C. Rosas de Viento y Distribución de Weibull a 10, 30, 50, 80 y 100 metros

Figura 49

Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 1, a 10 metros

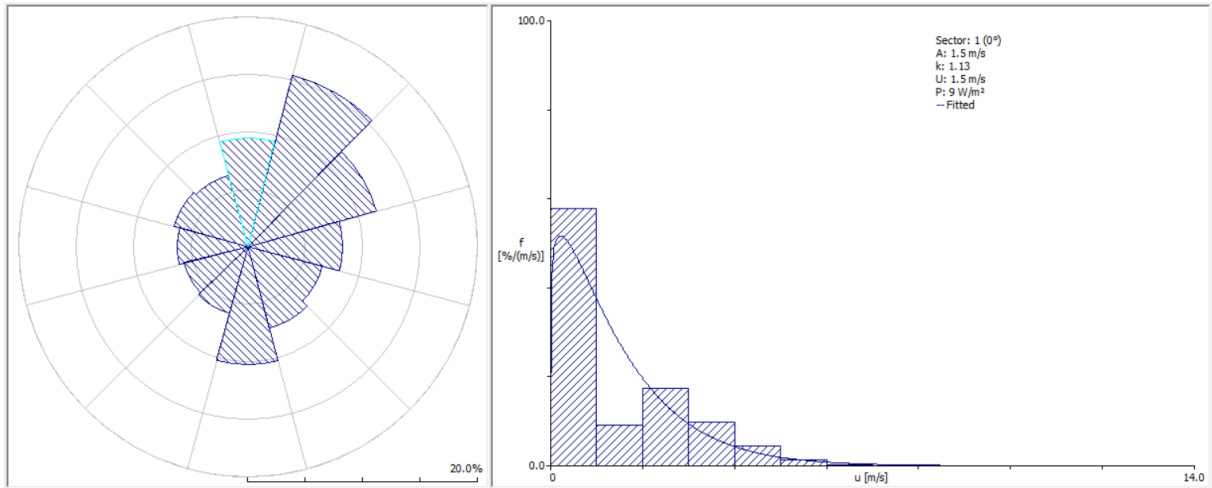


Figura 50

Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 4, a 10 metros

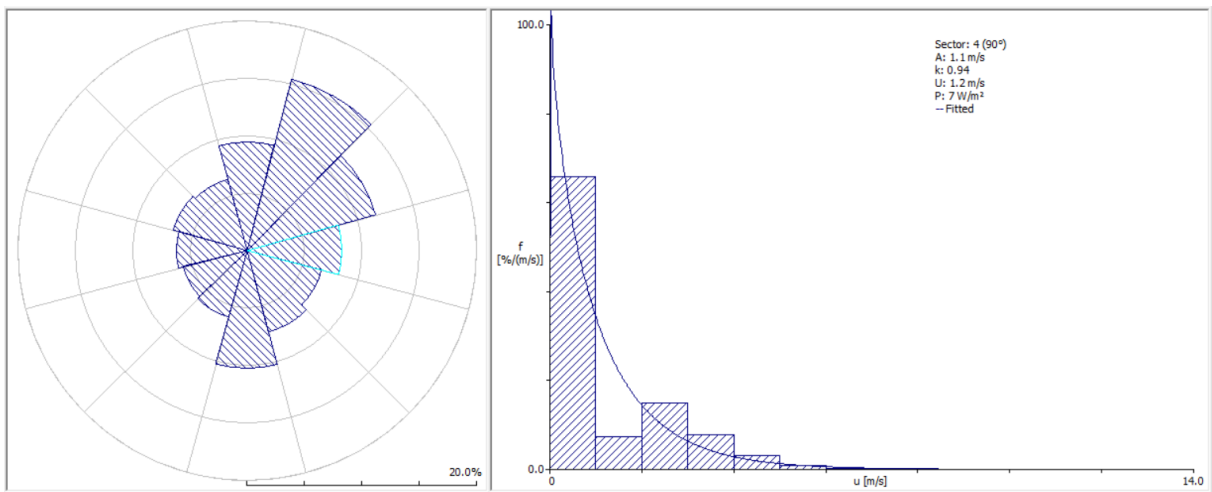




Figura 51
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 5, a 10 metros

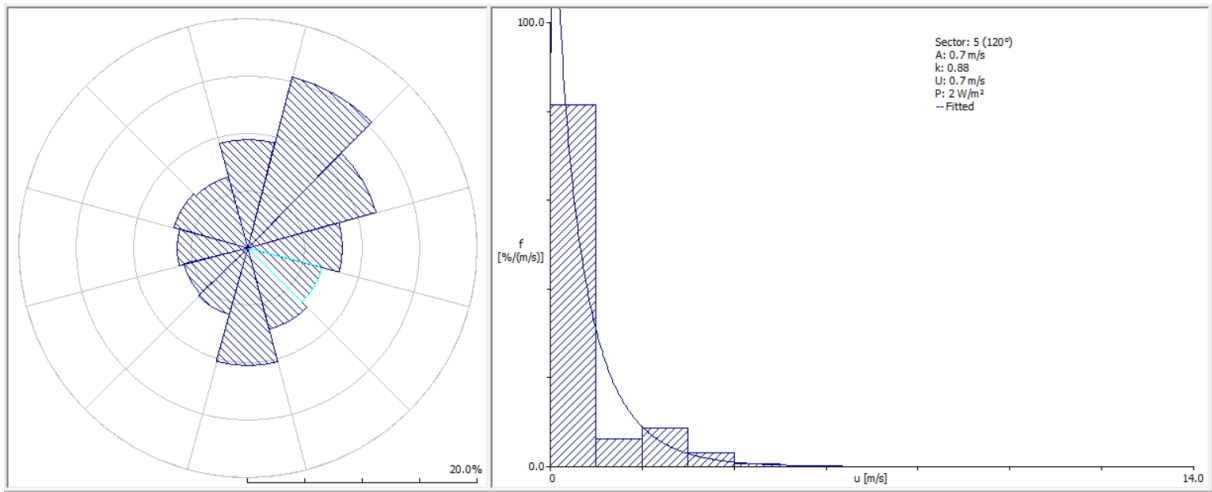


Figura 52
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 6, a 10 metros

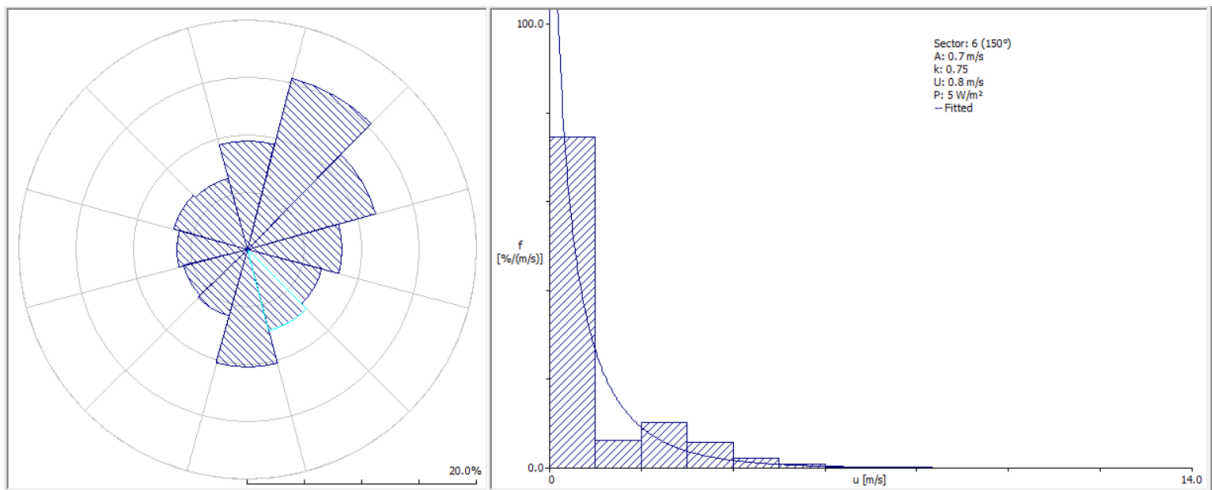


Figura 53
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 8, a 10 metros

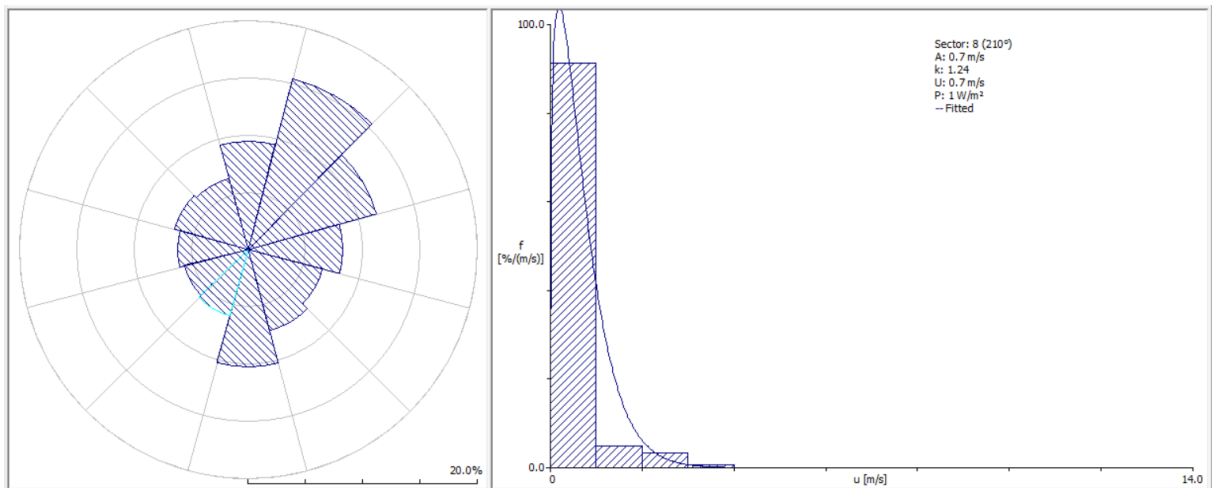




Figura 54
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 9, a 10 metros

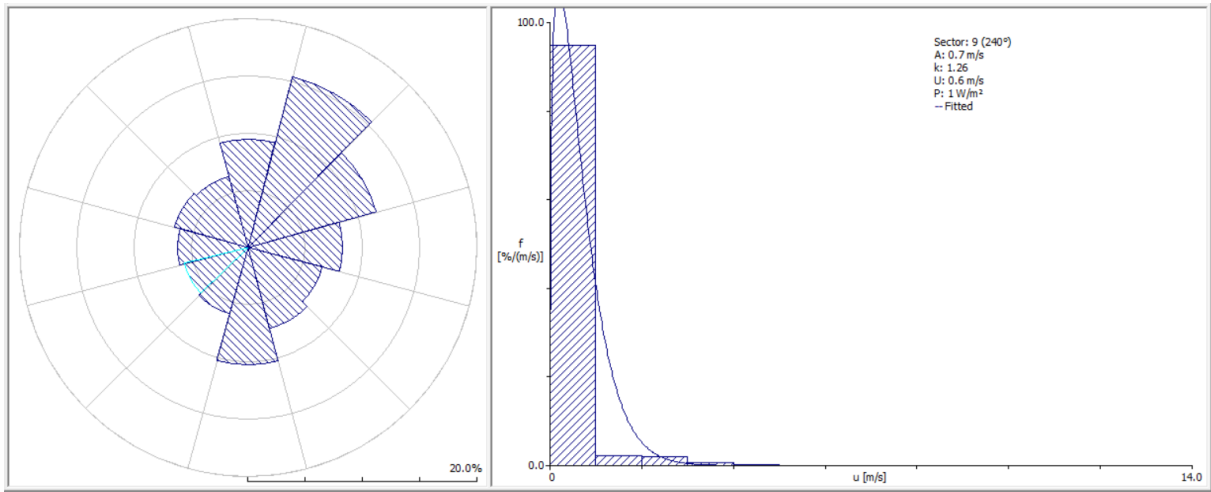


Figura 55
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 10, a 10 metros

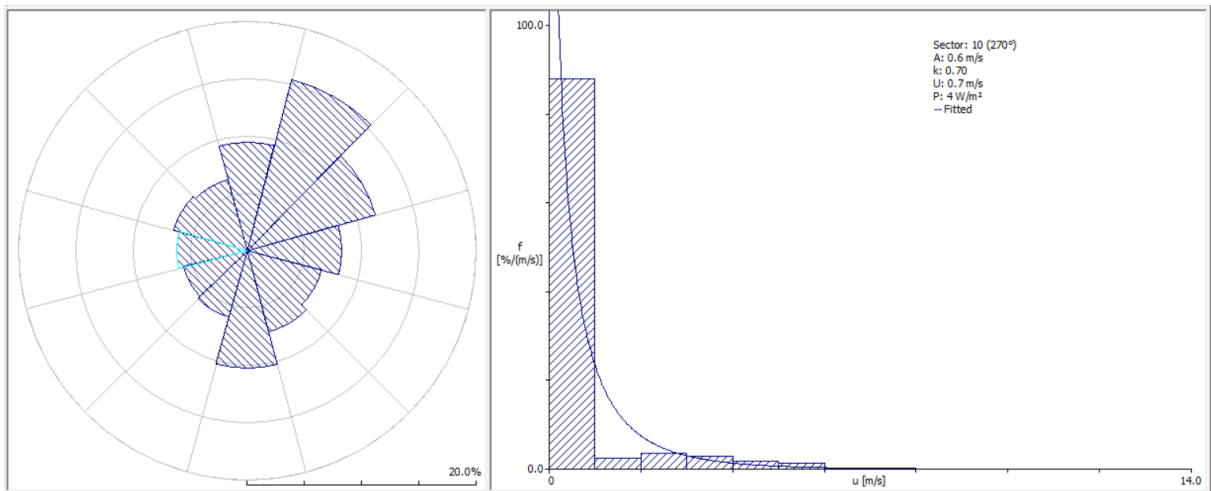


Figura 56
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 11, a 10 metros

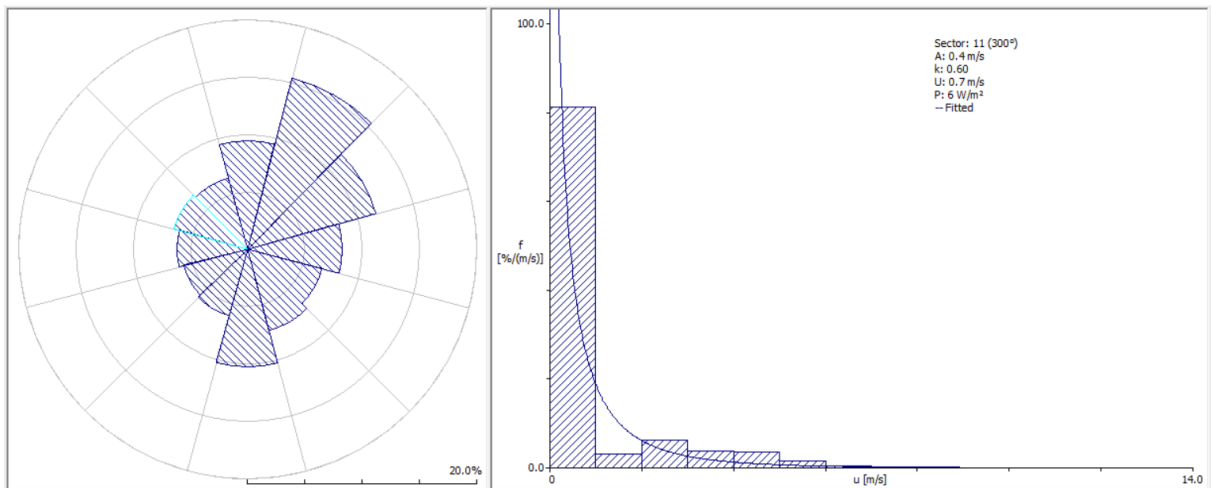




Figura 57
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 12, a 10 metros

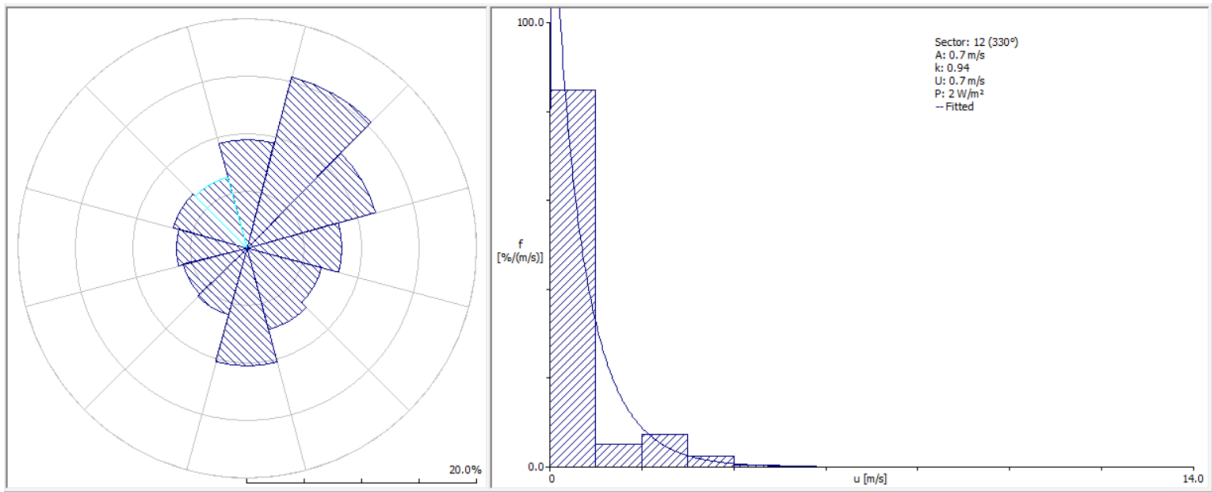


Figura 58
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 1, a 30 metros

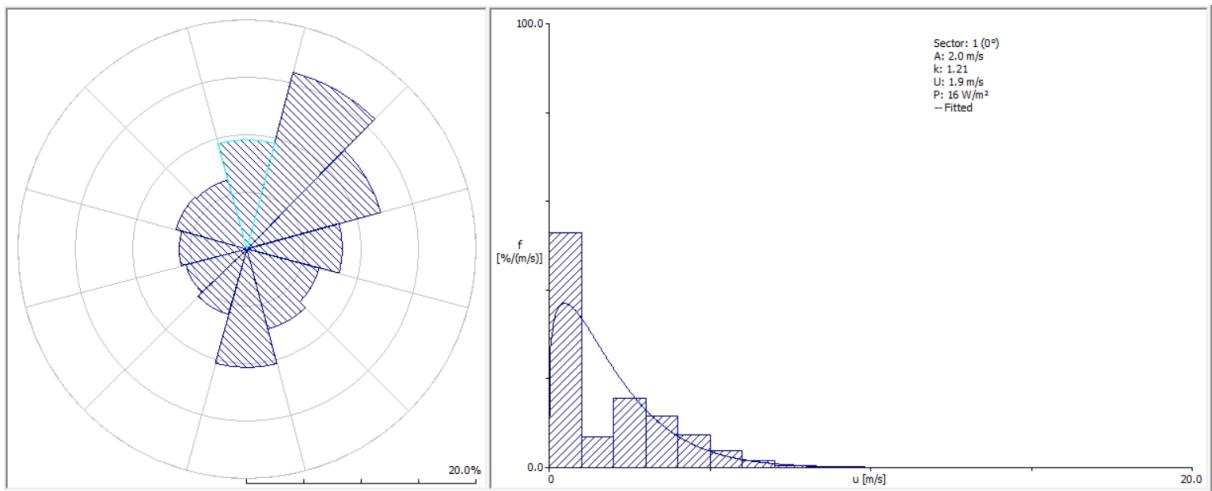


Figura 59
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 4, a 30 metros

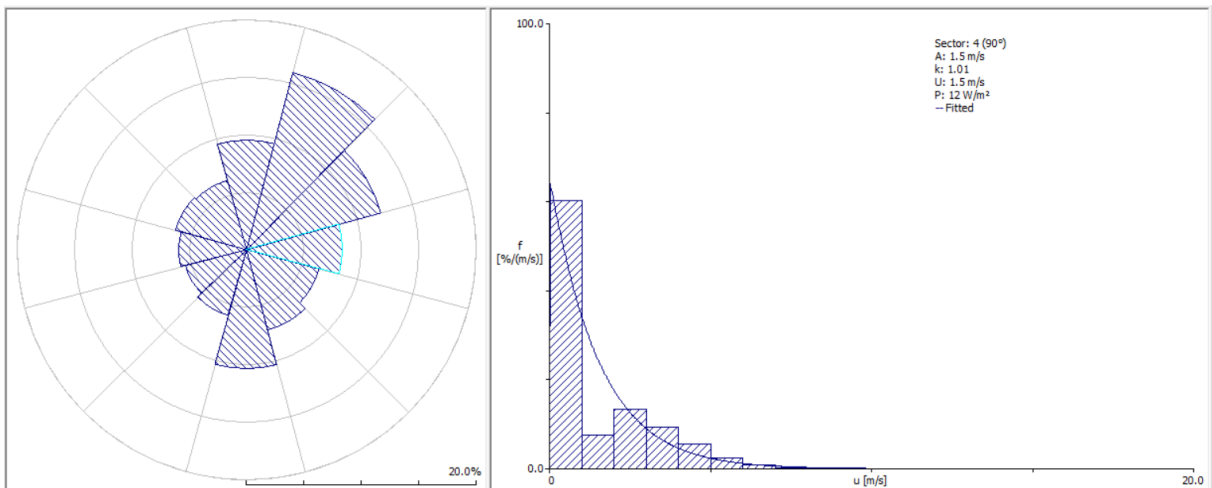




Figura 60
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 5, a 30 metros

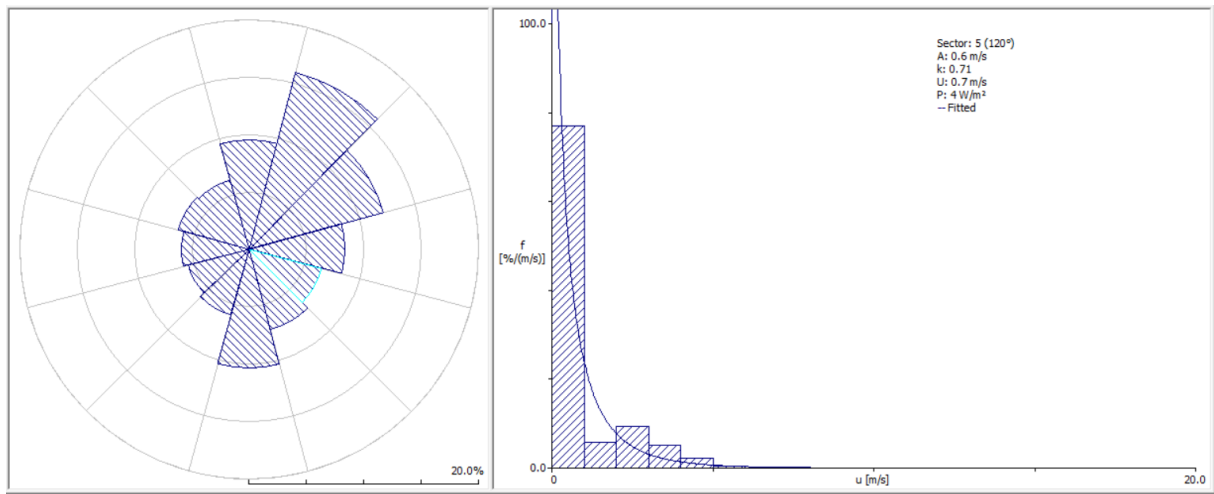


Figura 61
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 6, a 30 metros

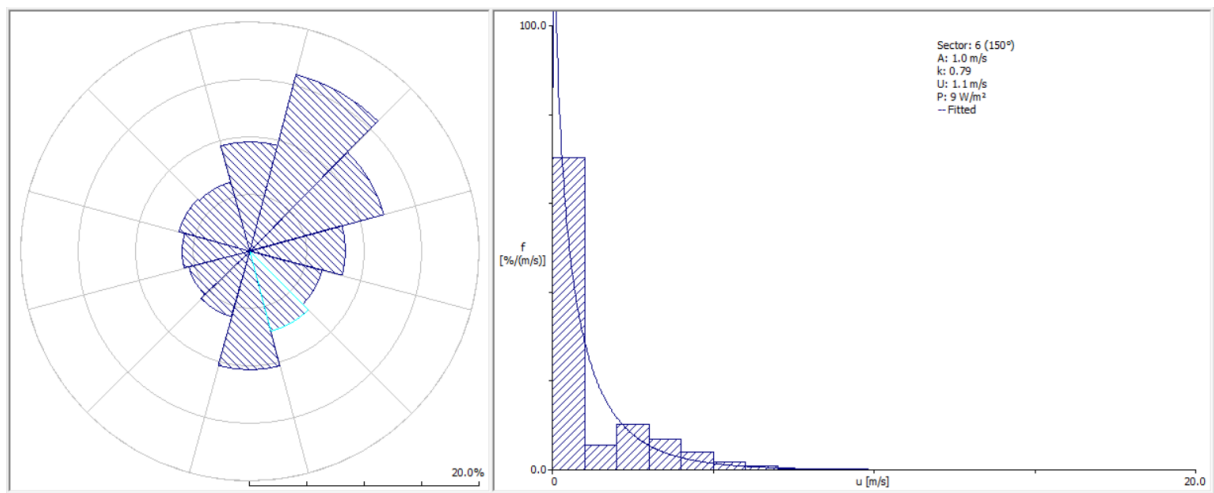


Figura 62
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 8, a 30 metros

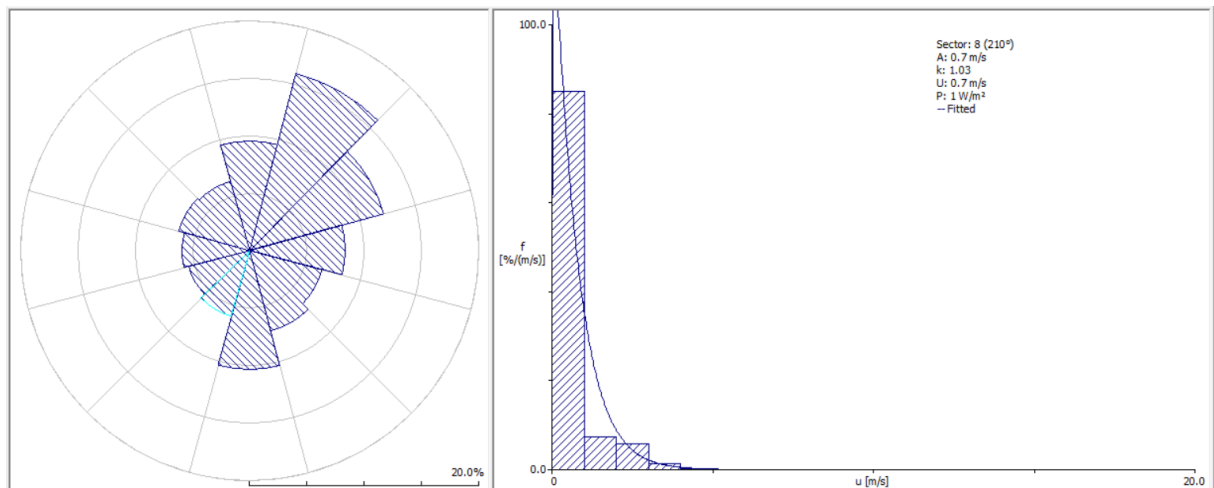




Figura 63
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 9, a 30 metros

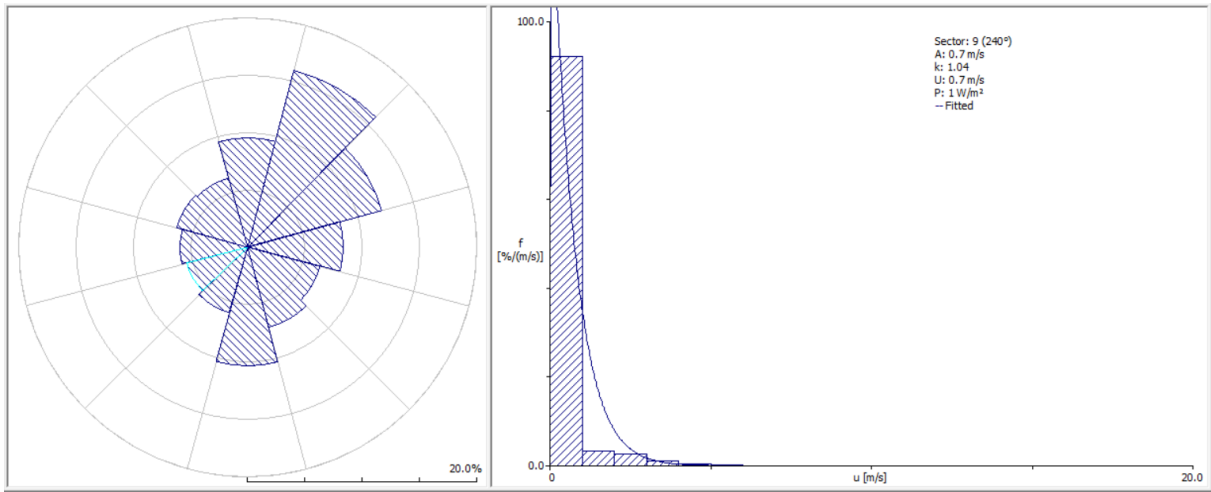


Figura 64
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 10, a 30 metros

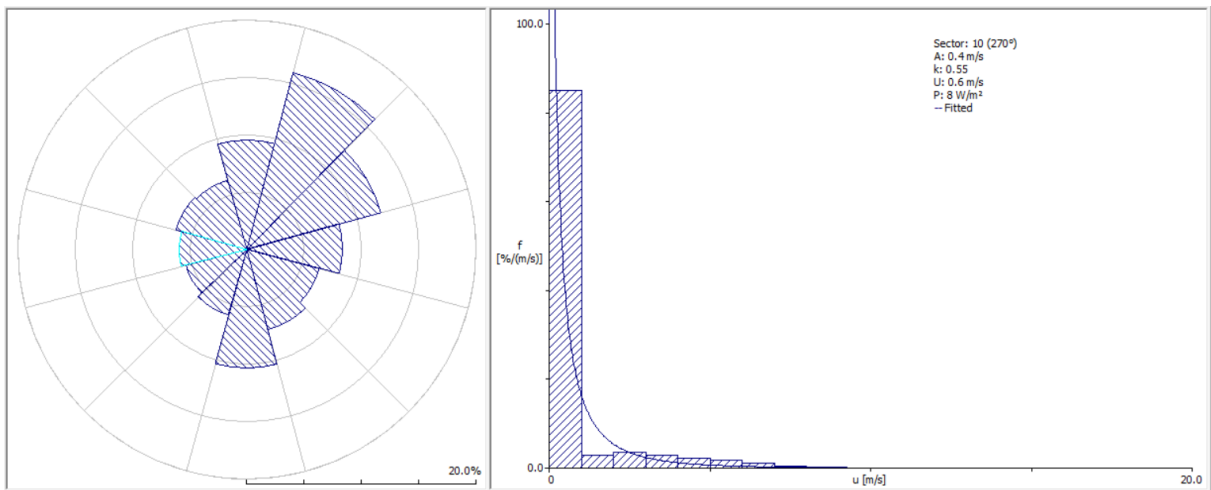


Figura 65
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 11, a 30 metros

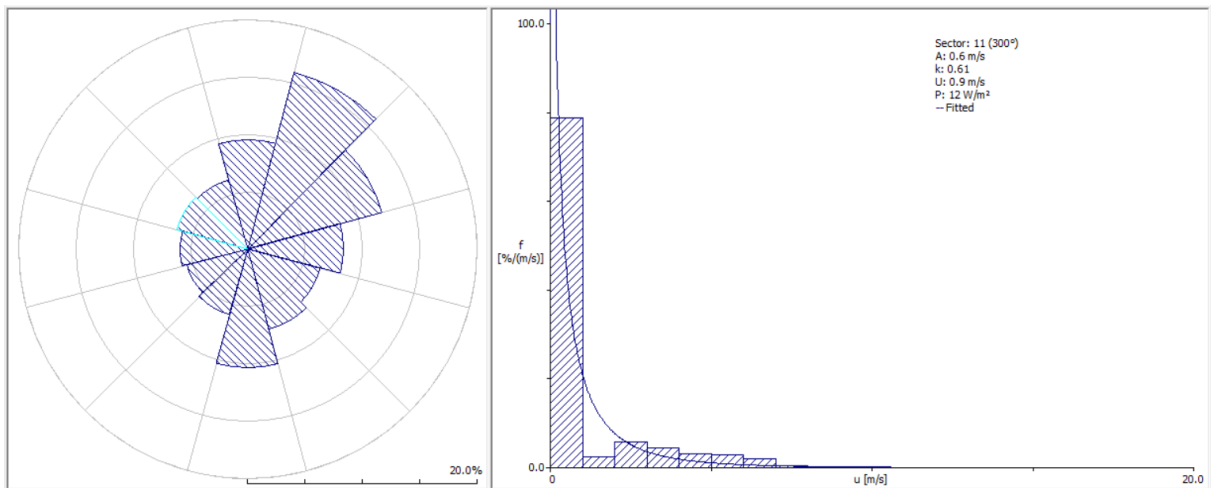




Figura 66
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 12, a 30 metros

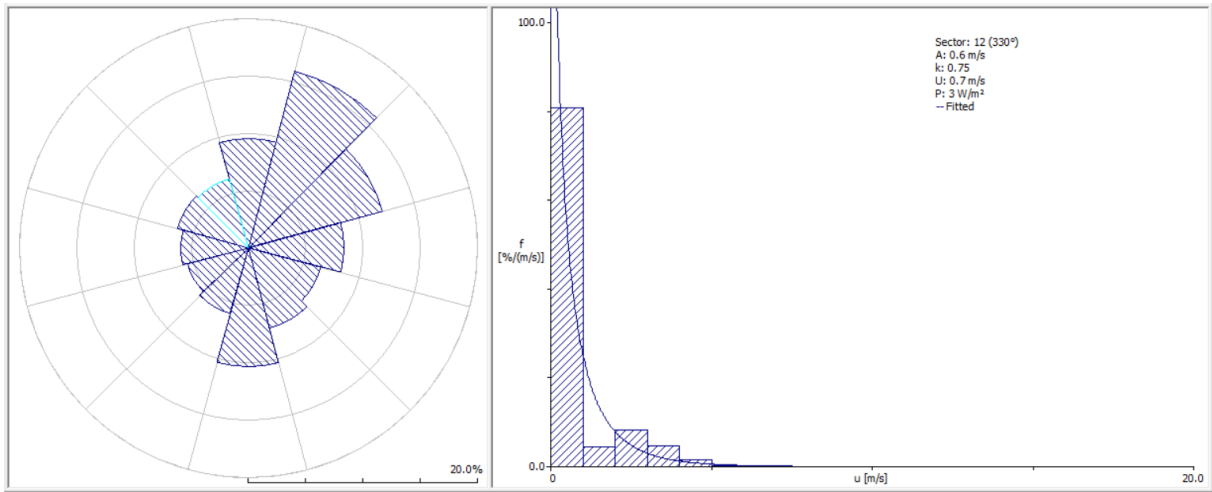


Figura 67
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 1, a 50 metros

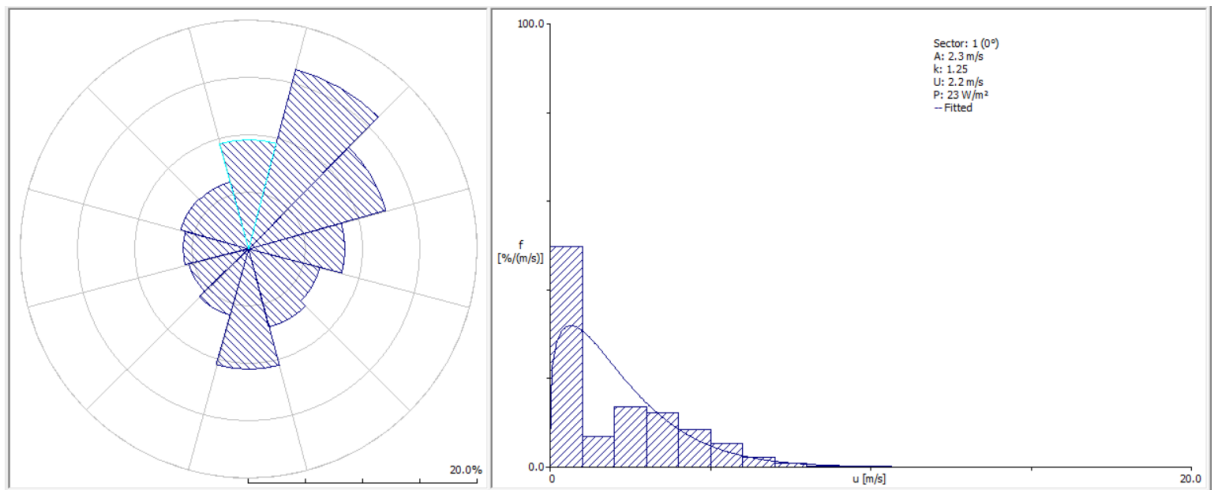


Figura 68
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 4, a 50 metros

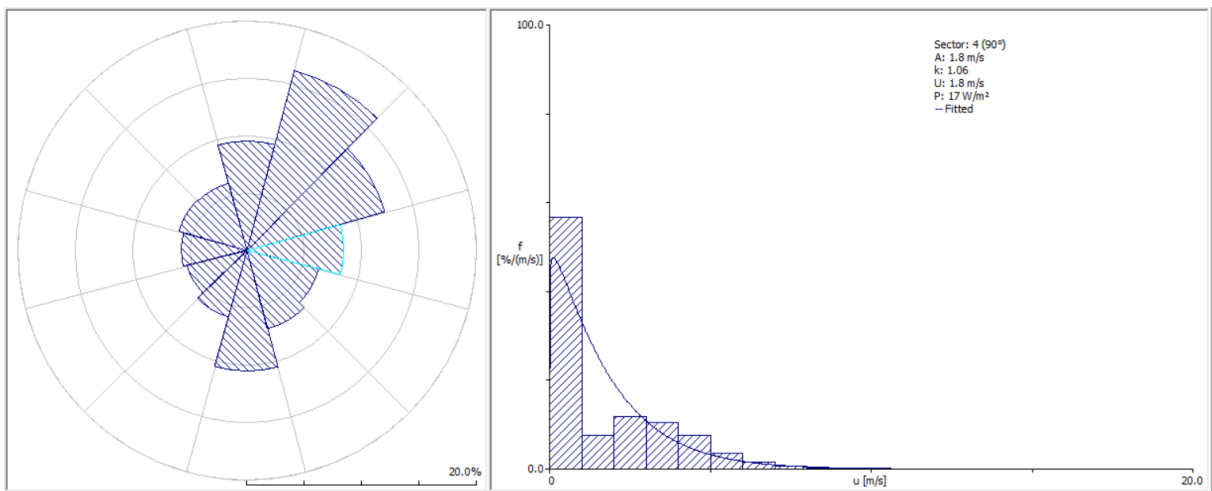




Figura 69
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 5, a 50 metros

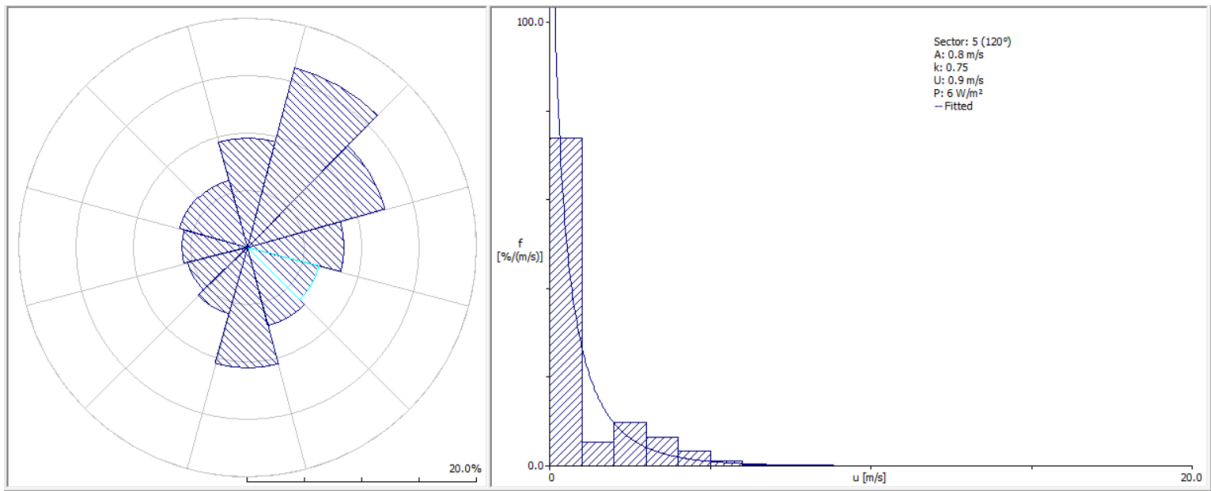


Figura 70
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 6, a 50 metros

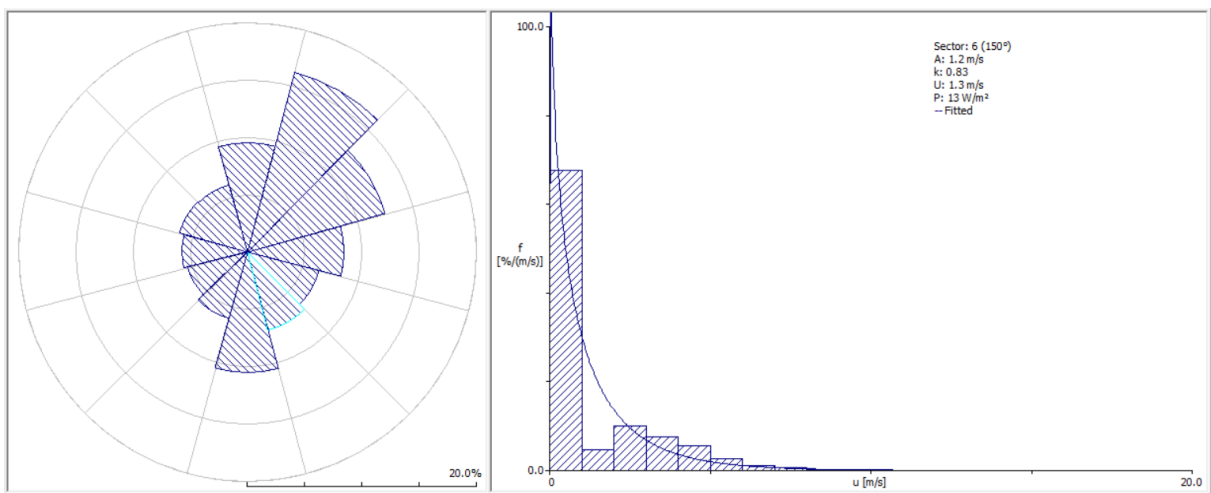


Figura 71
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 8, a 50 metros

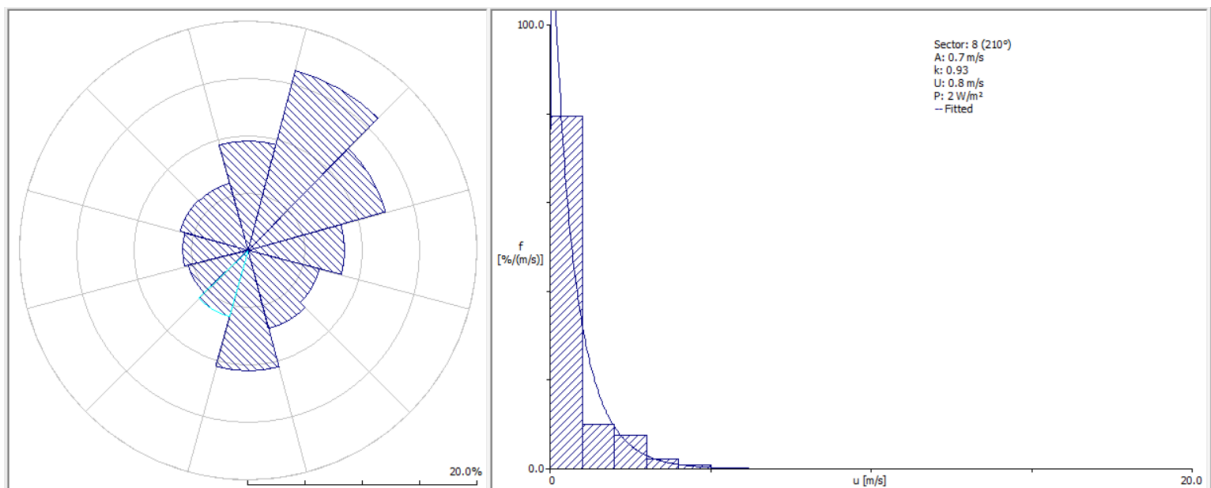




Figura 72
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 9, a 50 metros

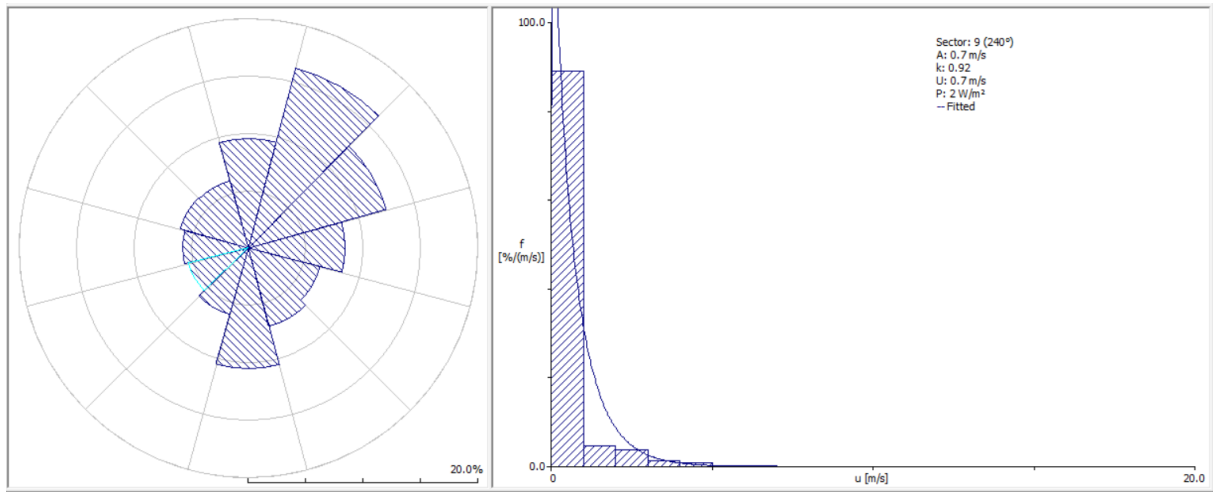


Figura 73
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 10, a 50 metros

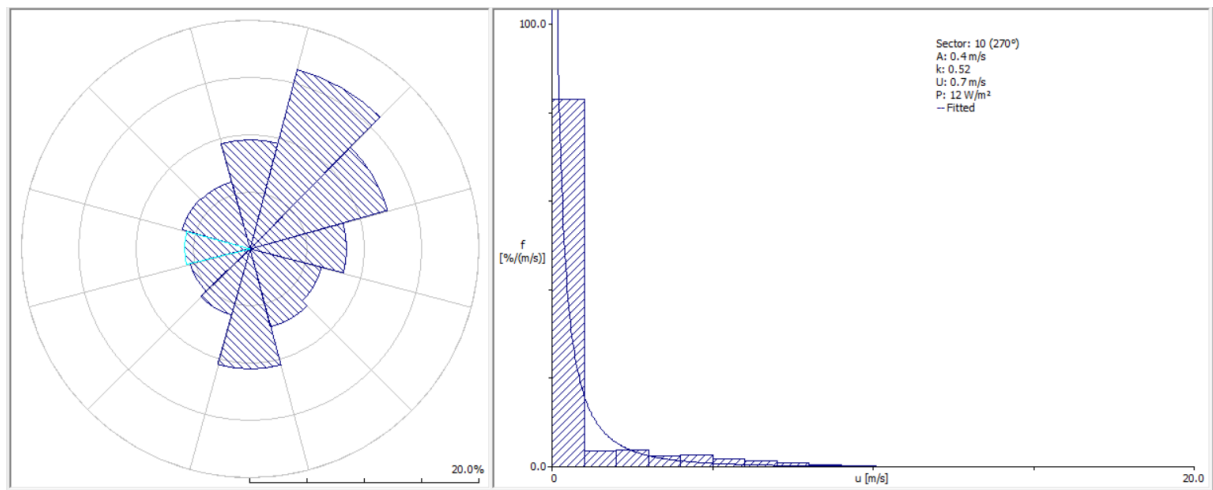


Figura 74
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 11, a 50 metros

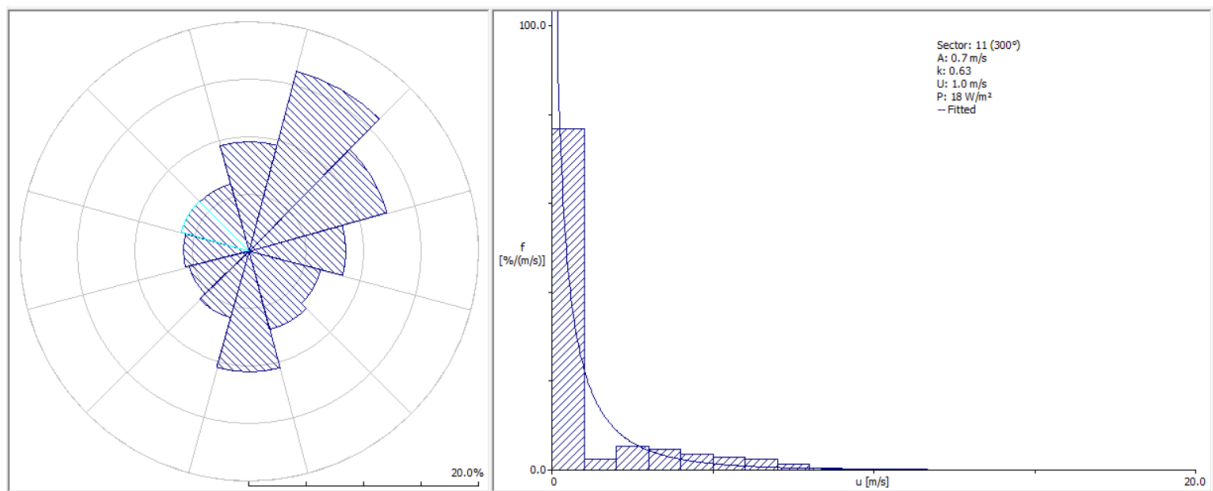




Figura 75
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 12, a 50 metros

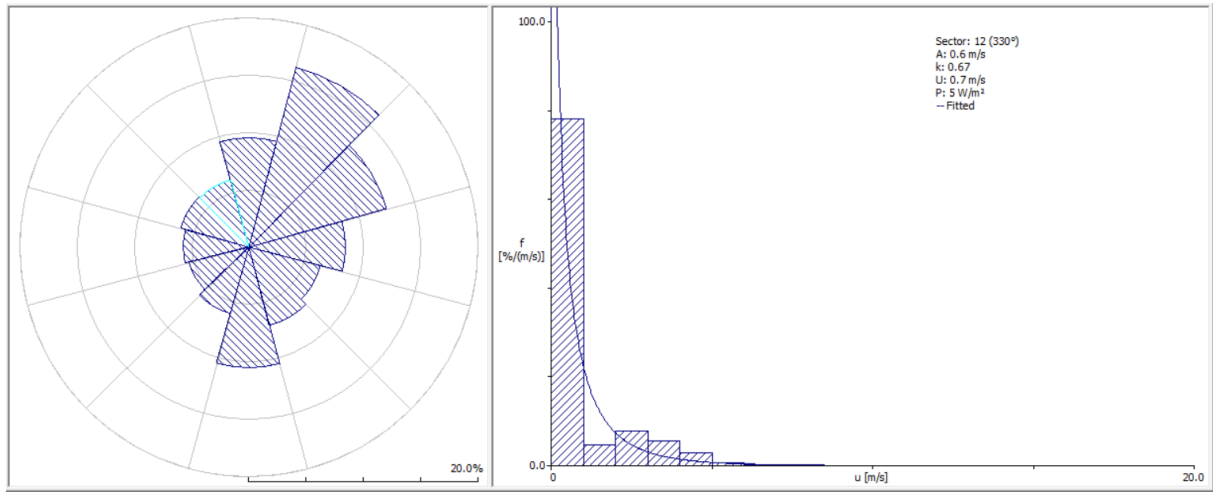


Figura 76
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 1, a 80 metros

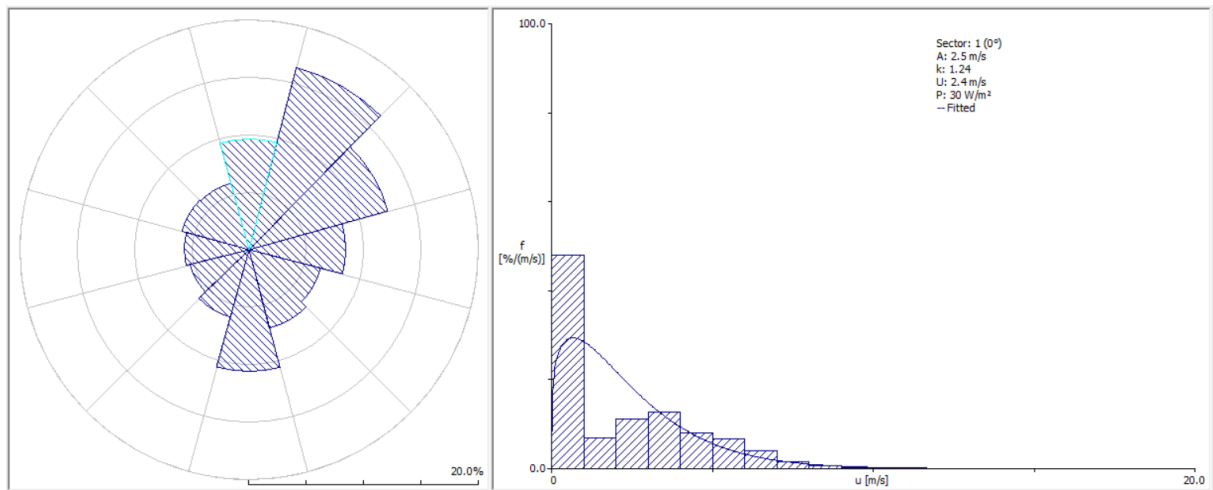


Figura 77
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 4, a 80 metros

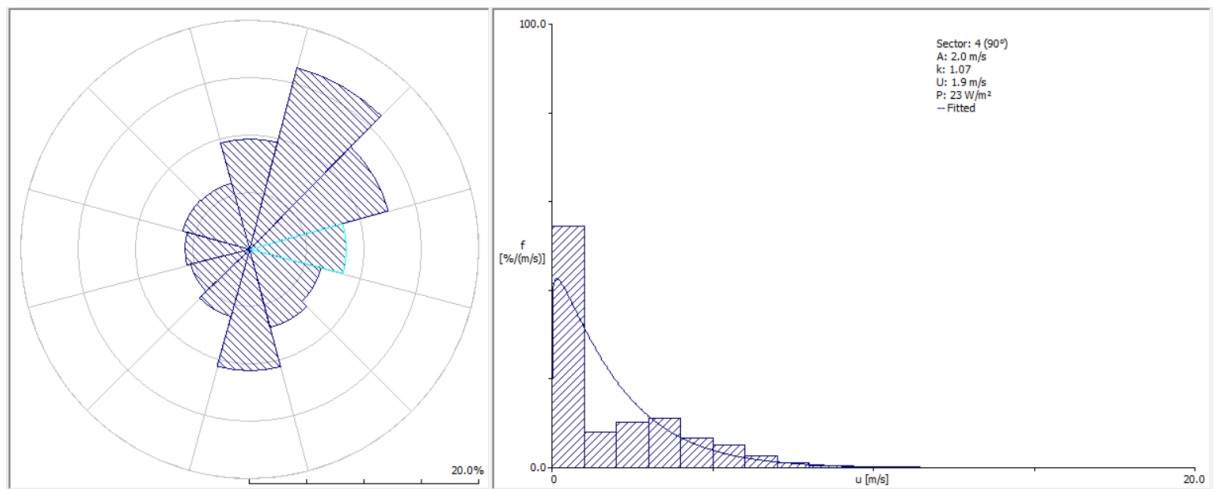




Figura 78
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 5, a 80 metros

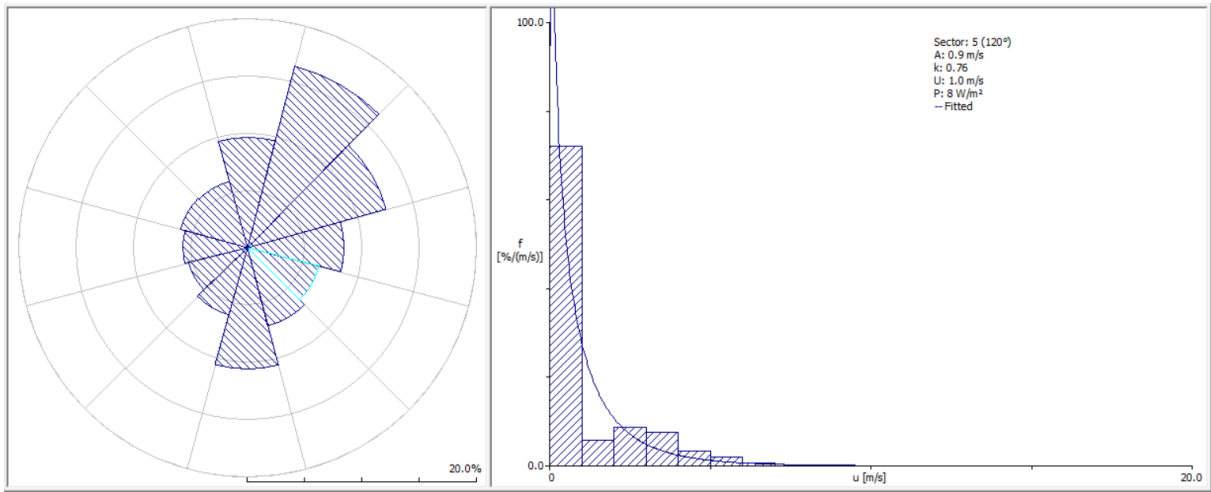


Figura 79
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 6, a 80 metros

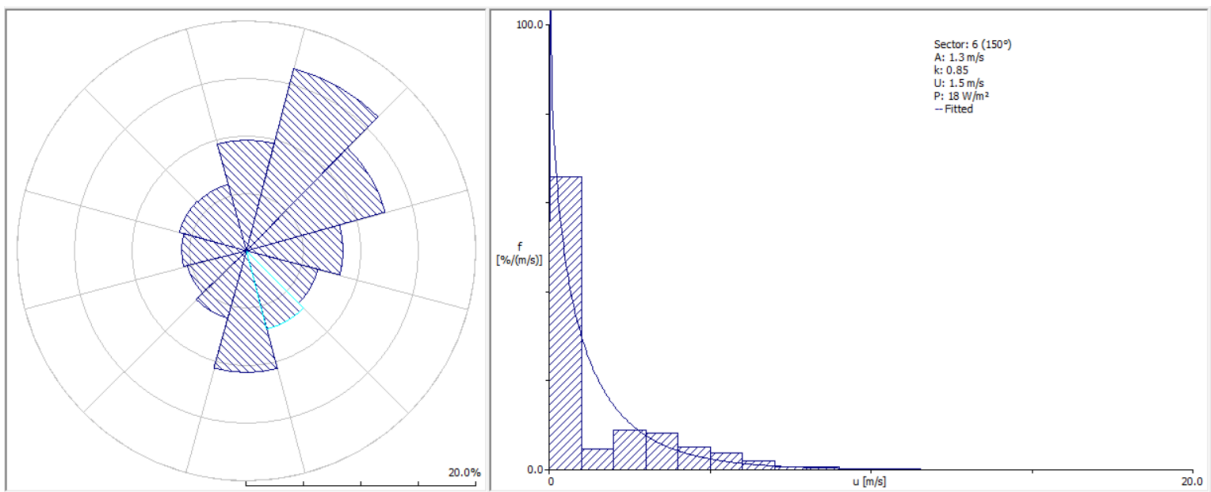


Figura 80
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 8, a 80 metros

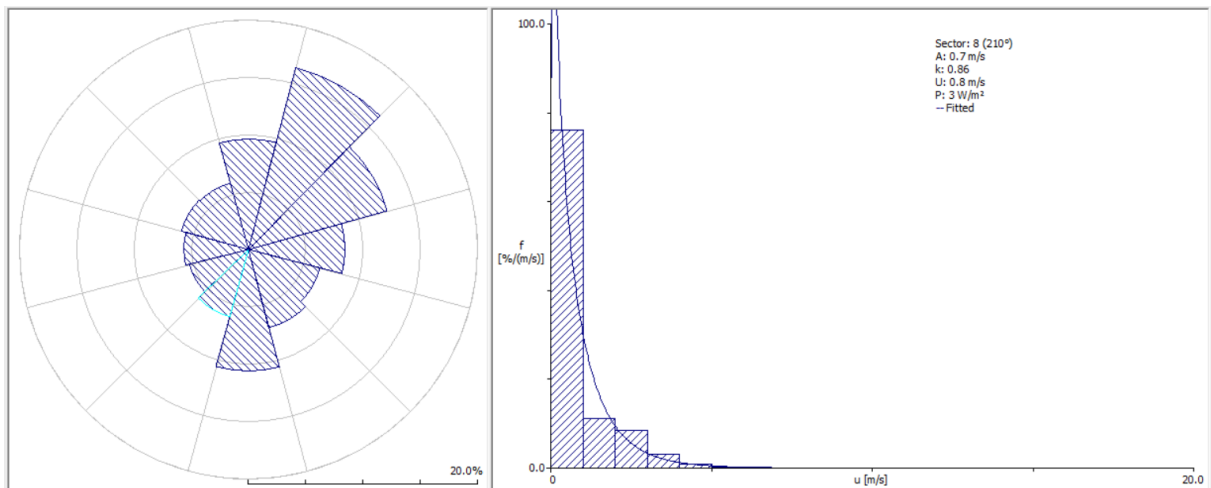




Figura 81
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 9, a 80 metros

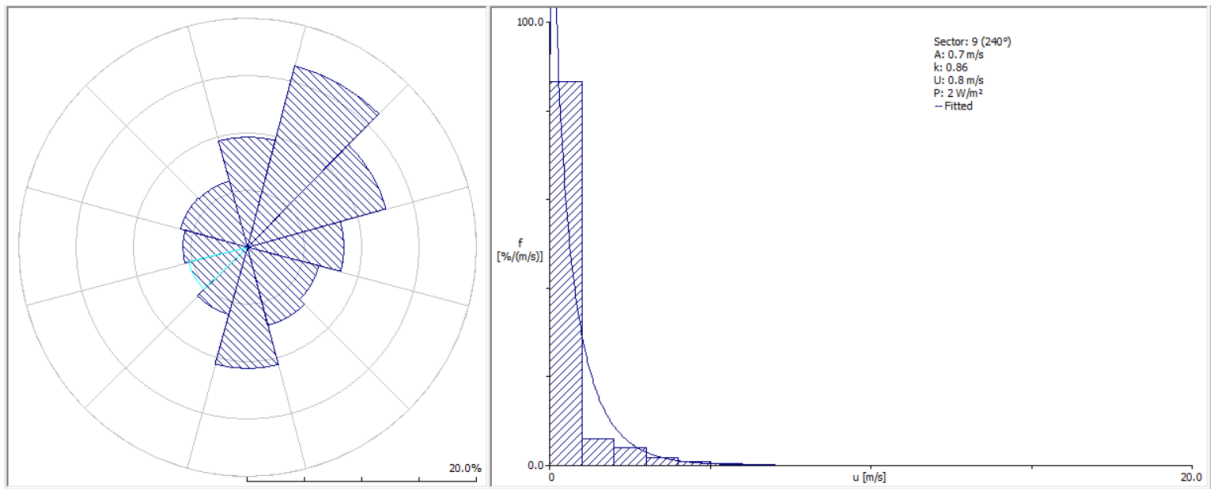


Figura 82
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 10, a 80 metros

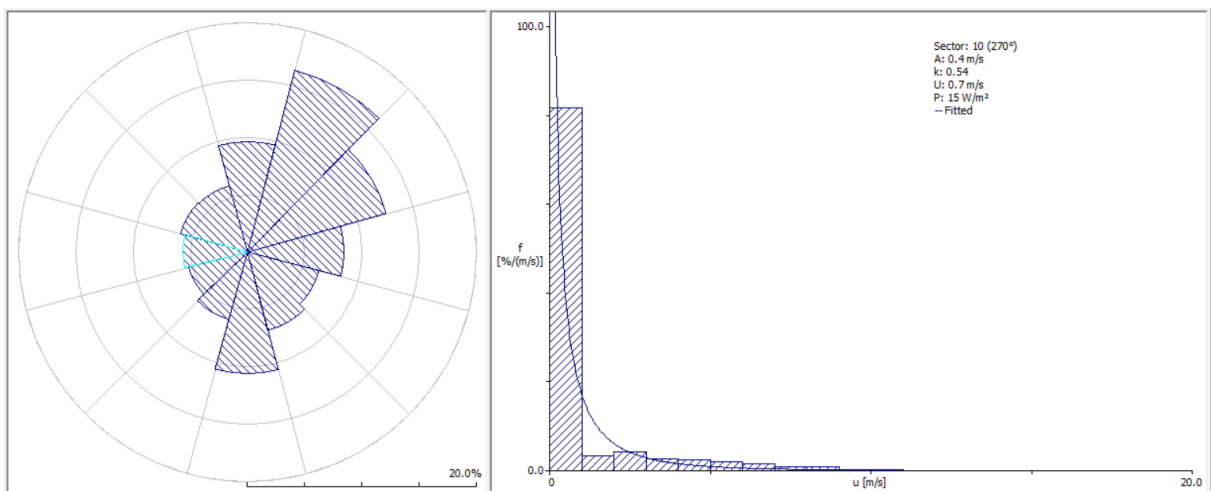


Figura 83
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 11, a 80 metros

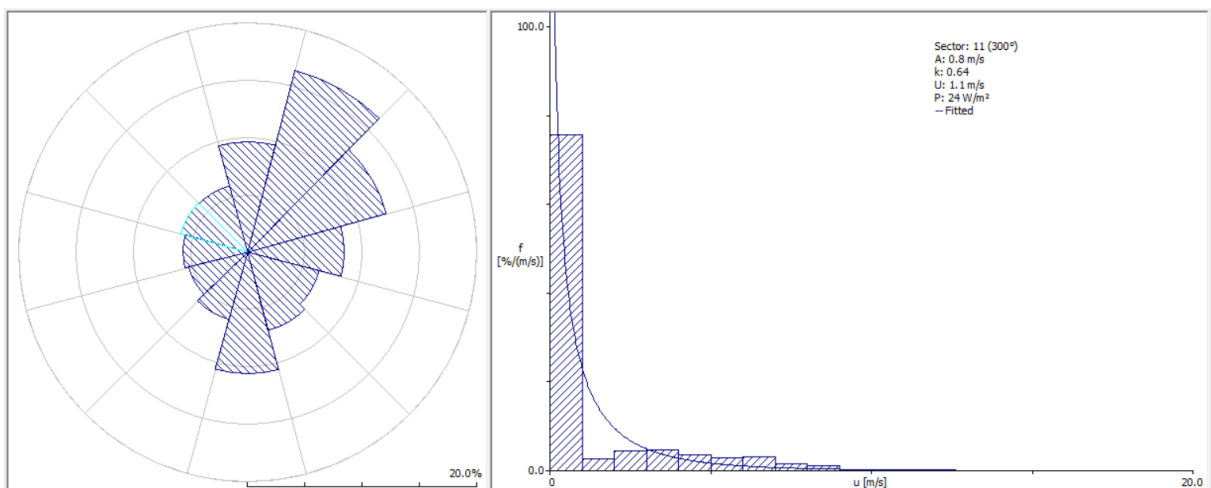




Figura 84
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 12, a 80 metros

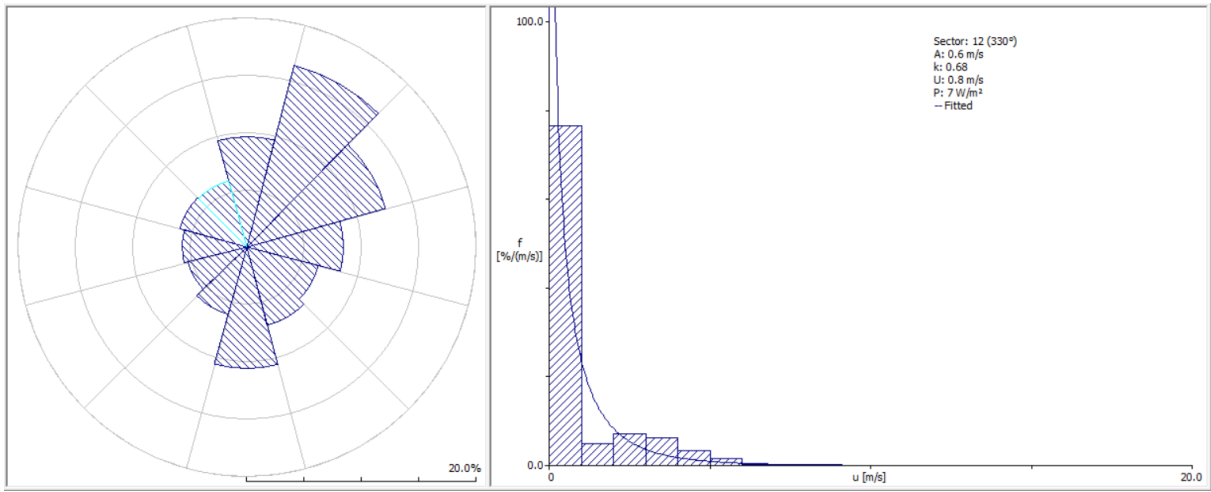


Figura 85
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 1, a 100 metros

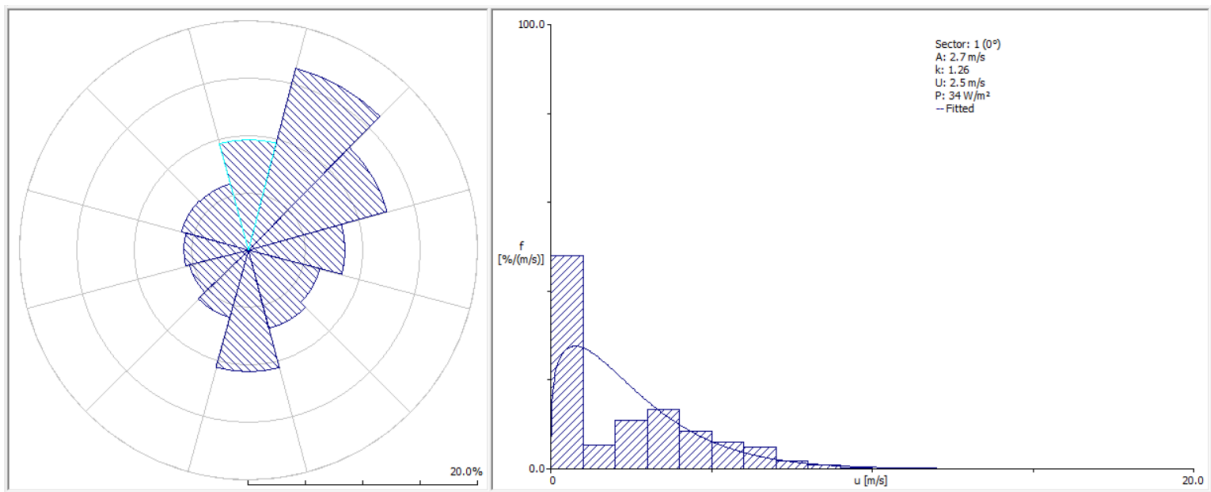


Figura 86
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 4, a 100 metros

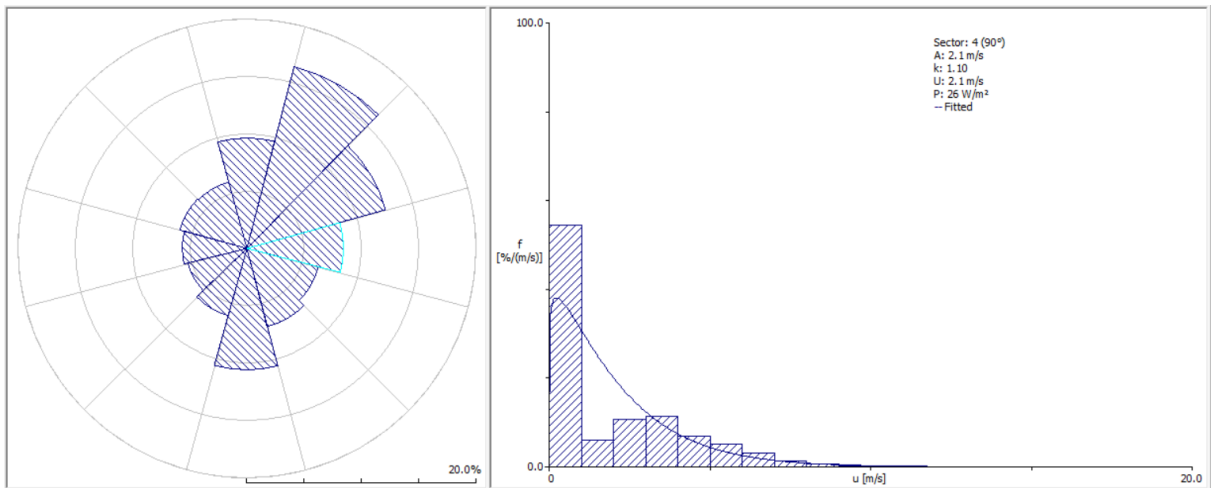




Figura 87
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 5, a 100 metros

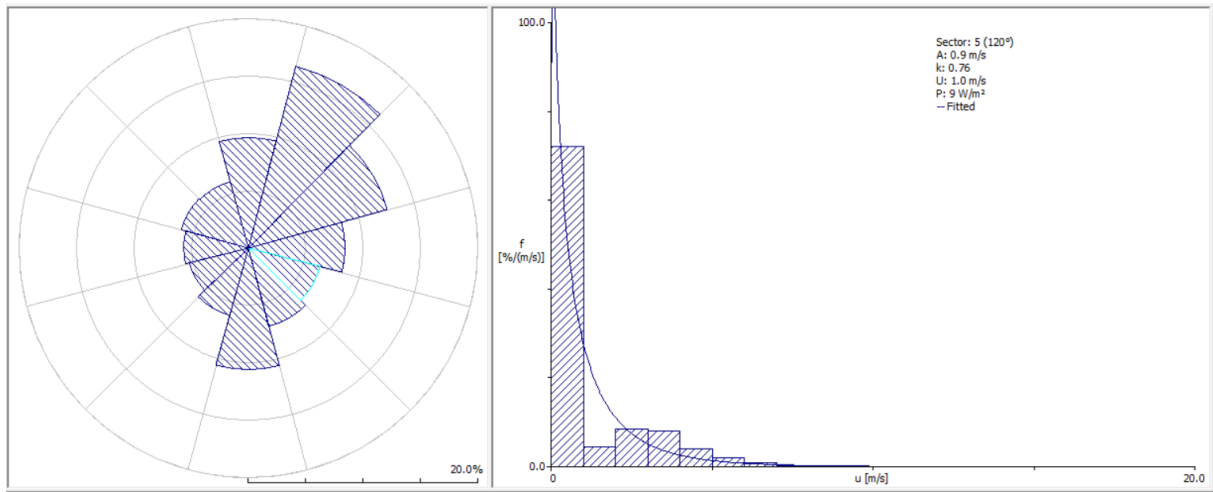


Figura 88
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 6, a 100 metros

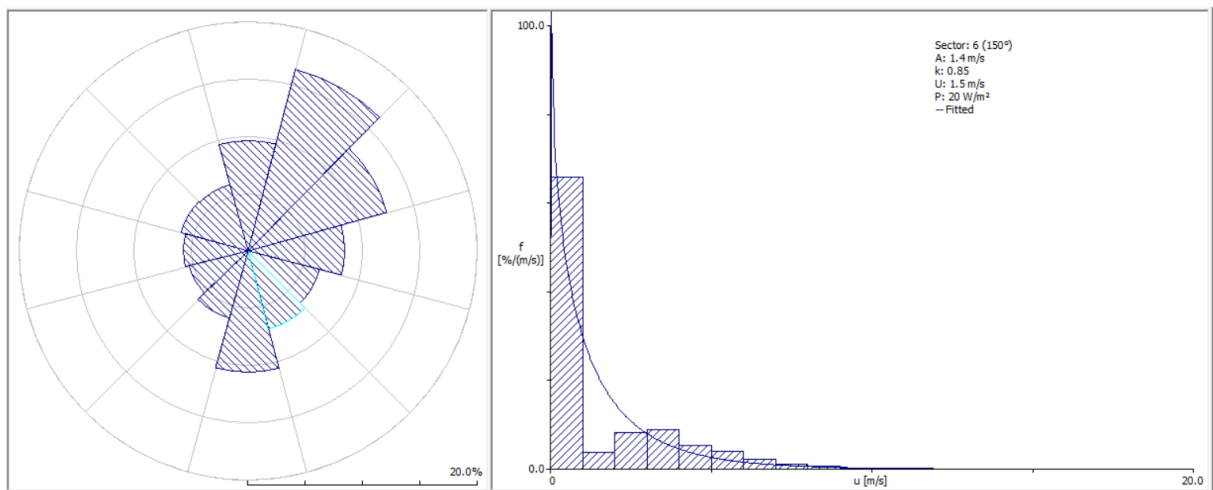


Figura 89
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 8, a 100 metros

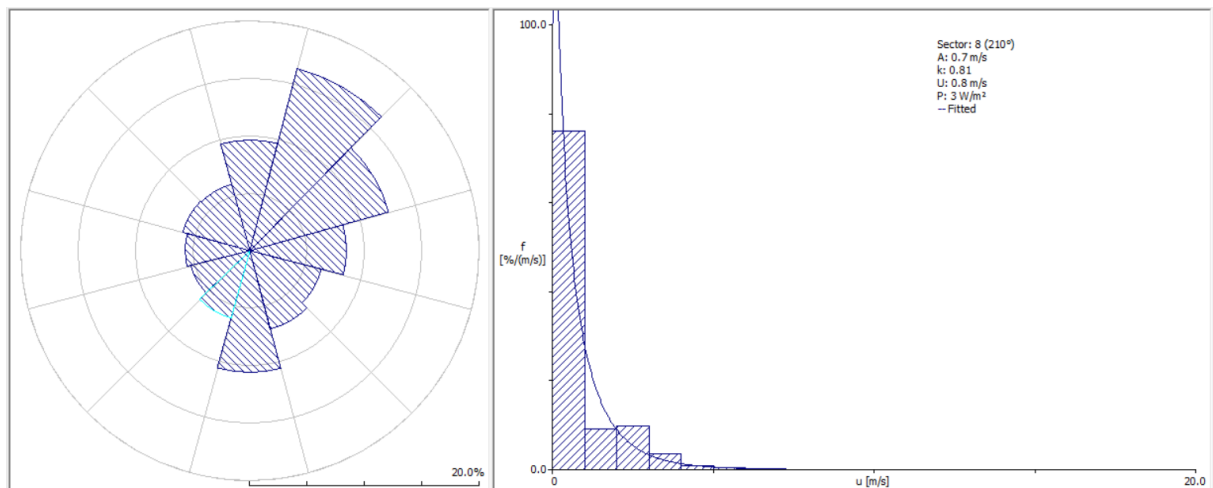




Figura 90
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 9, a 100 metros

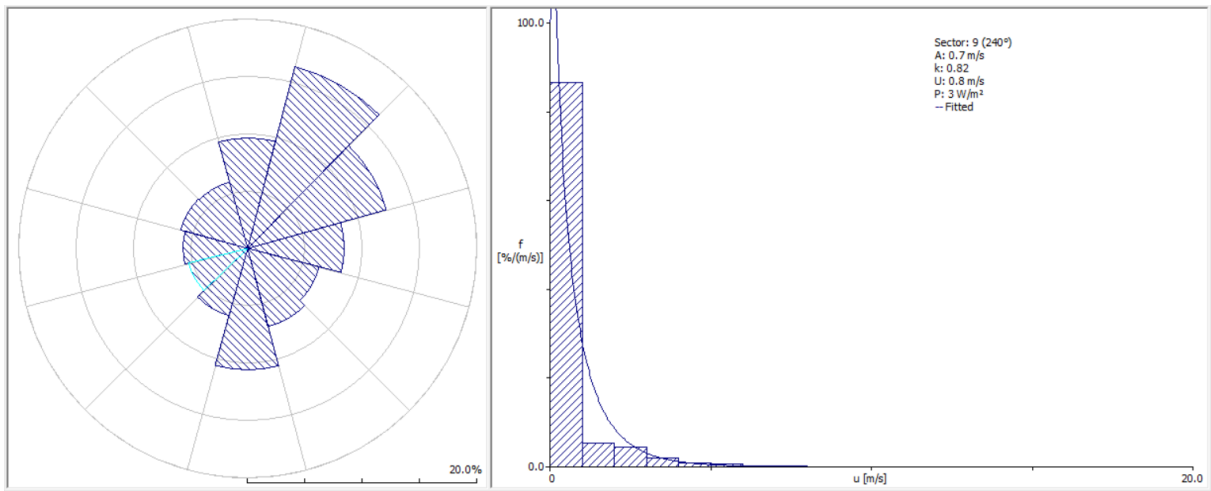


Figura 91
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 10, a 100 metros

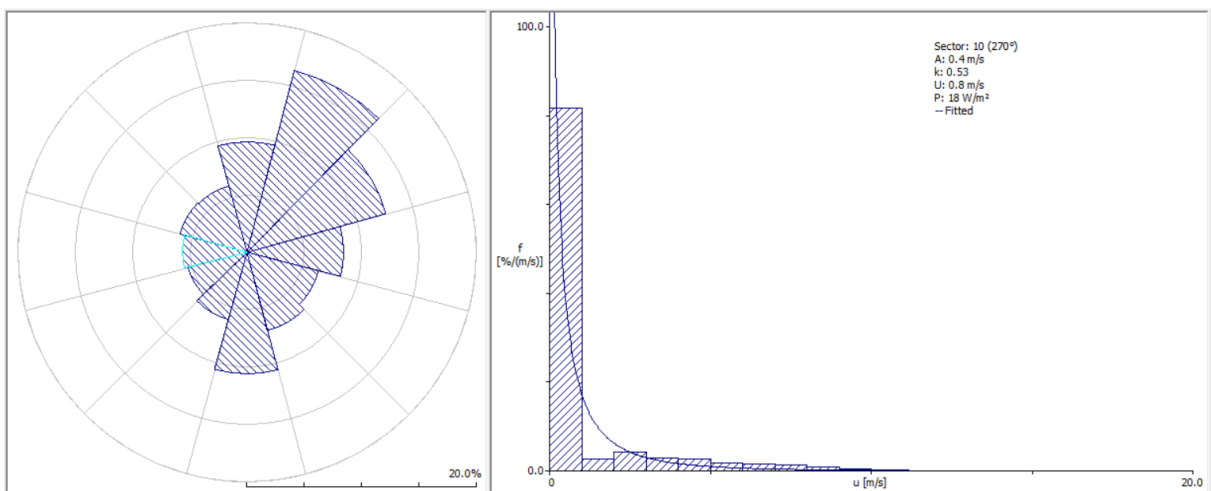


Figura 92
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 11, a 100 metros

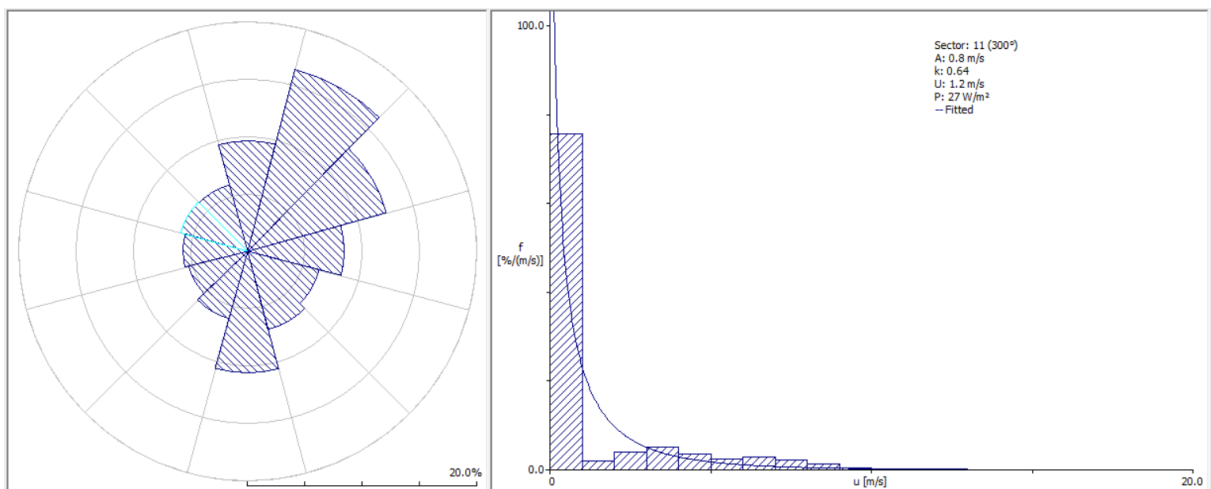
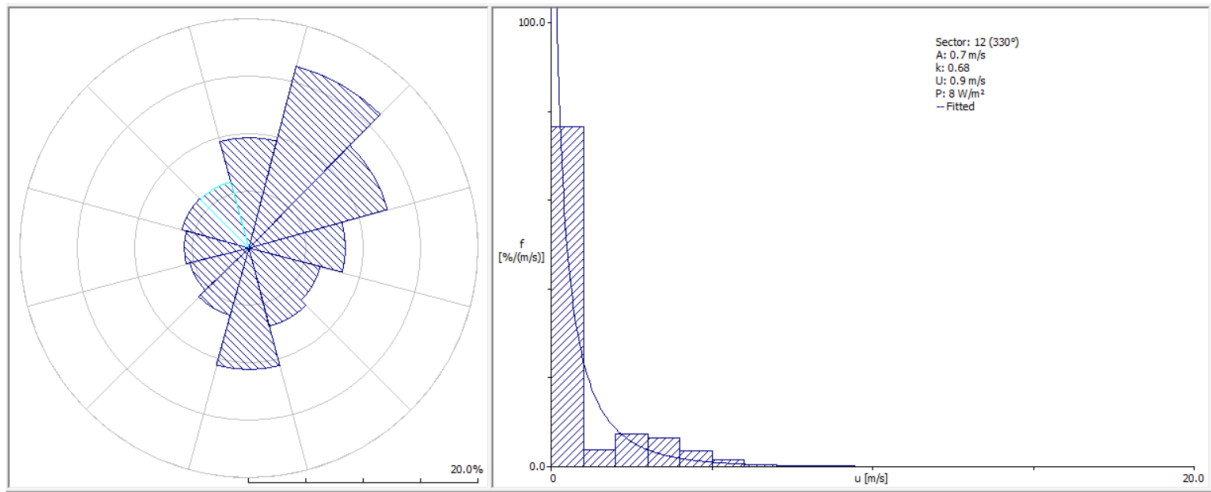




Figura 93
Rosa de Viento y Distribución de Weibull, sector 12, a 100 metros



Anexo D. Hoja de Cálculo elaborada para la presente investigación

Se adjunta enlace de acceso a la hoja de cálculo:

https://drive.google.com/drive/folders/1IaC7EX8XE1r624amzlxVw5DSBft7MGf?usp=share_link

Si no logra tener acceso al enlace, enviar una solicitud al correo
017100131b@uandina.edu.pe



Anexo E. Hojas técnicas de Turbinas Eólicas

ICEWIND: RW100 Wind turbine (turbina de eje vertical)



RW100 Wind turbine

EXTREMELY DURABLE
NO NEED TO FACE WIND
PRODUCTION IN LOW AND HIGH WIND
SILENT OPERATION
EASY TO INSTALL

Icewind designs and manufactures robust micro vertical-axis wind turbines to power communication towers, weather and seismic stations, emergency systems, lighting, and on-grid and off-grid lodgings. All products are tested in Iceland, one of the windiest places on earth.

www.icewind.is



RW100 Wind Turbine

RW VAWT are designed to operate in austere and remote environments for extended periods with little or no maintenance. They can provide renewable energy in both on-grid and off-grid applications. The Icewind power generating system reduce operational costs and increase backup power time.

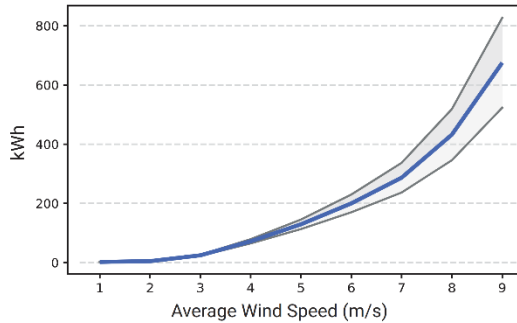
RW100 VAWT can be paired with solar, fossil fuel, or battery systems. It can also be configured to capture meteorological, seismic sensor data.

RW wind turbine can be mounted directly on a tower or set on a ground frame, or mobile tower. They are able to withstand wind speeds up to 135 mph (Category 4 Hurricane wind speeds).

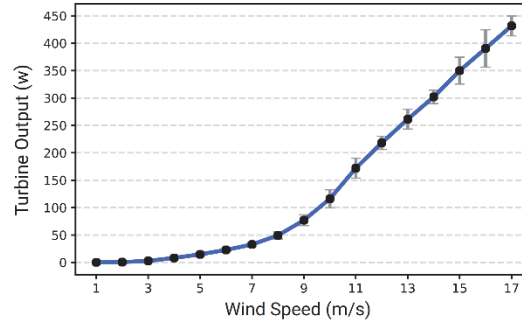


Survival speed	135 mph	60 m/s
Startup wind speed	4.5 mph	2 m/s
Cut in wind speed	5.5 mph	2.5 m/s
Rated power	100 W	
Max power	1500 W On-grid	
	800 W Off-grid	
Rated wind speed	22 mph	10 m/s
Noise level	< 30 dB	
Height	60 inch	1.5 m
Diameter	43 inch	1.1 m
Weight	138 lbs	63 kg
Generator	2 x 100 W AFPMG	
Number of blades	3 inner, 3 outer	
Blade material	GFRP, SS, AL	
Color	Gloss White, RAL 9016	
Electric system solutions	Grid Tied or Battery Charge	
Mounting options	Ground frame, Tower, Mobile frame	
Foundation Options	Pad, Non-Penetrating, Ballast pad	
Cold Climate Option	-45°C, Available on request	
Warranty	3 Years	

Annual RW100 Output



RW100 Power Curve



All rights reserved.

Trademarks mentioned in this document are the property of IceWind, its affiliates, or their respective owners.

Subject to changes and errors.

The information given in this document only contains general descriptions and/or performance features, which may not always specifically reflect those described, or which may undergo modification in the course of further development of the products. The requested performance features are binding only when they are expressly agreed upon in the concluded contract.

E : info@icewind.is

P : +354 861-2011

W : www.icewind.is

ICEWIND
EXTREME ENERGY SOLUTIONS

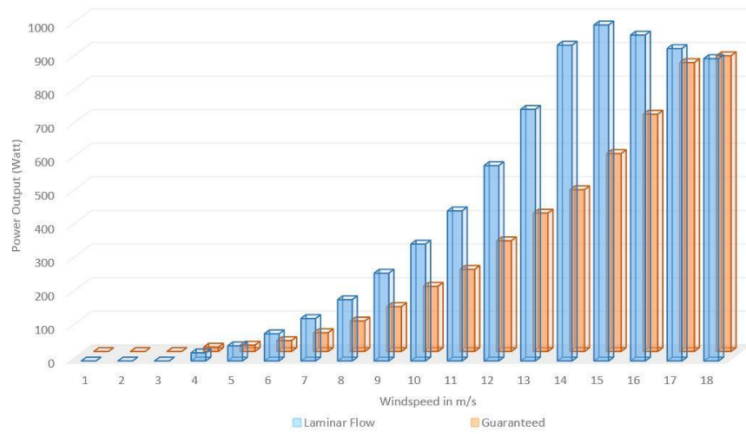


Sky Wind NG (turbina de eje horizontal)



„SkyWind has sent prices spiralling downwards“
Professional Journal ,Photovoltaik“

Power Performance Curve SkyWind NG



Power performance curve guaranteed for air density of 1,293kg/m³. Production may vary due to turbulence.

SkyWind NG - Quality since 2013

Rated Power	1	kW
Rotor Diameter	1,50	m
Swept Area	1,8	m ²
Start-up @	4	m/s
Rated Power @	14	m/s
Cut-out @	20	m/s
Rotor Material	Aerospace Aluminum	
Nacelle Material	Premium Steel	
Redundant Braking System	Included	
Output	220/230/110	VAC
Warranty	36	Month



Manufactured by:
SkyWind Energy GmbH
Bayerstrasse 3
30855 Langenhagen
Deutschland

Facebook: facebook.com/SkyWindEnergy/

Info@m.skywind.com
www.mskywind.com

Your Sales Partner:



SkyWind NG

Small Wind Turbine System





Unique Wind Turbine Design

Our SkyWind NG is the very first micro wind turbine designed with the same passion and expertise currently known only from large scale megawatt turbines. Key aspects are its high power and durability at comparatively small size and weight. Its patented all metal design provides unique strength and an unmatched service life. All components are prepared for quick installation. SkyWind turbines power appliances, telecommunication and homes all around the world.

Patented All-Metal Construction

Our micro turbine was designed using state of the art technologies like CFD's (computational fluid dynamics) and is manufactured with 6-axis CNC machining centers. While design and metalwork is done in Germany, the DC-machine is made in America and assembled with the turbine in the world reknown city of Hanover, Germany. Due to its outstanding aerodynamic performance the turbine generates only very low noise emissions and is allowed for German residential only areas. Efficient, powerful and reliable - since 2013.



SkyWind NG - Quality And Performance Guaranteed

From the islands of Japan or the deserts of Kuwait to the Mt. Everest - SkyWind NG micro wind turbine systems can be found most anywhere on the planet. The turbines patented all-metal construction, high power output and its durability, even in sandy conditions, are its signature features.

It is the swept area of under 2 m² and the maximum rooftop operating voltage of 60 V DC, that enable it to be used even in the residential areas of central europe without expensive certification. The guaranteed power curve, independently tested by Windtest Grevenbroich GmbH of Germany, and a grid inverter with integrated braking control and dumpload are unique in its class. Its compact design and low weight allow for easy world wide shipment by DHL/UPS parcel service - arriving at your project site within days.

By choosing SkyWind you decide for a well-matched wind turbine system that includes all basic components. The installation could not be easier as SkyWind can be fitted to most any 60 mm mast due to its low weight of only little more than 15 kg.

Our technology is patented: United States Patent #US 2012/0177502 A1

