

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



T E S I S

**Campo vectorial de la velocidad del viento para evaluar la dispersión del
material particulado PM10 en la ciudad de Cerro de Pasco**

Para optar el título profesional de:
Ingeniero Ambiental

Autor:

Bach. Fidel Gustavo PIO ARENAS

Asesor:

Mg. Jose Luis SOSA SANCHEZ

Cerro de Pasco – Perú – 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



T E S I S

**Campo vectorial de la velocidad del viento para evaluar la dispersión del
material particulado PM10 en la ciudad de Cerro de Pasco**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Rommel Luis LOPEZ ALVARADO
PRESIDENTE

Dr. Eleuterio Andrés ZAVALITA SANCHEZ
MIEMBRO

Dr. David Johnny CUYUBAMBA ZEVALLOS
MIEMBRO



Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión

Facultad de Ingeniería

Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 007-2026-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

“Campo vectorial de la velocidad del viento para evaluar la dispersión del material particulado PM10 en la ciudad de Cerro de Pasco”

Apellidos y nombres del tesista

Bach. Fidel Gustavo, PIO ARENAS

Apellidos y nombres del Asesor:

Mg. Jose Luis, SOSA SANCHEZ

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería Ambiental

Índice de Similitud

7 %

APROBADO

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes.

Cerro de Pasco, 16 de abril del 2026



Firmado digitalmente por PALOMINO
ISIDRO Ruben Edgar FAU
20154605046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 16.04.2026 15:23:58 -05:00

DEDICATORIA

Le dedico el resultado de este trabajo a mis familiares, por su paciencia y comprensión, los cuales fueron la motivación constante para alcanzar mis metas.

AGRADECIMIENTO

A mi asesor, por su contribución y recomendaciones sin los cuales este trabajo no podría haberse concluido, a todos mis docentes de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería por los aportes en la conclusión del doctorado.

RESUMEN

La ciudad de Cerro de Pasco presenta una problemática ambiental persistente asociada a la dispersión del material particulado PM₁₀, condicionada por la actividad minera, la remoción de suelos y una compleja topografía altoandina que, en interacción con las variables meteorológicas, afecta la calidad del aire y la salud de la población. Por ende, la investigación tuvo como objetivo determinar el campo vectorial de la velocidad del viento para evaluar la dispersión del material particulado PM₁₀. La metodología presenta un enfoque cuantitativo, tipo aplicada, con diseño no experimental y nivel descriptivo–analítico, utilizando datos secundarios provenientes de estaciones de vigilancia ambiental, análisis estadístico y modelamiento matemático del campo vectorial del viento mediante herramientas computacionales. Los resultados evidenciaron que la velocidad del viento osciló entre 0,0 y 3,4 m/s, predominando vientos del norte (N) y norte noreste (NNE), lo que favoreció el transporte direccional del PM₁₀ hacia zonas pobladas. Las concentraciones promedio mensuales de PM₁₀ variaron entre 11,0 µg/m³ y 64,4 µg/m³. El análisis vectorial mostró una relación significativa entre la magnitud y dirección del viento y la dispersión, confirmando que condiciones de ventolina y brisa ligera incrementan el alcance espacial del contaminante. Se concluye que el campo vectorial del viento constituye una herramienta técnica para evaluar la dispersión del PM₁₀ y apoyar la gestión de la calidad del aire en contextos urbanos de influencia minera.

Palabras Claves: campo vectorial, velocidad de viento, puntos de monitoreo, material particulado.

ABSTRACT

The city of Cerro de Pasco has a persistent environmental problem associated with the dispersion of PM₁₀ particulate matter, caused by mining activity, soil removal, and a complex high Andean topography which, in interaction with meteorological variables, affects air quality and the health of the population. Therefore, the objective of the research was to determine the vector field of wind speed to evaluate the dispersion of PM₁₀ particulate matter. The methodology presents a quantitative, applied approach, with a non-experimental design and a descriptive-analytical level, using secondary data from environmental monitoring stations, statistical analysis, and mathematical modeling of the wind vector field using computational tools. The results showed that wind speed ranged from 0.0 to 3.4 m/s, with prevailing winds from the north (N) and north-northeast (NNE), which favored the directional transport of PM₁₀ toward populated areas. Average monthly PM₁₀ concentrations ranged from 11.0 µg/m³ to 64.4 µg/m³. The vector analysis showed a significant relationship between wind speed and direction and dispersion, confirming that windy conditions and light breezes increase the spatial reach of the pollutant. It is concluded that the wind vector field is a technical tool for assessing PM₁₀ dispersion and supporting air quality management in urban contexts affected by mining.

Keywords: vector field, wind speed, monitoring points, particulate matter.

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica constituye uno de los principales problemas ambientales a escala global, debido a sus efectos adversos sobre la salud humana, los ecosistemas y la calidad de vida de las poblaciones urbanas. Entre los contaminantes más relevantes se encuentra el material particulado, particularmente aquel con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros (PM10), cuya capacidad de permanecer en suspensión y ser inhalado lo convierte en un factor de riesgo significativo para enfermedades respiratorias y cardiovasculares. La dinámica de dispersión del PM10 está estrechamente vinculada a variables meteorológicas, siendo el viento uno de los agentes físicos determinantes en su transporte, dilución y acumulación. Frente a esta problemática, el análisis del campo vectorial de la velocidad del viento se presenta como una herramienta para comprender los patrones espaciales y temporales de dispersión de contaminantes atmosféricos con condiciones geográficas y climáticas complejas.

En el ámbito nacional y local, ciudades con intensa actividad minera y topografía accidentada, como la ciudad de Cerro de Pasco, enfrentan una problemática ambiental persistente asociada a la calidad del aire. La presencia histórica de operaciones extractivas, la remoción constante de suelos y la cercanía de fuentes potenciales de emisión de partículas contribuyen a escenarios donde el material particulado puede ser fácilmente resuspendido y transportado por la acción del viento. Estas condiciones se ven acentuadas por factores propios de la región altoandina, como la altitud, las variaciones térmicas y los regímenes de viento característicos, que influyen directamente en la dispersión atmosférica del PM10. Sin embargo, a pesar de la existencia de monitoreos ambientales y reportes institucionales, persisten limitaciones en la comprensión integral de cómo el viento, representado mediante campos vectoriales, condiciona la distribución del material particulado en el espacio urbano.

Los estudios previos realizados en contextos similares han abordado, en su mayoría, la relación entre concentraciones de PM10 y variables meteorológicas de manera descriptiva o correlacional, sin profundizar en la representación espacial del viento como un fenómeno vectorial continuo. Esta aproximación parcial dificulta la identificación precisa de zonas de

mayor exposición y la evaluación del transporte direccional de contaminantes hacia áreas sensibles, como centros poblados, instituciones educativas o espacios recreativos. En el caso de la zona de estudio, la complejidad topográfica y la coexistencia de múltiples fuentes de emisión generan un escenario donde los enfoques convencionales resultan insuficientes, evidenciando un vacío de conocimiento en la aplicación del análisis vectorial del viento como herramienta para evaluar la dispersión del PM10.

En atención a esta problemática, la presente investigación se orienta a evaluar la dispersión del material particulado PM10 en la ciudad de Cerro de Pasco mediante el análisis del campo vectorial de la velocidad del viento, integrando información meteorológica, espacial y ambiental en un contexto urbano. El propósito del estudio es contribuir a una mejor comprensión del comportamiento del PM10 bajo la influencia del viento, permitiendo interpretar de forma más precisa los patrones de dispersión y su relación con las condiciones locales. De este modo se busca aportar una forma de analizar el flujo del viento empleando principios físicos que sirva como base para la gestión ambiental.

Motivo por el cual la presente tiene el propósito de determinar el “Campo vectorial de la velocidad del viento para evaluar la dispersión del material particulado PM10 en la ciudad de Cerro de Pasco”, a través de las mediciones de la dirección y velocidad del viento que realizó el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental en los años 2018 y 2019.

ÍNDICE

Página

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1.	Identificación y determinación del problema	1
1.2.	Delimitación de la investigación	2
1.3.	Formulación del problema	3
1.3.1.	Problema general	3
1.3.2.	Problemas específicos	3
1.4.	Formulación de Objetivos	4
1.4.1.	Objetivo general	4
1.4.2.	Objetivos específicos	4
1.5.	Justificación de la investigación	4
1.6.	Limitaciones de la investigación.....	6

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1.	Antecedentes de estudio	7
2.1.1.	Antecedentes internacionales	7
2.1.2.	Antecedentes nacionales	14
2.1.3.	Antecedentes Locales	16

2.2.	Bases teóricas- científicas	19
2.2.1.	Evaluación de la calidad del aire por pm-10	19
2.2.2.	Cálculo de concentraciones	20
2.2.3.	Decreto Supremo N°003-2017-MINAM que establece los valores de calidad del aire	22
2.3.	Definición de términos básicos	24
2.4.	Formulación de hipótesis	25
2.4.1.	Hipótesis general	25
2.4.2.	Hipótesis específicas	25
2.5.	Identificación de las variables	26
2.5.1.	Variable independiente	26
2.5.2.	Variable dependiente	26
2.6.	Definición Operacional de variables e indicadores	26

CAPITULO III

METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION

3.1.	Tipo de investigación	28
3.2.	Nivel de Investigación	28
3.3.	Métodos de investigación	29
3.4.	Diseño de investigación	29
3.5.	Población y muestra	29
3.5.1.	Población	29
3.5.2.	Muestra	29
3.5.3.	Trabajo de campo	30
3.5.4.	Trabajo de gabinete	31
3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	31
3.5.5.	Métodos y técnicas de recolección de datos	31
3.5.6.	Selección y toma de muestra	32
3.7.	Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.	33

3.8.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos	34
3.9.	Tratamiento estadístico	34
3.10.	Orientación ética filosófica y epistémica	35

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Descripción del trabajo de campo.....	37
4.2.	Presentación, análisis e interpretación de resultados.	46
4.3.	Prueba de Hipótesis	55
4.4.	Discusión de resultados.....	57

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Coordenadas Geográficas.....	3
Tabla 2 Matriz de operacionalización de las variables.....	26
Tabla 3 Puntos de monitoreo	30
Tabla 4. Ficha de observación	32
Tabla 6 Estadística descriptiva de la muestra	35
Tabla 6 Dirección y magnitud de viento.....	41
Tabla 7 Parámetros meteorológicos.....	44
Tabla 8 Comportamiento mensual de los parámetros del campo vectorial.....	46
Tabla 9 Ubicación y dirección del viento	50
Tabla 10 Evaluación de la capacidad de dispersión atmosférica del PM10.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Ubicación de la zona de estudio, Centro Poblado de Champamarca	3
Figura 2 Mapa de la toma de los puntos	39
Figura 3 Punto de monitoreo de PM10 la cureña	40
Figura 4 Punto de monitoreo de PM10 en el C.P Paragsha	40
Figura 5 Rosa de viento en el distrito de Simón Bolívar	42
Figura 6 Mapa que determina la topografía por medio de las curvas de nivel y el relieve ...	43
Figura 7 Fuentes de contaminación por material particulado C.P Champamarca	45
Figura 8 Fuentes de contaminación por material particulado C.P Paragsha	46
Figura 9 Comportamiento histórico de PM10 en la estación CA-SB-02.....	48
Figura 10 PM10 en la estación CA-SB-02.....	48
Figura 11 Comportamiento histórico de PM10 en la estación CA-SB-01.....	49
Figura 12 Rosas de viento mensual en la estación CA-SB-01	50
Figura 13 Plano UTM XY	53
Figura 14 Campo vectorial del material particulado PM10	53
Figura 15 Modelo digital de elevación de la zona de estudio.....	54
Figura 16 Mapa de velocidad y dirección de viento	55

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1. Identificación y determinación del problema

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud las muertes por contaminación se atribuyen al 58% de personas que han sido expuestas en zonas que han superado los límites permitidos como establece el Decreto Supremo N°003-2017-MINAM en el Perú la creciente industria parque automotor genera material particulado y que entre el 70 y el 80% provienen de esta Fuente y si tiene los registros que en promedio 36 personas pierden la vida por la polución (infobae, 2023).

La organización de evaluación y fiscalización ambiental en el año 2016 da a conocer acciones realizadas en el marco de la mesa de desarrollo Simón Bolívar en la que realizó los intereses de calidad de aire en los centros poblados Champamarca, Quiulacocha y Paragsha en la que se analizaron los parámetros del material particulado con diámetro menor a 10 micras, asimismo el material particulado menor a 2.5 micras en la que menciona que no se han superado los estándares de calidad ambiental el estudio abarcó las zonas que se encuentran cerca a los componentes de mina stop bailes los que podrían ser Fuentes potenciales de material particulado y metales en el aire.

Así mismo se presume las posibles fuentes de contaminación que serían los suelos ya que se han hallado concentraciones de metales pesados por la actividad de

remoción traslado y cómo consecuencia del viento pueden ser suspendidos en el aire por otro lado se observó el flujo vehicular en las áreas de estudio con una baja frecuencia las estaciones de vigilancia ambiental se ubicaron en la calle Huancavelica centro poblado Paragsha y en la dirección del Jirón Quilacocha en el centro poblado de Champamarca, en este caso se evalúa el comportamiento de la referencia ambiental en el aire en la zona adyacente a las operaciones del botadero por parte de los activos Mineros de junio a octubre del 2018.

1.2. Delimitación de la investigación

La presente investigación se delimita según:

El contexto:

La presente tiene como propósito determinar el efecto del viento en el comportamiento del material particulado pm10, haciendo uso de los datos generados por las estaciones de vigilancia ubicado en los centros poblados de Champamarca y Paragsha

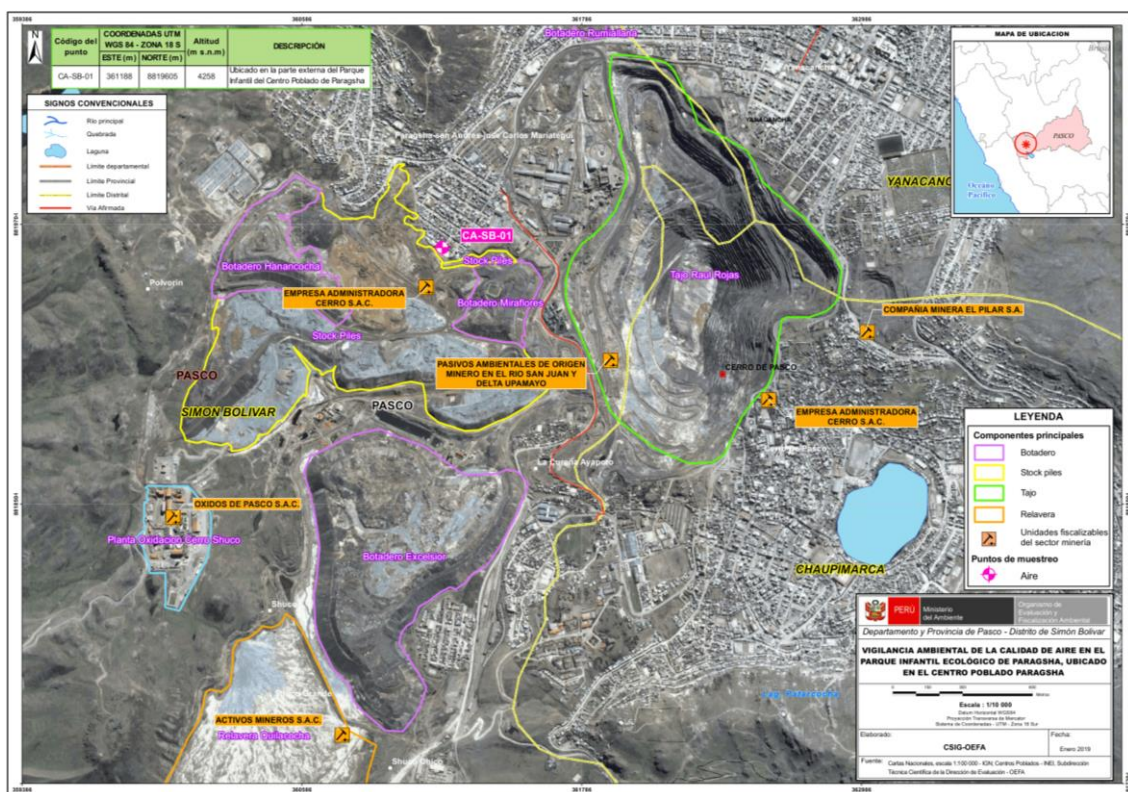
El espacio:

Espacio de la investigación Abarca el ámbito de la influencia en la institución educativa 34037 ubicado en el Jirón Quiulacocha adyacente a las operaciones del botadero Excelsior de la empresa Activos Mineros SAC, cómo el parque infantil ubicado en la calle Huancavelica S/N en el centro poblado Paragsha adyacente a las operaciones de óxidos Pasco SAC, y empresa Administradora Cerro SAC.

Tiempo:

La investigación se inicia en el mes de mayo y tiene como fin en el mes de julio del 2023.

Figura 1 *Ubicación de la zona de estudio, Centro Poblado de Champamarca*



I.E N° 34037 Ubicado en el Jr. Quiulacocha S/N AA. HH Champamarca,
Distrito de Simón Bolívar, Provincia y Departamento de Pasco

Tabla 1 *Coordenadas Geográficas*

COORDENADAS DE UBICACIÓN
NORTE: 8818045 m S
ESTE: 361129 m E

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cuál es el “Campo vectorial de la velocidad del viento para evaluar la dispersión del material particulado PM₁₀ en la ciudad de Cerro de Pasco”?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la dirección y magnitud del viento en la ciudad de Cerro de Pasco?
- ¿Cuál es la topografía de la ciudad de Cerro de Pasco?

- c. ¿Cuáles son las condiciones meteorológicas y fuentes de contaminación por material particulado en la ciudad de Cerro de Pasco?

1.4. Formulación de Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar el “Campo vectorial de la velocidad del viento para evaluar la dispersión del material particulado PM10 en la ciudad de Cerro de Pasco”

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Determinar la dirección y magnitud del viento en la ciudad de Cerro de Pasco
- b. Determinar la topografía de la ciudad de Cerro de Pasco
- c. Determinar las condiciones meteorológicas y fuentes de contaminación por material particulado en la ciudad de Cerro de Pasco

1.5. Justificación de la investigación

La justificación teórica para el estudio del campo vectorial de la velocidad del viento en relación con la dispersión del material particulado PM10 radica en la necesidad de comprender y predecir con precisión cómo las partículas finas suspendidas en el aire se dispersan en la atmósfera. Dado que las partículas PM10 son un riesgo para la salud humana y pueden tener impactos ambientales negativos, es fundamental determinar cómo se distribuyen en el entorno. El campo vectorial del viento proporciona la base teórica para modelar y evaluar la dispersión de PM10, lo que a su vez es esencial para la formulación de políticas de calidad del aire, la gestión de la contaminación y la protección de la salud pública, al permitir identificar áreas críticas y tomar medidas adecuadas para mitigar los riesgos asociados a estas partículas.

El estudio del campo vectorial de la velocidad del viento en relación con la dispersión del material particulado PM10 es esencial desde una perspectiva práctica, ya que permite comprender y predecir cómo se propagan y concentran las partículas contaminantes en la atmósfera. Esta información es fundamental para la toma de

decisiones en la gestión de la calidad del aire, la planificación urbana y la protección de la salud pública, ya que contribuye a identificar áreas críticas de exposición, diseñar estrategias de control de la contaminación, evaluar el cumplimiento de normativas ambientales y responder eficazmente a situaciones de mala calidad del aire, lo que a su vez puede reducir los impactos negativos en la salud y el medio ambiente.

La justificación social del estudio del campo vectorial de la velocidad del viento en relación con la dispersión del material particulado PM10 radica en la protección de la salud pública y la mejora de la calidad de vida de las comunidades. Estos estudios son esenciales para comprender cómo los contaminantes atmosféricos, como el PM10, se distribuyen en el entorno, lo que permite identificar las áreas más afectadas por la contaminación del aire. Esto, a su vez, respalda la toma de decisiones informadas en la formulación de políticas ambientales, la implementación de medidas de control de la contaminación y la prevención de problemas de salud relacionados con la exposición a partículas contaminantes, garantizando un entorno más saludable y sostenible para la sociedad.

Importancia y alcances de la investigación

Importancia

El estudio del campo vectorial de la velocidad del viento en relación con la dispersión del material particulado PM10 es de vital importancia para comprender y mitigar los impactos ambientales y para proteger la salud humana. El viento desempeña un papel crucial en la dispersión de partículas PM10 en la atmósfera, determinando cómo estas partículas se transportan y se distribuyen en el entorno. Esto afecta directamente la calidad del aire en una región, ya que las partículas PM10 pueden tener efectos perjudiciales en la salud respiratoria cuando se inhalan. Comprender los patrones de viento y su influencia en la dispersión del PM10 permite a las autoridades y científicos tomar medidas efectivas para controlar la contaminación del aire, diseñar estrategias de gestión de la calidad del aire y reducir los riesgos para la salud pública en áreas urbanas e industriales.

Alcances

El alcance del estudio del campo vectorial de la velocidad del viento en relación con la dispersión del material particulado PM10 es amplio y fundamental en la comprensión y mitigación de la contaminación atmosférica. Este tipo de investigación aborda la necesidad de evaluar cómo las partículas PM10 se dispersan en la atmósfera, considerando factores como la velocidad y dirección del viento, la topografía local, las condiciones meteorológicas y la interacción entre las partículas y la atmósfera. El objetivo principal es proporcionar información crucial para la gestión de la calidad del aire, la identificación de zonas de riesgo y la formulación de políticas ambientales efectivas. Además, estos estudios son esenciales para evaluar el impacto en la salud pública y el medio ambiente, ya que la exposición a PM10 está relacionada con problemas respiratorios y otros efectos adversos.

1.6. Limitaciones de la investigación

Las limitaciones en el estudio del campo vectorial de la velocidad del viento en relación con la dispersión del material particulado PM10 incluyen la complejidad de los patrones atmosféricos, que son altamente variables en tiempo y espacio, lo que hace que las predicciones sean inherentemente inciertas. Además, la calidad de los datos meteorológicos y de calidad del aire disponibles puede afectar directamente la precisión de los modelos, y la falta de mediciones en áreas rurales o en países en desarrollo puede dificultar la evaluación de la dispersión del PM10 en dichas regiones. Además, la interacción compleja entre las partículas, la atmósfera y otros contaminantes complica aún más la modelización y la predicción precisas de la dispersión de PM10, lo que requiere constantes investigaciones y mejoras en las técnicas de evaluación y monitoreo.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de estudio

2.1.1. Antecedentes internacionales

Zhihao et al. (2025), en su estudio titulado “Simulations of near-source wind development and pollution dispersion over complex terrain under different thermal conditions”), abordan la problemática de modelar con precisión la dispersión de contaminantes como el SO_2 en terrenos complejos, lo cual es relevante para contextos similares en los que se desea evaluar la dispersión de PM_{10} . La investigación se enmarca en la necesidad de contar con modelos fiables que simulen el desarrollo del viento y la dispersión de contaminantes en condiciones atmosféricas variadas, especialmente en zonas donde el relieve y el uso del suelo dificultan las predicciones. El objetivo fue desarrollar un modelo CFD (dinámica de fluidos computacional) basado en las ecuaciones RANS con el modelo de turbulencia $k-\epsilon$, adaptado para flujos compresibles y condiciones térmicas diversas. Para ello, se implementó una malla computacional sobre un dominio de 6.4 x 6.4 km con datos meteorológicos reales y se validaron las predicciones del modelo con anemómetros instalados en campo y mediciones de concentraciones de SO_2 . Los resultados mostraron una buena correspondencia con los datos medidos, especialmente bajo condiciones térmicas neutrales y estables. Se concluyó que las características del terreno, la rugosidad del

suelo y la temperatura de salida de las fuentes emisoras influyen significativamente en la dispersión de contaminantes, por lo que su inclusión en los modelos es crucial para obtener simulaciones precisas.

El estudio desarrollado por Cichowicz, et al. (2020), titulado “The effect of meteorological factors on PM10 concentrations in air in the winter season in the city of Zabrze, Poland”, abordan una problemática ambiental relevante: la elevada concentración de material particulado PM_{10} durante el invierno, influenciada por las condiciones meteorológicas locales. El objetivo de la investigación fue identificar cómo la velocidad del viento, la dirección, la temperatura, la humedad y la presión atmosférica afectan las concentraciones de PM_{10} en una zona urbana del sur de Polonia con alta densidad poblacional e industrial. La metodología consistió en la recopilación de datos horarios de calidad del aire y condiciones meteorológicas durante los meses de invierno, los cuales fueron analizados mediante estadística descriptiva y análisis de correlación. Entre los resultados más relevantes, se identificó que la baja velocidad del viento y la presencia de fenómenos de inversión térmica favorecen la acumulación de PM_{10} , mientras que una mayor velocidad del viento ayuda a su dispersión. Se concluyó que las condiciones meteorológicas, en particular la velocidad del viento, son factores determinantes en la variabilidad temporal del PM_{10} , lo que permite considerar el campo vectorial del viento como un elemento clave en los modelos predictivos de dispersión atmosférica.

El estudio realizado por Lee et al. (2025), titulado “Integrating CFD Simulation and Machine Learning to Analyze Fine Dust Dispersion Characteristics in Densely Built Urban Environments”, se centran en la problemática de la contaminación del aire por partículas finas ($PM_{2.5}$) en zonas urbanas densamente edificadas, donde la ventilación natural se ve limitada por la configuración del entorno construido. El objetivo fue analizar las características de dispersión de las partículas en función de la morfología urbana y las condiciones del viento, mediante la integración de simulaciones CFD

(Computational Fluid Dynamics) y modelos de aprendizaje automático (machine learning). La metodología incluyó el uso de geometrías tridimensionales del área urbana, la simulación de distintos escenarios de velocidad y dirección del viento, y el entrenamiento de modelos predictivos para evaluar la dispersión de contaminantes. Los resultados demostraron que ciertos diseños urbanos generan acumulaciones significativas de $PM_{2.5}$, mientras que otros favorecen la dispersión debido a corredores de viento naturales. Se concluyó que el análisis conjunto del campo vectorial del viento y la morfología urbana es esencial para entender los patrones de concentración de partículas contaminantes, lo cual ofrece una herramienta útil para el diseño de ciudades sostenibles y saludables.

Adly y Saleh (2025) en su investigación titulado “Assessment of PM_{10} and $PM_{2.5}$ Concentrations and Their Relation to Meteorological Parameters at Three Sites in Makkah over the 2020–2024 Period”, analizan la influencia de factores meteorológicos en las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ en tres estaciones de monitoreo ubicadas en Makkah, Arabia Saudita, durante un periodo de cinco años. La investigación responde a la problemática del aumento sostenido de partículas contaminantes en entornos urbanos con intensa actividad humana, influida por fenómenos atmosféricos que afectan su dispersión. El objetivo fue evaluar la variabilidad estacional de PM_{10} y $PM_{2.5}$ y su correlación con variables como la velocidad del viento, la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar. La metodología consistió en el análisis estadístico de datos diarios de calidad del aire y condiciones meteorológicas, aplicando modelos de regresión para identificar relaciones significativas. Los resultados indicaron que las concentraciones de PM_{10} fueron mayores en invierno, coincidiendo con velocidades de viento reducidas, lo cual limita su dispersión. Asimismo, se identificaron correlaciones negativas entre velocidad del viento y niveles de partículas, lo que reafirma el rol de los campos vectoriales del viento en la distribución de contaminantes. Se concluyó que la

integración de variables meteorológicas en el monitoreo y predicción de PM es fundamental para la gestión ambiental urbana.

El estudio realizado por Linda et al. (2025), titulado “Modeling Wind-Induced Resuspension of PM₁₀ in Urban Street Canyons: A CFD Study”, abordan la problemática de la resuspensión del material particulado PM₁₀ en cañones urbanos, fenómeno que incrementa significativamente la concentración de contaminantes en ciudades con alta densidad de tráfico y edificaciones cerradas. El objetivo de la investigación fue simular mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) la interacción entre el flujo del viento y el polvo sedimentado en calles estrechas, con el fin de identificar condiciones umbral de velocidad del viento que generan resuspensión. La metodología incluyó la implementación de modelos CFD tridimensionales con condiciones de contorno realistas, evaluando escenarios con distintas velocidades del viento. Los resultados mostraron que una velocidad umbral de 8.75 m/s es suficiente para iniciar la resuspensión significativa de PM₁₀ en entornos urbanos. Además, se determinó que las configuraciones urbanas, como la altura de los edificios y el ancho de las calles, influyen directamente en la intensidad de la resuspensión. En conclusión, el estudio evidenció que el campo vectorial del viento no solo es determinante para la dispersión de contaminantes, sino también para su reintroducción al aire desde superficies contaminadas, lo que plantea un desafío para las estrategias de control de la calidad del aire.

Jenkins et al. (2022) en su estudio titulado “*WRF-CHEM simulations of unhealthy PM₁₀ concentrations during four dust events in Senegal*”, desarrollado en un contexto regional marcado por frecuentes intrusiones de polvo sahariano, que constituyen una realidad problemática debido a episodios recurrentes de mala calidad del aire y riesgos significativos para la salud pública en África occidental. El objetivo principal fue simular y analizar concentraciones no saludables de PM₁₀ durante cuatro eventos intensos de tormentas de polvo en Senegal, evaluando su origen, transporte y persistencia atmosférica. La metodología empleada fue de enfoque cuantitativo y

nivel explicativo, utilizando el modelo acoplado WRF-CHEM para representar procesos meteorológicos y químicos, incorporando inventarios de emisiones naturales de polvo, datos satelitales MODIS y validación con estaciones de monitoreo en superficie. Los resultados evidenciaron concentraciones de PM₁₀ que superaron ampliamente los umbrales de la Organización Mundial de la Salud, con valores diarios mayores a 300 µg/m³, asociados a fuertes vientos y condiciones sinópticas favorables al transporte de polvo a larga distancia. En conclusión, el estudio sugiere que la modelación integrada atmosférica debería emplearse de manera sistemática para sistemas de alerta temprana, planificación sanitaria y gestión ambiental, demostrando la utilidad del WRF-CHEM para anticipar episodios críticos de contaminación por PM₁₀ en regiones vulnerables.

García y Swayne (1997) en su investigación titulado “*Monitoreo de material particulado en emisiones*”, desarrollado en el contexto de la regulación ambiental peruana, donde las actividades de extracción, fundición y refinación de minerales están obligadas a controlar sus emisiones atmosféricas, constituyendo una realidad problemática por la presencia de material particulado y gases tóxicos que afectan la salud humana y el entorno. El objetivo del estudio fue describir y sistematizar los procedimientos técnicos para el monitoreo del material particulado en emisiones, diferenciando claramente entre el control de inmisiones y emisiones en chimeneas industriales. La metodología fue de enfoque técnico–aplicado, basada en normas internacionales ASTM y JIS, empleando muestreo isocinético mediante trenes de muestreo, filtros de fibra de vidrio, tubos Pitot y cálculos físicos para determinar la concentración de partículas PM₁₀ en condiciones normales. Los resultados evidencian que un muestreo incorrecto puede generar errores significativos en la cuantificación del contaminante, por lo que el control riguroso de la velocidad, temperatura y caudal del gas resulta determinante. En conclusión, el estudio sugiere que los programas de monitoreo deberían implementarse con criterios técnicos estandarizados y personal capacitado, consolidándose como una herramienta

fundamental para la fiscalización ambiental y la toma de decisiones en la gestión de la calidad del aire industrial.

Fernández-Pacheco et al. (2023) en su investigación titulado “*CFD model to study PM10 dispersion in large-scale open spaces*”, desarrollado en un contexto de creciente preocupación por la contaminación atmosférica en áreas urbanas e industriales extensas, donde los sistemas tradicionales de monitoreo puntual resultan insuficientes para describir la variabilidad espacial de los contaminantes, constituyendo una realidad problemática para la gestión ambiental y la salud pública. El objetivo fue desarrollar y validar un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) capaz de simular la dispersión del PM10 en espacios abiertos de gran escala, tomando como caso de estudio la ciudad de Gijón, España. La metodología empleada fue de enfoque cuantitativo y nivel explicativo, integrando un dominio tridimensional de $12 \times 18 \text{ km}^2$, datos topográficos LIDAR, condiciones meteorológicas reales y un modelo multifásico euleriano, con validación mediante pruebas en túnel de viento. Los resultados evidenciaron que la topografía y la dirección del viento influyen significativamente en la distribución espacial del PM10, alcanzándose concentraciones simuladas del mismo orden de magnitud que las observadas en estaciones de monitoreo. En conclusión, el estudio sugiere que el uso de modelos CFD debería consolidarse como una herramienta complementaria a los modelos gaussianos, permitiendo evaluar escenarios y medidas correctivas para mejorar la calidad del aire en entornos complejos.

Zhou et al. (2023) en su estudio titulado “*Dust diffusion in large-scale urban construction combining WRF and CALPUFF model—take Xiamen as an example*”, desarrollado en un contexto de rápida urbanización en ciudades chinas, donde la coexistencia simultánea de miles de obras de construcción constituye una realidad problemática debido a la generación masiva de polvo y material particulado PM10, con impactos directos sobre la calidad del aire y la salud humana. El objetivo fue analizar la ley de difusión del polvo generado exclusivamente por actividades de

construcción a gran escala, simulando su distribución espacial y temporal en la ciudad de Xiamen. La metodología empleada fue de enfoque cuantitativo y nivel explicativo, integrando el modelo meteorológico WRF con el modelo de dispersión CALPUFF, utilizando inventarios de emisiones basados en factores oficiales y validación mediante datos de estaciones de monitoreo. Los resultados evidenciaron que el PM10 proveniente de la construcción puede aportar entre 15 % y 30 % de la carga total de aerosoles urbanos, con concentraciones críticas en periodos de baja ventilación atmosférica y convergencia de vientos. En conclusión, el estudio sugiere que la gestión urbana debería incorporar modelos acoplados WRF-CALPUFF para la planificación de obras y el control preventivo del polvo, demostrando que estas herramientas son fundamentales para ciudades con desarrollo constructivo intensivo.

Arregocés y Rojano (2023) en su investigación titulado “*Sensitivity of the CALMET-CALPUFF model system on estimating PM10 concentrations at a mining site in northern Colombia*”, estudiado en un contexto de intensa actividad minera a cielo abierto en el norte de Colombia, donde la emisión de material particulado constituye una realidad problemática por su potencial impacto en la salud pública y el ambiente, agravada por la complejidad topográfica y la variabilidad meteorológica de la zona. El objetivo fue evaluar la sensibilidad del sistema de modelamiento CALMET-CALPUFF en la estimación de concentraciones de PM10, analizando la influencia de parámetros dinámicos, la resolución espacial y la rugosidad superficial. La metodología fue de enfoque cuantitativo, tipo aplicado y nivel explicativo, utilizando simulaciones atmosféricas con múltiples configuraciones del modelo y validación estadística mediante indicadores como MSE, BIAS y coeficiente de correlación. Los resultados evidenciaron que parámetros como TERRAD y la resolución horizontal influyen significativamente en la precisión de las estimaciones, observándose que resoluciones muy finas aumentan el error, mientras que configuraciones intermedias mejoran el ajuste. En conclusión, el estudio sugiere que la correcta calibración del modelo debería priorizar el análisis de sensibilidad para obtener simulaciones

representativas, recomendando su uso como herramienta clave en la gestión ambiental y la formulación de políticas de control de la calidad del aire en zonas mineras.

Zeydan y Karademir (2023) en su estudio titulado “*Comparison of two air quality models in complex terrain near seashore*”, evaluado en un contexto de alta dificultad topográfica y meteorológica en la ciudad costera de Zonguldak, Turquía, donde la intensa combustión de carbón para calefacción doméstica y generación termoeléctrica constituye una realidad problemática por el deterioro persistente de la calidad del aire y sus efectos en la salud pública. El objetivo fue comparar el desempeño de los modelos de calidad del aire AERMOD y CALPUFF para simular la distribución espacial del PM10 en un terreno complejo cercano a la línea costera. La metodología empleada fue de enfoque cuantitativo y tipo comparativo, basada en la elaboración de un inventario detallado de emisiones para fuentes puntuales, lineales y de área, así como en la aplicación de ambos modelos utilizando datos meteorológicos multianuales y validación estadística mediante sesgo fraccional, índice de concordancia y media geométrica. Los resultados evidenciaron que CALPUFF predijo concentraciones máximas de PM10 superiores a las estimadas por AERMOD, mostrando un desempeño ligeramente mejor en condiciones de topografía compleja y efectos de brisa marina. En conclusión, el estudio sugiere que en zonas costeras con relieve complejo debería priorizarse el uso de modelos avanzados como CALPUFF para una gestión más efectiva de la calidad del aire y la protección de la salud poblacional

2.1.2. Antecedentes nacionales

Enriquez Vicuña (2021) menciona la problemática de contaminación en el departamento de Arequipa, este estudio es realizado para el material particulado pm10 presentando como objetivo evaluar la calidad de aire atmosférico y con ese fin caracterizar el mencionado material particulado de acuerdo al monitoreo ambiental a través de una estación ubicada en la Plaza Santa Lázaro en un periodo de 24 horas

empleando un muestrador de alto volumen (HI - VOL) para el PM10 y uno debajo para el PM 2.5 poniendo en evidencia que se excede los estándares de calidad ambiental estipulados en el decreto supremo la 03 - 2017 con 145 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 34.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ además de evaluar la dirección de Viento en la época del año influyendo en los resultados a través del traslado y la dispersión.

Chávez Limay (2023) en su tesis titulado *“Determinación de la calidad del aire por PM10 y su relación con los factores meteorológicos de humedad y temperatura en el distrito de Santa Anita – provincia de Lima durante los años 2018 al 2022”* desarrollado en el contexto urbano caracterizado por el crecimiento poblacional, el incremento del parque automotor y actividades antrópicas que generan emisiones de material particulado, constituyendo una realidad problemática por sus efectos adversos sobre la salud pública. El objetivo fue determinar la calidad del aire por PM10 y analizar su relación con la humedad y la temperatura durante un periodo multianual. La metodología empleada fue de enfoque cuantitativo, tipo descriptivo-correlacional y diseño no experimental, utilizando datos secundarios de monitoreo del SENAMHI y análisis estadístico mediante el coeficiente de Spearman. Los resultados evidenciaron que las concentraciones anuales de PM10 superaron el Estándar de Calidad Ambiental en la mayoría de los años evaluados, con valores críticos en 2019 y 2021, mientras que se observó que mayores niveles de humedad se asociaron con menores concentraciones de PM10, y la temperatura mostró una relación variable según el año, influenciada por el contexto de la pandemia. En conclusión, el estudio sugiere que la gestión de la calidad del aire debería considerar de manera integrada los factores meteorológicos, recomendando fortalecer el monitoreo continuo para la toma de decisiones preventivas en distritos urbanos de Lima Metropolitana

Medina y Quispe (2022) en su estudio titulado *“Material particulado PM10 y el tráfico vehicular en la salida Lampa (tramo Jr. Kantú – Jr. América) de la ciudad de Juliaca, 2022”* analizado en un contexto urbano caracterizado por un intenso flujo vehicular, vías en mal estado y condiciones meteorológicas propias del altiplano, lo

que constituye una realidad problemática debido a la generación y resuspensión de material particulado PM₁₀ con potencial impacto en la salud de la población. El objetivo principal fue determinar el nivel de contaminación por PM₁₀ influenciado por el tráfico vehicular en la salida Lampa. La metodología fue de enfoque cuantitativo, tipo aplicado y diseño no experimental, empleando el método gravimétrico con equipos Hi-Vol para el monitoreo de PM₁₀, así como la medición de la dirección y velocidad del viento mediante anemógrafo y el conteo vehicular para caracterizar el flujo de tránsito. Los resultados evidenciaron concentraciones promedio de PM₁₀ de 87,5 µg/m³ en el Jr. Kantú y 79,5 µg/m³ en el Jr. América, valores que no superaron el Estándar de Calidad Ambiental de 100 µg/m³ en 24 horas, situación atribuida a la presencia de precipitaciones durante el periodo de monitoreo. En conclusión, el estudio sugiere que la contaminación por PM₁₀ debería evaluarse también en temporada de estiaje, cuando la ausencia de lluvias y el incremento de vientos podrían elevar significativamente las concentraciones, recomendando fortalecer el monitoreo continuo como base para la gestión de la calidad del aire urbano.

2.1.3. Antecedentes Locales

Huaricapcha Alania (2024) en su tesis titulado “Evaluación de la calidad de aire del Centro Poblado de Colquijirca influenciado por la producción del tajo norte de la Sociedad Minera El Brocal – 2023” surge ante una realidad problemática caracterizada por la incertidumbre de la población respecto al impacto de las actividades mineras a tajo abierto sobre la calidad del aire y la salud pública, debido a la generación de material particulado y gases asociados a voladuras, transporte y desmonteras. El objetivo principal fue determinar la calidad del aire del centro poblado de Colquijirca bajo la influencia directa del tajo norte, lo cual debería contribuir a una mejor toma de decisiones ambientales. Metodológicamente, la investigación fue de tipo descriptivo y diseño transversal, utilizando información secundaria del OEFA y datos de monitoreo de la propia empresa minera, evaluando concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} y la dirección del viento. Los resultados evidencian que, si bien las

concentraciones se mantuvieron dentro de los Estándares de Calidad Ambiental establecidos por el D.S. N° 003-2017-MINAM, algunos valores se aproximaron al límite permitido, lo que sugiere un riesgo potencial acumulativo a largo plazo. En conclusión, el estudio debería ser considerado como una línea base técnica que recomienda fortalecer el monitoreo continuo y las medidas preventivas en zonas pobladas cercanas a operaciones mineras

Picoy Villanueva (2022) en su tesis titulado *“Dispersión del material particulado (PM10 y PM2,5), con interrelación a los factores meteorológicos en el centro poblado de Champamarca, distrito de Simón Bolívar, Provincia de Pasco – 2018”* desarrollado en un contexto de preocupación ambiental asociado a la dispersión de material particulado generado principalmente por actividades mineras y remoción de suelos, lo cual constituye una realidad problemática relevante por sus potenciales efectos sobre la calidad del aire y la salud de la población. El objetivo fue evaluar la dispersión del PM10 y PM2,5 y su interrelación con factores meteorológicos como temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Metodológicamente, la investigación fue de enfoque cuantitativo, tipo descriptivo y diseño no experimental, utilizando información secundaria proveniente de reportes de monitoreo de la OEFA y análisis estadístico correlacional mediante el coeficiente de Pearson. Los resultados evidenciaron una relación significativa y positiva entre la velocidad del viento y la dispersión del material particulado, así como una influencia relevante de la humedad relativa, mientras que la temperatura mostró una relación poco significativa. En conclusión, el estudio sugiere que la evaluación de la calidad del aire debería considerar de manera integrada las variables meteorológicas, recomendando el uso de herramientas como la rosa de vientos para una mejor interpretación de la dinámica de dispersión en zonas altoandinas con influencia minera

Salas Orihuela (2023) en su tesis titulado *“Evaluación del material particulado PM10 de plomo (Pb) para determinar su tendencia aplicando el modelo ARIMA, puntos de monitoreo (Q-01 y CH-203), Distrito Simón Bolívar, Pasco – 2018”*,

desarrollado en un contexto de alta preocupación socioambiental debido a la histórica actividad minera a tajo abierto en Cerro de Pasco, la cual ha generado la dispersión de material particulado con contenido de metales pesados, constituyendo una realidad problemática por sus efectos potenciales en la salud humana. El objetivo principal fue evaluar la concentración de PM10 de plomo y determinar su tendencia temporal mediante la aplicación del modelo estadístico ARIMA. La metodología empleada fue de enfoque cuantitativo, tipo aplicado y nivel predictivo, con diseño no experimental y longitudinal, utilizando datos secundarios proporcionados por el OEFA correspondientes a 36 registros en los puntos de monitoreo Q-01 y CH-203. Los resultados mostraron que las concentraciones de plomo no superaron el Estándar de Calidad Ambiental para aire establecido en el D.S. N.º 003-2017-MINAM, evidenciando una tendencia ligeramente decreciente hacia finales del año 2018. En conclusión, el estudio sugiere que el uso del modelo ARIMA debería consolidarse como una herramienta técnica para el seguimiento y la toma de decisiones preventivas en procesos de remediación ambiental y gestión de la calidad del aire en zonas con influencia minera.

Rivera Tiza (2022) en su tesis titulado *“Simulación de la concentración de contaminantes atmosféricos provenientes de las fuentes de la Unidad Minera El Porvenir en el Centro Poblado San Juan de Milpo – 2020”*, desarrollado en un contexto de preocupación ambiental y social debido a la generación de material particulado y gases asociados a las actividades de explotación, procesamiento y transporte minero, lo que constituye una realidad problemática por su potencial impacto en la salud de la población cercana. El objetivo fue simular la concentración de contaminantes atmosféricos emitidos por la Unidad Minera El Porvenir hacia el centro poblado de San Juan de Milpo, a fin de evaluar su comportamiento espacial y su nivel de cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental. La metodología empleada fue de enfoque cuantitativo, tipo descriptivo–explicativo y diseño no experimental, utilizando información meteorológica, topográfica y de emisiones, procesada mediante el

modelo de dispersión AERMOD recomendado por la EPA. Los resultados evidenciaron que la concentración simulada de material particulado alcanzó valores aproximados de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a una distancia de hasta 3 km, situándose por debajo de los límites establecidos en la normativa nacional; sin embargo, el estudio sugiere que, por su carácter acumulativo, el material particulado debería ser monitoreado de forma continua. En conclusión, la investigación recomienda fortalecer la gestión preventiva y el uso de modelos de simulación como herramienta clave para la toma de decisiones ambientales en zonas de influencia minera

2.2. Bases teóricas- científicas

2.2.1. Evaluación de la calidad del aire por pm-10

Los modelos de dispersión del PM10 se utilizan para evaluar la calidad del aire en un área determinada. Esta información se puede utilizar para establecer límites de exposición al PM10 y para identificar las fuentes de contaminación.

Los dispositivos empleados para la medición del material particulado funcionan succionando una cantidad mensurable de aire del entorno hacia un compartimento de recolección a través de un filtro durante un período de tiempo establecido, generalmente 24 horas. Antes y después del proceso, se registra el peso del filtro para calcular la ganancia neta de peso. La cantidad total de aire muestreado se determina a partir de la velocidad promedio de flujo y la duración del muestreo. La concentración total de partículas en el aire ambiente se calcula dividiendo la masa recolectada por el volumen de aire muestreado, ajustado a las condiciones de referencia. Estos muestreadores se dividen en dos tipos según su controlador de flujo: pueden ser de sistema MFC (controlador de flujo de tipo másico) o VFC (controlador de flujo de tipo volumétrico). Por otro lado, existen dispositivos instalados directamente en las personas, conocidos como bombas de muestreo personal, que permiten mediciones directas de partículas PM10, tomando muestras de aire para medir la concentración de partículas en suspensión, líquidas o sólidas, y ofrecen una lectura continua y directa, junto con la capacidad de registrar electrónicamente los datos. Según García

(2002), en las mediciones de partículas, se presentan diversas fuentes de error, como interferencias, niveles de blancos, reproducibilidad de los métodos de muestreo y el muestreo estadístico, ya que cada medición conlleva un grado de incertidumbre atribuible a las limitaciones de los equipos y a la pericia de los operadores. Entre las principales fuentes de error se incluyen la contaminación artificial de las muestras durante su manipulación, la pérdida de material recolectado durante el proceso de muestreo, recolección o almacenamiento de los filtros, el manejo inadecuado de los filtros durante su transporte o almacenamiento, la posible modificación de las muestras durante su análisis y los errores en la gestión de los datos.

2.2.2. Cálculo de concentraciones

Con el propósito de realizar comparaciones con los resultados obtenidos a través de los Estándares de Calidad del Aire (ECA) en vigor, es necesario que las concentraciones de los contaminantes en el aire se informen en unidades de microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Además, es imperativo que cualquier resultado obtenido se acompañe de la indicación del valor de incertidumbre ampliada de la medición, de acuerdo con lo establecido en la norma NTP-ISO/IEC 17025:2017, que versa sobre "Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración," o su versión actualizada. En el contexto de contaminantes gaseosos, el volumen debe expresarse en condiciones estándar, es decir, a una temperatura de 298 Kelvin y una presión atmosférica de 101,3 kPa (760 mmHg o 1atm). En el caso de material particulado y sustancias que se analizan en su fase de partículas, como el plomo, el volumen de muestreo se debe expresar en condiciones ambientales (volumen actual), tomando en cuenta la temperatura ambiental y la presión atmosférica promedio, registradas durante el periodo de muestreo.

$$\text{Concentración} = [\text{Gas}] = \frac{M}{V_{std}}$$

Dónde:

M: masa del contaminante, en μg (microgramos)

Vstd : volumen estandarizado de la muestra, en m3 std.

$$Vstd = (Va) \times \left(\frac{Pa}{Pstd} \right) \left(\frac{Tstd}{Ta} \right)$$

Dónde:

Va: volumen actual de la muestra en m3 (en términos de temperatura ambiental y presión atmosférica promedio, medidas durante el periodo de muestreo).

Ta: temperatura ambiental promedio en Kelvin, medida durante el periodo de muestreo.

Pa: presión atmosférica promedio en kPa, mmHg o atm, medida durante el periodo de muestreo. Tstd: temperatura estándar = 298 Kelvin.

Pstd: presión estándar = 101,3 kPa = 760 mmHg = 1atm.

$$Va = (Qa) \times (t)$$

Dónde:

Qa: flujo de muestreo promedio, en m3/min.

t: tiempo o periodo de muestreo, en minutos.

En el caso de algunos equipos de monitoreo automático de gases ambientales, los resultados se obtienen en las unidades de partes por billón {ppb}, por lo que para reportar en las unidades de microgramos por metro cúbico, se debe realizar la siguiente conversión:

$$\text{Concentración} = [Gas] = \frac{M}{Vstd} = (ppb) \times \left(\frac{\bar{M}}{Vmol} \right)$$

Dónde:

M: masa del contaminante en µg (microgramos).

Vstd: volumen estandarizado de la muestra en m3 std. [ppb]: concentración del contaminante en partes por billón.

M: peso molecular del contaminante en gramos/mol.

Vmol: volumen de un mol de gas a condiciones estándar = 24,4 litros/mol.

2.2.3. Decreto Supremo N°003-2017-MINAM que establece los valores de calidad del aire

La dispersión del material particulado en la atmósfera constituye un fenómeno físico complejo gobernado por principios de la mecánica de fluidos y la dinámica atmosférica, en el cual el campo vectorial de la velocidad del viento desempeña un rol determinante en el transporte, dilución y deposición de contaminantes. El viento puede ser conceptualizado como un campo vectorial tridimensional definido por componentes direccionales (u , v , w), cuya magnitud y orientación varían espacial y temporalmente en función de factores meteorológicos y topográficos, cuya característica permite comprender los procesos de advección y difusión turbulenta que condicionan la dispersión del material particulado PM₁₀, en zonas altoandinas con actividad minera, donde la interacción entre relieve y flujo atmosférico genera patrones de dispersión no homogéneos.

El material particulado PM₁₀ está constituido por partículas con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros, capaces de permanecer suspendidas en la atmósfera y ser transportadas por el viento a distancias variables dependiendo de las condiciones meteorológicas. Estas partículas pueden contener compuestos tóxicos, incluyendo metales pesados como plomo (Pb), arsénico (As) y cadmio (Cd), generando un peligro para la salud humana y los ecosistemas.

En el Perú, el marco normativo aplicable a la calidad del aire está establecido en el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, el cual aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aire como instrumentos de gestión ambiental orientados a proteger la salud de la población y el ambiente. Esta norma define los valores máximos permitidos de concentración de contaminantes en el aire ambiente, estableciendo para el material particulado PM₁₀ un valor de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como

promedio de 24 horas, el cual no debe ser excedido para evitar riesgos significativos (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017).

Asimismo, en relación con los metales pesados asociados al material particulado, el marco normativo ha sido complementado mediante actualizaciones que incorporan límites específicos para elementos tóxicos. En particular, para el plomo (Pb), se establece un valor referencial de $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio anual, alineado con criterios internacionales de protección de la salud, dado que este metal presenta alta toxicidad, bioacumulación y efectos adversos en sistemas neurológicos, especialmente en poblaciones vulnerables (MINAM, 2017; Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021).

En cuanto a los procedimientos de monitoreo de la calidad del aire, el marco normativo peruano establece que la medición del PM₁₀ debe realizarse mediante métodos gravimétricos o automáticos validados, asegurando representatividad espacial y temporal. El periodo de referencia más utilizado es el promedio de 24 horas, lo cual implica que las muestras deben ser recolectadas de manera continua durante dicho intervalo para garantizar la comparabilidad con los ECA. Complementariamente, se pueden realizar monitoreos horarios o de corto plazo para analizar variabilidad temporal, aunque la evaluación normativa se sustenta en promedios diarios o anuales según el contaminante.

La recolección de muestras de material particulado se realiza mediante equipos especializados, tales como muestreadores de alto volumen (Hi-Vol) o monitores automáticos, los cuales capturan partículas en filtros previamente acondicionados. Posteriormente, estos filtros son sometidos a análisis gravimétrico para determinar la masa de partículas retenidas, y en el caso de metales pesados, a técnicas analíticas como espectrometría de absorción atómica o ICP-MS para identificar su composición química. La correcta instalación de los equipos, la altura de muestreo, la calibración y el control de calidad de los datos son aspectos fundamentales que garantizan la validez de los resultados obtenidos.

La integración entre el análisis del campo vectorial del viento y los datos de monitoreo de PM10 permite establecer relaciones causales entre las fuentes emisoras y las zonas receptoras, identificando patrones de transporte de contaminantes. Tal como se evidencia en estudios aplicados en la ciudad de Cerro de Pasco, donde predominan velocidades de viento bajas (inferiores a 2 m/s) y direcciones constantes, se generan condiciones de limitada dispersión atmosférica, favoreciendo la acumulación de material particulado en zonas urbanas expuestas.

2.3. Definición de términos básicos

Para comprender mejor el estudio del campo vectorial de la velocidad del viento en relación con la dispersión del material particulado PM10, es útil definir algunos términos clave:

Campo Vectorial de la Velocidad del Viento: Un campo vectorial es una representación matemática que asigna a cada punto en el espacio un vector que describe la dirección y la magnitud de la velocidad del viento en ese punto. Este campo se utiliza para mapear y comprender cómo el viento se mueve en una región determinada.

Velocidad del Viento: La velocidad del viento es la magnitud de la velocidad de movimiento del aire en un punto específico. Se mide en unidades como metros por segundo (m/s) o kilómetros por hora (km/h).

Dirección del Viento: La dirección del viento se refiere a la brújula o el ángulo que indica hacia dónde se dirige el viento desde un punto dado. Se expresa en grados o puntos cardinales.

Material Particulado (PM10): El PM10 se refiere a partículas suspendidas en el aire que tienen un diámetro aerodinámico igual o menor a 10 micrómetros. Estas partículas pueden incluir polvo, cenizas, hollín, partículas de aerosol y otros contaminantes sólidos finos.

Dispersión Atmosférica: La dispersión atmosférica se refiere al proceso en el que las partículas, como el PM10, se distribuyen en la atmósfera debido a factores como la acción del viento, la gravedad y otros procesos atmosféricos. Esta dispersión puede afectar la concentración y la distribución de partículas en el aire.

Perfil Vertical de Velocidad del Viento: Un perfil vertical de velocidad del viento muestra cómo la velocidad y la dirección del viento cambian con la altitud en la atmósfera. Estos perfiles son importantes para comprender cómo las partículas de PM10 pueden moverse en diferentes capas de la atmósfera.

Estabilidad Atmosférica: La estabilidad atmosférica se refiere a las condiciones en la atmósfera que pueden influir en la dispersión de contaminantes. La atmósfera puede ser estable (inhibiendo la dispersión) o inestable (favoreciendo la dispersión), dependiendo de factores como la diferencia de temperatura entre las capas de aire.

Inversión Térmica: La inversión térmica es una condición en la que la temperatura aumenta con la altitud en lugar de disminuir, lo que puede atrapar contaminantes cerca del suelo y dar lugar a episodios de mala calidad del aire.

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

El campo vectorial del viento condicionado por su topografía, limita significativamente la capacidad de dispersión atmosférica del PM10

2.4.2. Hipótesis específicas

- a. La magnitud del viento con una dirección Noreste (NE) dirige los contaminantes hacia las zonas residenciales durante los periodos diurnos.
- b. La irregularidad topográfica modifica el flujo laminar del viento, generando variaciones vectoriales locales significativas.
- c. La proximidad espacial de fuentes activas de emisión a receptores sensibles, favorece la resuspensión del PM10.

2.5. Identificación de las variables

2.5.1. Variable independiente

Campo vectorial de viento

2.5.2. Variable dependiente

Dispersión de material particulado PM10

2.6. Definición Operacional de variables e indicadores

Se detalla en la tabla 2.

Tabla 2 Matriz de operacionalización de las variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Campo vectorial de la velocidad del viento (Variable independiente)	El campo vectorial de la velocidad del viento es la representación física y matemática del movimiento del aire en la atmósfera, expresado mediante vectores que describen simultáneamente la magnitud, dirección y sentido del flujo en función de su posición espacial, siendo un elemento fundamental para el análisis del transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos (Arya, 2001; Stull, 2017).	En la presente investigación, el campo vectorial del viento se operacionaliza mediante la medición de la velocidad del viento (m/s) y su dirección (°) en cinco puntos de monitoreo georreferenciados, a una altitud aproximada de 4 280 m s.n.m., utilizando registros oficiales de la OEFA. Los datos fueron procesados a través de análisis vectorial y modelamiento matemático-computacional (MATLAB), permitiendo caracterizar la variabilidad espacial del viento y su interacción con la topografía local (OEFA, 2018a).	Dirección del viento	Dirección predominante (°), frecuencia direccional (%), rosa de vientos
			Magnitud del viento	Velocidad media (m/s), velocidad mínima y máxima (m/s), clasificación del viento (calma, ventolina, brisa ligera)
			Variabilidad espacial del viento	Componentes vectoriales del viento (i, j, k), gradiente espacial de velocidad, diferencias entre puntos de monitoreo
Dispersión del material particulado PM10 (Variable dependiente)	La dispersión del material particulado PM10 es el proceso físico mediante el cual las partículas con diámetro aerodinámico	Operacionalmente, la dispersión del PM10 se evalúa a partir de las concentraciones promedio de 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) registradas en los	Concentración de PM10	Promedio diario ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), concentración máxima mensual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), tendencia temporal

menor o igual a 10 μm se transportan, diluyen o acumulan en la atmósfera, en función de las condiciones del viento, la topografía y las variables meteorológicas, influyendo directamente en la calidad del aire y la exposición de la población (Seinfeld & Pandis, 2016; WHO, 2021).	puntos de monitoreo CA-SB-01 y CA-SB-02, comparadas con la dirección y magnitud del viento obtenidas del campo vectorial. Asimismo, se analiza su variación temporal y espacial mediante gráficos históricos y su relación con las fuentes de emisión identificadas en el área de estudio, utilizando información de los informes de la OEFA (OEFA, 2018a; OEFA, 2018b).	Distribución espacial del PM10	Diferencia de concentraciones entre estaciones, zonas de acumulación
		Composición asociada	Concentración de metales en PM10 (Pb, As, Cd, Fe, Zn) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

CAPITULO III

METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION

3.1. Tipo de investigación

El estudio del campo vectorial de la velocidad del viento para evaluar la dispersión del material particulado PM10, tiene un enfoque cuantitativo y tipo aplicada. Por qué basa en cálculos matemáticos y resuelve un problema implicando la observación, medición y análisis de datos reales relacionados con las condiciones meteorológicas, la calidad del aire y la dispersión de partículas PM10 en situaciones de la vida real. Además, combina elementos de la modelización y simulación para prever el comportamiento del viento y la dispersión del PM10 en diversas circunstancias (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018).

3.2. Nivel de Investigación

El nivel del presente estudio es explicativo y analíticos dado que proporciona una comprensión completa de la dispersión de PM10 en relación al flujo del viento, representado por el campo vectorial de la velocidad del viento en m/s. Por otra parte, la presente se basa en bibliografía, registros de monitoreo, y cálculos matemáticos para explicar el fenómeno de estudio.

3.3. Métodos de investigación

El método usado para la presente es el hipotético deductivo lo que partimos de una premisa o base teórica para explicar y describir su incidencia, asimismo se emplea la observación en el análisis de datos, modelización y validación para comprender cómo el campo vectorial de la velocidad del viento afecta la dispersión de PM10 en la ciudad de Cerro de Pasco, permitiendo entender el comportamiento atmosférico de la zona para la gestión de la calidad del aire y la protección del medio ambiente.

3.4. Diseño de investigación

El diseño propuesto para la presente es no experimental porque no se manipula ninguna variable, el mismo que menciona (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018), por lo que es un proceso multidisciplinario y complejo que requiere conocimientos de meteorología, modelos matemáticos atmosféricos y en la calidad del aire para obtener resultados significativos y con ello validar la hipótesis propuesta.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población o universo se define como el conjunto de todos los casos que concuerdan con determinadas especificaciones lo menciona (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018), siendo esta la dispersión del material particulado PM10 en los 5 puntos de muestreo, ubicadas en la ciudad de Cerro de Pasco.

3.5.2. Muestra

La muestra de la investigación está conformada por cinco puntos de monitoreo atmosférico seleccionados bajo la disponibilidad de ubicación y registros de la OEFA y con estos se desarrolló el campo vectorial del viento en el ámbito urbano-minero de la ciudad de Cerro de Pasco. Estos puntos CA-SB-02 (punto de referencia), CA-SB-01, P3, P4 y P5, fueron georreferenciados en coordenadas UTM (Zona 18S) permitiendo su distribución evaluar la variabilidad espacial de la dirección y magnitud del viento a una altitud aproximada de 4 280 m s.n.m.. Las velocidades medias

registradas oscilaron entre 0,76 m/s y 1,24 m/s, mientras que las direcciones predominantes se concentraron mayoritariamente entre 66,8° y 84,3° (N–NE), con excepción del punto P4, que presentó una dirección contrastante de 284° (O–NO) y la mayor velocidad media (1,24 m/s), evidenciando la influencia de la topografía local sobre el campo vectorial. Según (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018) define como un subgrupo del universo o población del cual se recolectan los datos y que debe ser representativo si se quiere generalizar los resultados, conjunto de valores de la concentración del material particulado en la atmosfera en la ciudad de Cerro de Pasco.

Tabla 3 *Puntos de monitoreo*

PUNTOS	UTMX	UTMY	WS4280M	WD4280M
CA-SB-02 (REF)	361113.4	8818006.9	0.80622578	82.9170191
CA-SB-01	361204.8	8819577.1	1.00498756	84.3321597
P3	361583	8818717	0.90553851	83.7022417
P4	360756.35	8819816.59	1.23693169	283.997714
P5	361779	8819117	0.76157731	66.8352921

3.5.3. Trabajo de campo

El trabajo de campo para el estudio involucra las siguientes secuencias:

Selección de sitios de Muestreo realizado por la OEFA, en donde se identifica las ubicaciones estratégicas de las fuentes de contaminación y se realizaron las mediciones de la concentración del material particulado PM10.

Referido a la instalación de equipos de monitoreo por parte de la OEFA como los anemómetros, torres meteorológicas y muestreadores de PM10, en los sitios de muestreo. Estos dispositivos registraron datos sobre la velocidad y dirección del viento, así como las concentraciones de PM10.

Asimismo, registro de los datos meteorológicos en cada sitio de muestreo, incluyendo la temperatura, la presión atmosférica y la humedad, ya que estos factores influyen en la dispersión del PM10, también para el estudio fue necesario la

recopilación de datos en alturas diferentes para obtener información sobre perfiles verticales de velocidad del viento.

Referido al análisis de datos, conlleva a determinar la relación de las concentraciones de PM10 en función de la velocidad y la dirección del viento, así como considerar la estabilidad atmosférica y otros factores y para la generación de los modelos fue necesario hallar la función de diferentes escenarios de velocidad y dirección del viento.

3.5.4. Trabajo de gabinete

Implica una serie de tareas, como la recopilación y análisis de datos meteorológicos históricos, que incluyen registros de velocidad y dirección del viento en diferentes altitudes, así como datos de temperatura, presión atmosférica y humedad. Estos datos son necesarios para comprender los patrones de viento. Además, se emplean modelos matemáticos y software de simulación para graficar la dispersión del PM10 en función del campo vectorial del viento, considerando variables como la topografía local y las condiciones climáticas específicas. La validación de estos modelos requiere la comparación con algunos modelos de simulación atmosférica.

Por otro lado, la evaluación de la calidad de los datos y la identificación de posibles fuentes de error en las mediciones de PM10, así como en las mediciones del campo vectorial del viento. Se debe considerar la incertidumbre asociada a las mediciones y los procedimientos utilizados, y se busca minimizar cualquier sesgo o inexactitud. Además, se examinan los factores que puedan influir en la dispersión de las partículas, como las condiciones de estabilidad atmosférica, la presencia de obstáculos físicos y la variabilidad en la fuente de emisión de PM10.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.5.5. Métodos y técnicas de recolección de datos

Para este estudio se emplean métodos y técnicas de recolección de datos para evaluar información sobre la velocidad y dirección del viento, así como la

concentración de PM10. Uno de los métodos más comunes es el registro de datos provenientes de las estaciones meteorológicas, que incluyen anemómetros para medir la velocidad del viento y veletas para determinar su dirección. Además, para medir la concentración de PM10, se emplean muestreadores de partículas que suelen funcionar durante períodos específicos, succionando el aire a través de un filtro. Después del muestreo, se pesa el filtro para calcular la concentración de partículas. También, se utilizan modelos matemáticos de dispersión atmosférica que integran datos meteorológicos y de calidad del aire para predecir la dispersión del PM10 en función del campo vectorial del viento y otras variables.

Otra técnica es el uso de las imágenes satelitales, que permite obtener información topográfica por medio de las combinaciones de las bandas multiespectrales. Estos métodos y técnicas, tanto in situ como a distancia, son importantes para comprender cómo se dispersa el material particulado PM10 en la atmósfera y cómo afecta la calidad del aire en diferentes ubicaciones.

Por otro lado, la técnica empleada es la observación y como instrumento a la ficha de observación y el estadígrafo de comparación entre las estaciones de monitoreo es la t de student.

Tabla 4. Ficha de observación

MESES	Paragsha CA-SB-01	Champamarca CA-SB-02
Abril		
Mayo		
Junio		
Julio		
Agosto		
Setiembre		
Octubre		

3.5.6. Selección y toma de muestra

La selección de las ubicaciones para la medición de los puntos topográficos es condicionada por el informe técnico realizado por la OEFA, teniendo en cuenta la

proximidad a fuentes de emisión, patrones de viento regionales y zonas de interés ambiental. Referido a los instrumentos de medición, como las estaciones meteorológicas y sensores de calidad del aire, me baso en los informes de la OEFA, en donde se contempla la forma de toma de muestras de PM₁₀, utilizando muestreadores de aire específicos, que suelen funcionar succionando el aire ambiente a través de filtros durante un período de tiempo determinado, generalmente 24 horas, también el registro de datos como la velocidad y la dirección del viento, la temperatura, la humedad y la presión atmosférica para comprender mejor el campo vectorial de la velocidad del viento en ese lugar específico.

3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.

La selección de los instrumentos de investigación en el estudio del campo vectorial de la velocidad del viento para evaluar la dispersión de material particulado PM₁₀ se basa en los datos recopilados en los informes de la OEFA. Donde menciona que sus instrumentos son capaces de medir la velocidad y dirección del viento a diferentes altitudes y dispositivos que permitan la toma de muestras de material particulado en el aire. Estos instrumentos son calibrados regularmente para garantizar su precisión y confiabilidad en condiciones de campo.

La validación de los instrumentos implica la verificación de su capacidad para medir con exactitud la variable de interés, en este caso, el viento y las partículas PM₁₀ están supeditados a certificados de calibración de los equipos empleados por la OEFA. Por lo que su validación periódica es importante para asegurarse de que los instrumentos continúen proporcionando resultados precisos a lo largo del tiempo. La confiabilidad de estos instrumentos se basa en su capacidad para medir consistentemente en diversas condiciones y a lo largo del tiempo, implicando que los datos recopilados son coherentes y reproducibles. La garantía de la confiabilidad se logra mediante el mantenimiento regular de los instrumentos, el control de la calidad de los datos y la capacitación del personal que opera los dispositivos por ende se basa en patrones de calibración (Santos Sanche, 2017).

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

El estudio involucra una serie de técnicas de procesamiento y análisis de datos para comprender la dispersión de estas partículas en la atmósfera. Los datos de las estaciones meteorológicas que registran la velocidad y dirección del viento a diferentes altitudes. Estos datos se procesan mediante técnicas de interpolación espacial usando sistemas de información geográfica para crear un campo vectorial tridimensional de viento que representa el comportamiento del viento. Además, se emplean modelos de dispersión atmosférica que incorporan este campo vectorial y factores como la topografía, la estabilidad atmosférica y la emisión de PM10 para corroborar la dispersión de la concentración y distribución de partículas en el aire en función de las condiciones meteorológicas actuales. Estos modelos utilizan ecuaciones de transporte de partículas, ajuste de curvas que muy bien trabaja el Matlab como software de simulación numérica.

En la etapa de análisis de datos, se evalúan las concentraciones de PM10 calculadas en función de las condiciones del campo vectorial de velocidad del viento. Implicando la comparación de las concentraciones con los puntos de monitoreo. La validación de los modelos se lleva a cabo mediante la comparación de las mediciones de PM10 en la atmósfera con los registros de la OEFA en ese punto.

3.9. Tratamiento estadístico

Los datos de la velocidad de viento son sometidos a un análisis estadístico descriptivo (ver tabla 6) para calcular los promedios, desviaciones estándar y rangos, proporcionando una de las características que permite validar la hipótesis de la presente, además de procesar la dirección del viento.

El modelo matemático de la prueba t de Student para una muestra (one-sample t-test), es el estadígrafo estándar para validar una hipótesis sobre la media poblacional cuando la varianza poblacional es desconocida y se estima con la muestra. Su planteamiento de la comparación para una muestra es.

Hipótesis nula $H_0: \mu = \mu_0$

Hipótesis alternativa H1

- Bilateral: H1: $\mu \neq \mu_0$
- Cola derecha: H1: $\mu > \mu_0$
- Cola izquierda: H1: $\mu < \mu_0$

Donde:

μ = media verdadera (poblacional) del parámetro estudiado (p. ej., concentración promedio de PM10).

μ_0 = valor de referencia (límite normativo, línea base o valor teórico) contra el cual se contrasta.

El estadístico t de Student para una muestra es:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$$

Bajo H_0 , se cumple: $t \sim t_{(n-1)}$

Tabla 5 Estadística descriptiva de la muestra

Estadísticos descriptivos									
	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Asimetría	
	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Desv. Error
	o	o	o	o	o	Estadístico	o	o	
WS4280M	5	,48	,76	1,24	,9431	,18925	,036	1,047	,913
WD4280M	5	217,16	66,84	284,00	120,3569	91,76869	8421,492	2,200	,913

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica

Desde una perspectiva ética, la investigación se fundamenta en el principio de la responsabilidad hacia el medio ambiente y la salud pública. La ética ambiental y la ética, por lo que se requiere que los investigadores se esfuercen por comprender los efectos de la contaminación del aire en la sociedad y el ecosistema, y busquen soluciones que minimicen los impactos negativos en las comunidades y el entorno. Además, la equidad y la justicia social deben ser consideradas, ya que la contaminación del aire afecta de manera desproporcionada a grupos vulnerables, como comunidades de bajos recursos. Desde una perspectiva filosófica, el estudio de

la dispersión de PM10 a través del campo vectorial del viento puede verse como un intento por comprender la interconexión entre la ciencia, la tecnología y la sociedad, como se aborda en la filosofía de la tecnociencia.

Desde una perspectiva epistémica, se basa en fundamentos científicos y metodológicos. La epistemología de la ciencia nos insta a aplicar métodos rigurosos y replicables para recopilar datos y generar conocimiento confiable sobre la dispersión de PM10. La transparencia y la objetividad son esenciales, y los investigadores deben estar dispuestos a reconocer las limitaciones de sus modelos y mediciones.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

El trabajo se desarrolló en el ámbito urbano-minero de la ciudad de Cerro de Pasco, específicamente dentro del distrito de Simón Bolívar, región Pasco. Esta zona se caracteriza por una topografía compleja de alta montaña, presencia histórica de actividad minera Cerro S.A.C a cielo abierto (tajo Raúl Rojas) y condiciones atmosféricas particulares que influyen directamente en los procesos de transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos.

La selección de los puntos de monitoreo respondió a criterios técnicos establecidos por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), priorizando áreas representativas tanto de zonas de exposición poblacional como de influencia directa de fuentes potenciales de emisión de material particulado, tales como botaderos mineros, vías no asfaltadas y zonas de tránsito vehicular. Asimismo, se consideró la distribución espacial para caracterizar adecuadamente el campo vectorial del viento, tomando como referencia un punto base que permitió la comparación relativa de las magnitudes y direcciones del flujo de aire. En total, se emplearon cinco puntos de monitoreo georreferenciados en el sistema de coordenadas UTM (Zona 18S), los cuales se detallan a continuación:

- CA-SB-02 (REF): Punto de referencia del estudio, ubicado en las coordenadas UTM X = 361113.4 m, Y = 8818006.9 m. En este punto se registró una velocidad media del viento de 0.806 m/s y una dirección predominante de 82.9°, correspondiente a un flujo de componente este-noreste.
- CA-SB-01: Localizado al noreste del punto de referencia (X = 361204.8 m, Y = 8819577.1 m), presentó una velocidad media del viento de 1.005 m/s y una dirección de 84.3°, evidenciando un patrón de viento coherente con el régimen regional predominante.
- P3: Ubicado en las coordenadas X = 361583 m, Y = 8818717 m, registró una velocidad de viento de 0.906 m/s y una dirección de 83.7°. Este punto se emplazó estratégicamente para analizar la dispersión lateral del PM10 en un sector intermedio entre áreas urbanas y zonas de influencia minera.
- P4: Situado en el sector noroeste del área de estudio (X = 360756.35 m, Y = 8819816.59 m), destacó por presentar la mayor velocidad media del viento (1.237 m/s) y una dirección de 284°, asociada a vientos de componente oeste-noroeste.
- P5: Localizado en las coordenadas X = 361779 m, Y = 8819117 m, presentó una velocidad media de 0.762 m/s y una dirección de 66.8°, correspondiente a un flujo del noreste. Este punto permitió complementar la caracterización espacial del campo vectorial del viento en la zona de estudio.

Las mediciones de velocidad y dirección del viento fueron obtenidas a una altura de referencia aproximada de 4 280 m s.n.m., empleando registros meteorológicos reportados por la OEFA. utilizados para el posterior modelamiento matemático y computacional del campo vectorial. Los valores de velocidad del viento, relativamente bajos a moderados, son característicos de las zonas altoandinas, donde predominan regímenes de ventolina y brisas ligeras, factores que condicionan la dispersión limitada del material particulado PM10.

Figura 2 Mapa de la toma de los puntos



Nota. Ubicación con coordenadas UTM de los puntos de monitoreo

La OEFA, como entidad gubernamental encargada de la fiscalización y evaluación ambiental en determinadas jurisdicciones, establece estos puntos de monitoreo para asegurar el cumplimiento de normativas ambientales, identificar posibles riesgos para la salud pública y el ecosistema, así como para evaluar el impacto de actividades industriales u otras fuentes contaminantes.

En estos puntos de monitoreo, se utilizarán instrumentos y equipos especializados para medir concentraciones de contaminantes, evaluar la calidad del agua, analizar emisiones atmosféricas, entre otros parámetros relevantes. Los resultados obtenidos a partir de estos monitoreos permiten a la OEFA tomar decisiones informadas y aplicar medidas correctivas cuando sea necesario, contribuyendo así a la protección y preservación del medio ambiente.

Figura 3 Punto de monitoreo de PM10 la cureña



Nota. Procedimiento de instalación según D.S. N.º 003-2017-MINAM (ECA Aire)

Figura 4 Punto de monitoreo de PM10 en el C.P Paragsha



Resultados en cumplimiento al primer objetivo planteado como determinar la dirección y magnitud del viento en la ciudad de Cerro de Pasco. Por eso en la Tabla 6 se presenta la caracterización espacial y vectorial de la dirección y magnitud del viento en los cinco puntos de monitoreo considerados en el estudio, tomando como referencia una altitud aproximada de 4 280 m s.n.m., donde se integran las coordenadas relativas en los ejes x, y y z, junto con las componentes vectoriales del viento (i, j, k), la velocidad del viento (WS4280M) y su dirección (WD4280M), estos datos permite describir el campo vectorial del viento con variaciones moderadas en magnitud y cambios direccionales condicionados por la topografía, que permite analizar la dispersión del material particulado PM10 en la ciudad de Cerro de Pasco.

Tabla 6 Dirección y magnitud de viento

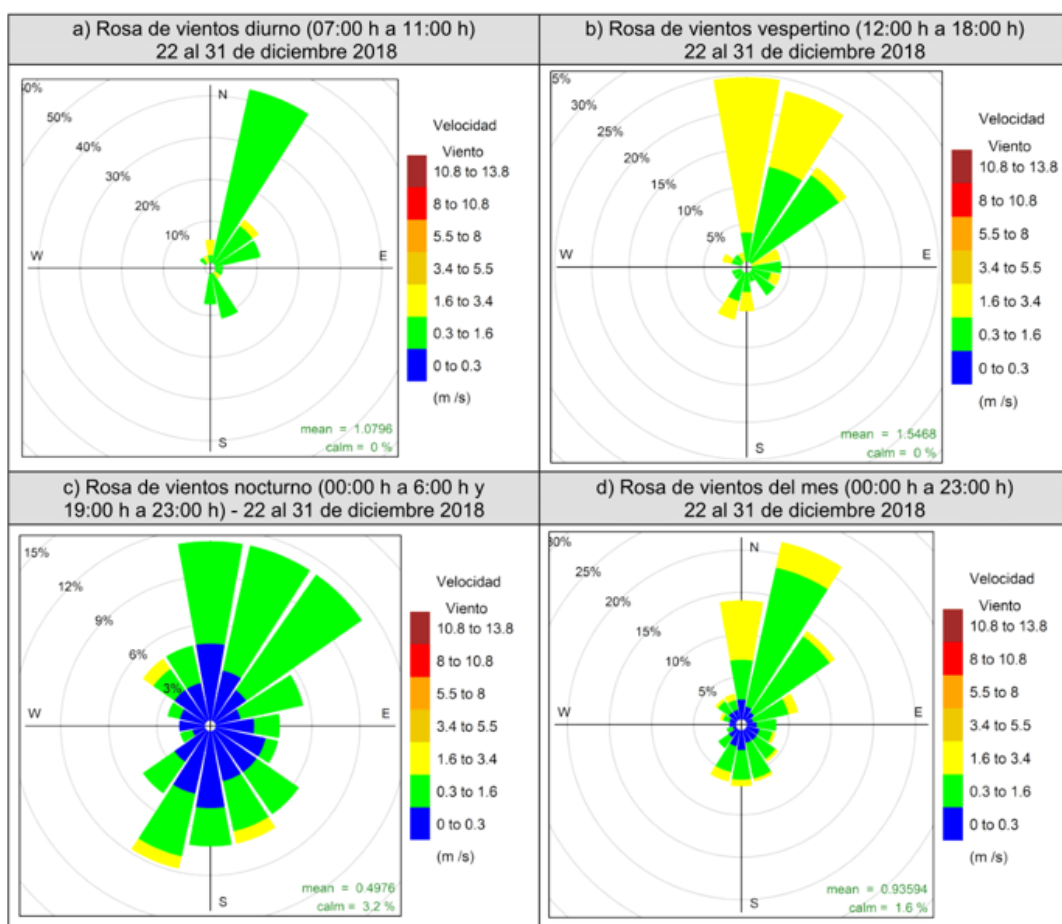
PUNTOS	x	y	z	i	j	k	WS4280M	WD4280M
CA-SB-02 (REF)	0	0	4.287	0.1	0.8	0.2	0.806225775	82.91701905
CA-SB-01	0.0914	1.5702	4.258	0.1	1	0.1	1.004987562	84.33215967
P3	0.4696	0.7101	4.295	0.1	0.9	0.2	0.905538514	83.70224172
P4	-0.35705	1.80969	4.311	-0.3	1.2	0.3	1.236931688	283.9977135
P5	0.6656	1.1101	4.286	0.3	0.7	0.4	0.761577311	66.83529213

Nota. WS4280M significa velocidad de viento en m/s a una altitud de 4280 m y WD4280M es la dirección en grados sexagesimales

En la Figura 5 muestra la rosa de vientos correspondiente al distrito de Simón Bolívar, elaborada a partir de los datos registrados en el punto de monitoreo CA-SB-01, diferenciando el comportamiento del viento en los periodos diurno, vespertino, nocturno y en el consolidado mensual. Esta figura evidencia una predominancia direccional del viento proveniente del sector norte y noreste, con mayores frecuencias durante los periodos diurno y vespertino, mientras que en el periodo nocturno se observa un incremento de condiciones de calma y velocidades bajas, principalmente menores a 1.6 m/s. Las velocidades registradas se concentran mayoritariamente en los rangos de 0.3 a 3.4 m/s, correspondientes a condiciones de calma, ventolina y brisa ligera, lo que refleja una capacidad limitada de dispersión atmosférica del material particulado PM10, especialmente durante las horas nocturnas. Este patrón

direccional y de magnitud del viento, condicionado por la topografía altoandina del área de estudio, resulta representativo del comportamiento regional, razón por la cual los resultados obtenidos en el punto CA-SB-01 se consideran similares y extrapolables al resto de estaciones.

Figura 5 Rosa de viento en el distrito de Simón Bolívar

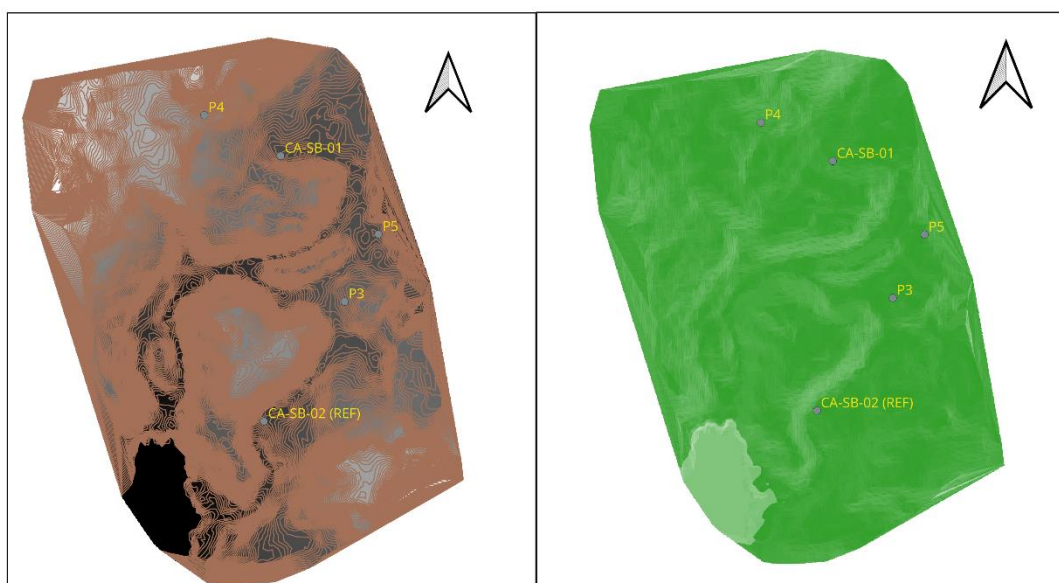


Nota. Datos generados en punto de monitoreo CA-SB-01, que por su comportamiento estos resultados se reflejan similares en las demás estaciones

Resultados en cumplimiento del segundo objetivo, que es determinar la topografía de la ciudad de Cerro de Pasco. En este contexto la figura 6 presenta el mapa topográfico de la ciudad de Cerro de Pasco elaborado a partir de curvas de nivel con una equidistancia vertical de 10 metros, permitiendo identificar las variaciones altitudinales y la configuración del relieve, evidenciando una topografía altamente irregular y compleja, característica de un entorno altoandino, con la presencia de

pendientes pronunciadas, depresiones y elevaciones diferenciadas que condicionan el comportamiento de los flujos atmosféricos. Se observa que los puntos de monitoreo se distribuyen sobre superficies con gradientes altitudinales distintos, destacando zonas elevadas asociadas a crestas y laderas, así como áreas más bajas vinculadas a depresiones y antiguos frentes de actividad minera.

Figura 6 Mapa que determina la topografía por medio de las curvas de nivel y el relieve



Nota. Curvas de nivel cada 10 metros

En cumplimiento al tercer Objetivo de determinar las condiciones meteorológicas y fuentes de contaminación por material particulado en la ciudad de Cerro de Pasco. La Tabla 7 muestra los parámetros meteorológicos registrados en la estación de vigilancia ambiental CA-SB-01 durante el mes de diciembre de 2018, donde caracteriza las condiciones atmosféricas que influyen en la dispersión y acumulación del material particulado PM10. Los resultados presentan temperaturas bajas, con un promedio de 5,8 °C y valores mínimos cercanos a 0,9 °C, que favorecen condiciones de estabilidad atmosférica, especialmente en horas nocturnas. La humedad relativa elevada, con un promedio de 78,3 % y valores máximos de hasta 99,3 %, que contribuye a la deposición del material particulado como a su posterior

resuspensión en periodos secos. La presión barométrica reducida, con un promedio de 457,7 mmHg, refleja la elevada altitud y condiciona la dinámica del flujo atmosférico. Por otra parte la velocidad del viento, con un promedio de 0,9 m/s y máximos de 2,6 m/s, indica la predominancia de condiciones de calma a brisa ligera, limitando la capacidad de dispersión del PM10 y favoreciendo su acumulación temporal en la superficie.

Tabla 7 *Parámetros meteorológicos*

Valores	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Presión barométrica (mmHg)	Velocidad del viento (m/s)	Precipitación (mm)
Mínimo	0,9	42,6	456,0	0,0	0,0
Promedio	5,8	78,3	457,7	0,9	0,0
Máximo	12,5	99,3	459,1	2,6	0,3

Nota. Registros de la estación de vigilancia ambiental CA-SB-01, diciembre de 2018

La Figura 7 identifica las principales fuentes de contaminación por material particulado PM10 que influyen directamente en el Centro Poblado de Champamarca, destacando la interacción entre actividades mineras y zonas de exposición poblacional. En el área de estudio se reconocen como fuentes las operaciones mineras históricas y actuales como la planta de Óxidos de Pasco S.A.C., las obras civiles asociadas a la ejecución del Plan de Cierre Ambiental del desmonte Excélsior y la relavera de Quiulacocha, los cuales presentan extensas superficies de suelo expuesto y material fino susceptible a procesos de resuspensión eólica. La proximidad espacial de estas fuentes con áreas urbanas y, particularmente, con la Institución Educativa Primaria N° 34037, evidencia un escenario de alta vulnerabilidad ambiental, en el cual las condiciones meteorológicas locales especialmente la baja velocidad del viento y la escasa precipitación favorecen la movilización y permanencia del material particulado en la atmósfera.

Figura 7 Fuentes de contaminación por material particulado C.P Champamarca



Nota. Ubicación del centro educativo primaria N° 34037

La Figura 8 muestra la localización de las fuentes de contaminación por material particulado PM10 en el Centro Poblado de Paragsha, asociadas a los depósitos de óxidos de Pasco identificados mediante las Resoluciones Directorales RD N° 024-2016 y RD N° 008-2017, así como a los depósitos y componentes operativos vinculados a las actividades de Cerro S.A.C., conforme a la RD N° 007-2017. En el área de estudio se observa la presencia de stock piles, botaderos y superficies de material fino expuesto, los cuales constituyen fuentes activas de generación de PM10 debido a procesos de remoción, transporte y resuspensión eólica. La proximidad inmediata de estos componentes mineros al parque infantil de Paragsha evidencia una situación de alta exposición ambiental, en la que las condiciones meteorológicas locales caracterizadas por bajas velocidades de viento y escasa precipitación favorecen la movilización del material particulado hacia zonas de uso recreativo y residencial.

Figura 8 Fuentes de contaminación por material particulado C.P Paragsha



Nota. Ubicación del parque infantil en relación de componentes principales de mina en el área de estudio

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.

Basándome en los datos de los informes de la OEFA, realice el análisis, obteniendo los hallazgos más significativos relacionados con el campo vectorial de la velocidad del viento para evaluar la dispersión del material particulado PM10. A continuación, se presenta una tabla resumida de los hallazgos:

Tabla 8 Comportamiento mensual de los parámetros del campo vectorial

Mes	Velocidad del Viento (m/s)	Dirección del Viento	Concentración PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentraciones de Metales en PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Junio	0,3 - 1,6 (ventolina)	Norte (N)	Hasta 64,4	Plomo (Pb): Hasta 0,030; Arsénico (As): Hasta 0,0021
Julio	1,6 - 3,4 (brisas ligeras)	Norte (N), Norte Noreste (NNE)	No excedió 100	Cadmio (Cd): Hasta 0,01620; Cobalto (Co): Hasta 0,0002
Agosto	0,0 - 2,8 (calmas a ventolina)	Norte (N), Norte Noreste (NNE)	No excedió 100	Cromo (Cr): Hasta 0,0055; Níquel (Ni): No detectado
Setiembre	0,1 - 2,5 (calmas a brisas ligeras)	Norte (N), Norte Noreste (NNE)	No excedió 100	Hierro (Fe): Hasta 1,502; Zinc (Zn): Hasta 0,112
Octubre	0,0 - 2,1 (calmas a ventolina)	Norte (N), Norte Noreste (NNE)	No excedió 100	Silicio (Si): Hasta 1,296; Estroncio (Sr): Hasta 0,0114

Nota. INFORME N° 359-2018-OEFA/DEAM-STECC y la 360-2018-OEFA/DEAM-STECC

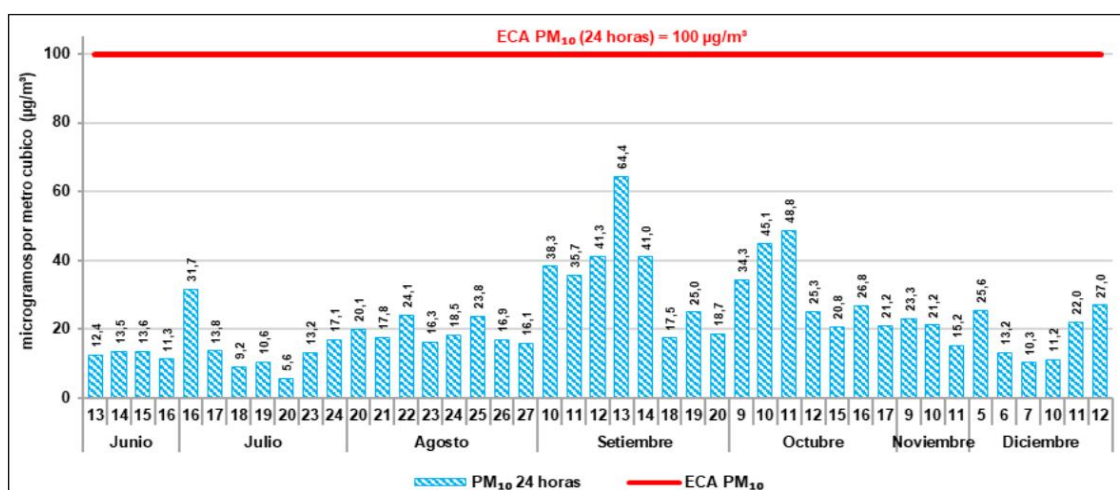
Los datos muestran que la velocidad y dirección del viento, junto con las concentraciones de PM₁₀ y metales en PM₁₀, varían a lo largo de los meses. La dirección predominante del viento desde el norte y norte-noreste evidencia un posible transporte de material particulado y metales desde fuentes ubicadas en estas direcciones. La variación en las concentraciones de PM₁₀ y metales refleja la influencia de la actividad humana, así como las condiciones meteorológicas sobre la dispersión de estos contaminantes.

La Figura 9 muestra la evolución temporal de las concentraciones de material particulado PM₁₀ medidas como promedio de 24 horas en la estación CA-SB-02 (Champamarca), durante el periodo comprendido entre junio y diciembre, contrastadas con el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para PM₁₀ de 100 µg/m³ establecido en la normativa peruana.

En los meses de junio y julio, las concentraciones de PM₁₀ se mantienen mayoritariamente en rangos bajos a moderados, con valores generalmente inferiores a 30 µg/m³, durante el mes de agosto, se aprecia un incremento progresivo de las concentraciones, con valores que alcanzan aproximadamente 35 µg/m³, en el mes de setiembre se registran los máximos históricos del periodo, alcanzando valores cercanos a 64,4 µg/m³ y se puede explicar por la presencia de velocidades de viento bajas a moderadas, direcciones predominantes del N y NNE, y una mayor influencia de fuentes emisoras locales.

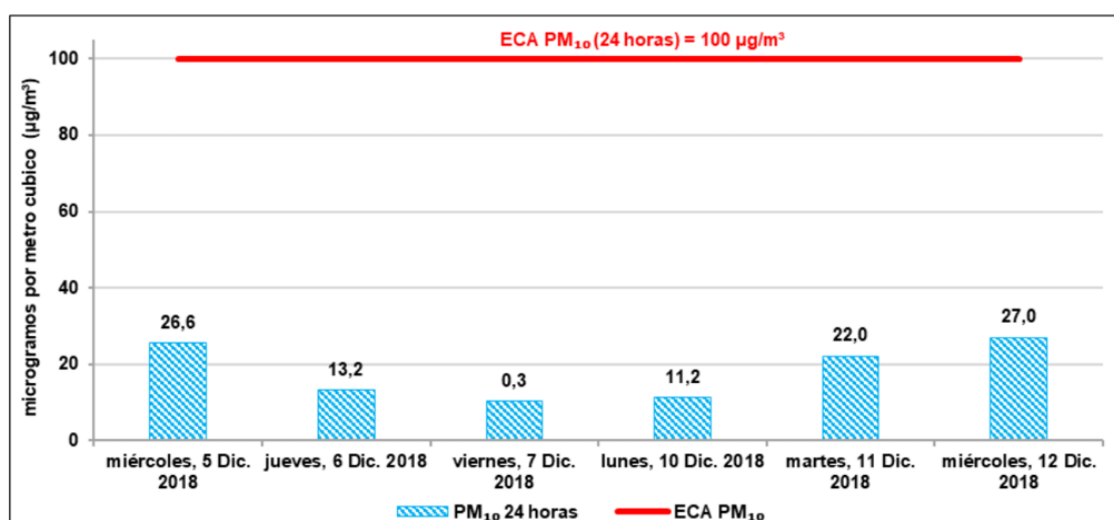
En el mes de octubre, las concentraciones disminuyen respecto al máximo de setiembre, aún se mantienen en valores relativamente elevados, del orden de 45–49 µg/m³, lo que indica una persistencia de condiciones atmosféricas que favorecen la acumulación parcial de PM₁₀. Posteriormente, en noviembre y diciembre, se evidencia una tendencia descendente, con concentraciones que retornan a niveles cercanos o inferiores a 25 µg/m³, asociadas a cambios estacionales, mayor ventilación atmosférica y eventos de precipitación que contribuyen al lavado atmosférico.

Figura 9 Comportamiento histórico de PM₁₀ en la estación CA-SB-02



La Figura 10 muestra el comportamiento diario de las concentraciones de material particulado PM₁₀ en la estación CA-SB-02 durante los primeros días del mes de diciembre de 2018, evidenciando valores que oscilan entre 0,3 µg/m³ y 27,0 µg/m³ como promedios de 24 horas, lo cual evidencia una alta variabilidad diaria asociada principalmente a condiciones meteorológicas favorables para la dispersión, como mayores velocidades de viento, así como a una menor resuspensión de material particulado.

Figura 10 PM₁₀ en la estación CA-SB-02

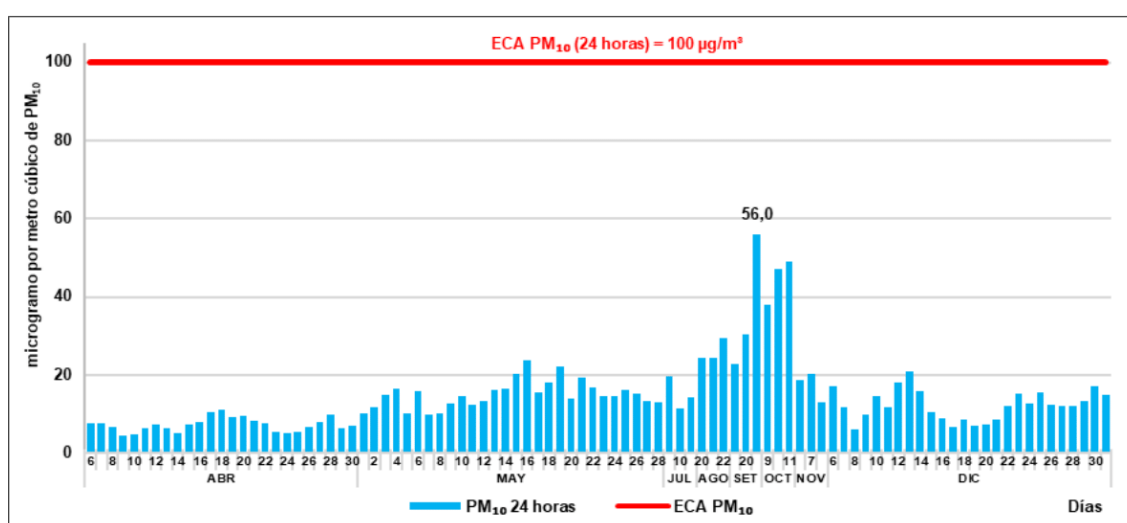


Nota. Mes de diciembre, día 12 (27 ug/m3)

La Figura 11 presenta el comportamiento histórico de las concentraciones de material particulado PM₁₀ en la estación CA-SB-01 para el periodo comprendido entre

abril y diciembre de 2018, se observa una variabilidad temporal marcada, con concentraciones relativamente bajas entre abril y junio, seguidas de un incremento progresivo hacia los meses de julio y agosto, alcanzando su máximo en septiembre con 56,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en los meses de octubre, noviembre y diciembre, las concentraciones muestran una tendencia descendente, retornando a niveles moderados; en particular, el registro del día 12 de diciembre alcanza un valor de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, reflejando condiciones atmosféricas más favorables para la dispersión del contaminante.

Figura 11 Comportamiento histórico de PM₁₀ en la estación CA-SB-01

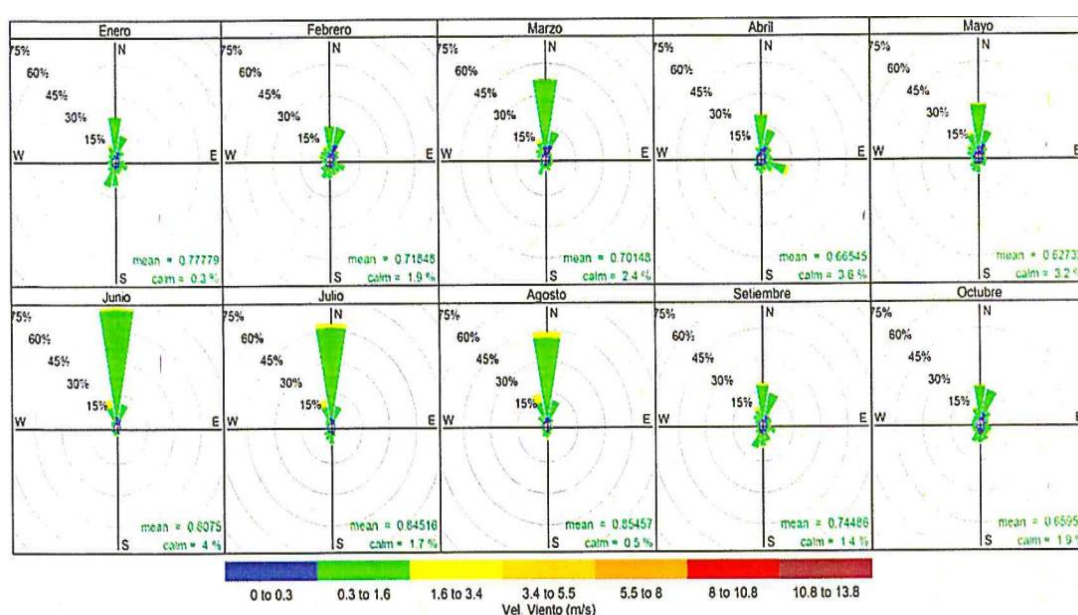


Nota. Registro desde abril hasta diciembre, día 12 (20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

La Figura 12, correspondiente a las rosas de viento mensuales en la estación CA-SB-01, caracterizado por la predominancia sostenida de vientos procedentes del norte (N) y norte-noreste (NNE), con variaciones estacionales asociadas a la intensidad de la velocidad del viento. Durante los meses de verano (enero a marzo), los vientos se concentran mayoritariamente en las categorías de calma (0,0–0,3 m/s) y ventolina (0,3–1,6 m/s), lo que evidencia condiciones limitadas de ventilación atmosférica y una menor capacidad de dispersión de contaminantes. En el periodo de otoño (abril a junio), este patrón direccional se mantiene, predominando igualmente vientos del N y NNE, con velocidades similares, principalmente entre calma y

ventolina, durante el invierno (julio a setiembre) se observa un incremento en la intensidad del viento, manteniéndose la dirección predominante del N y NNE, pero con velocidades correspondientes a ventolina y brisa ligera (1,6–3,4 m/s), favoreciendo una mayor capacidad de dispersión del material particulado.

Figura 12 Rosas de viento mensual en la estación CA-SB-01



Nota: Informe OEFA 359-2018-DREAM-STEAC

Modelamiento en el programa computacional MATLAB

Datos generados por las coordenadas UTM, Los puntos en metros se generan a partir de las diferencias de los puntos CA-SB-01, P3, P4 y P5 respecto de CA-SB-02, dichas diferencias se ubican en las columnas X, Y y Z en metros.

Tabla 9 Ubicación y dirección del viento

	Este	Norte	Altitud	UBICACIÓN EN METROS		
PUNTOS	UTMX	UTMY	UTMZ	X	Y	Z
CA-SB-02 (REF)	361113.4	8818006.9	4287	0	0	4287
CA-SB-01	361204.8	8819577.1	4258	91.4	1570.2	4258
P3	361583	8818717	4295	469.6	710.1	4295
P4	360756.35	8819816.59	4311	-357.05	1809.69	4311
P5	361779	8819117	4286	665.6	1110.1	4286

Para obtener el modelo matemático las ubicaciones en metros se convierten a kilómetros, luego se determina la velocidad de viento ubicando sus componentes de vectores unitarios en las columnas i, j y k

Modelo matemático del campo escalar obtenido por medio del ajuste de curvas

Linear model Poly12:

$$f(x,y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{11}xy + p_{02}y^2$$

$$Z = 4.287 + 0.3636X + -0.2219Y + -0.2094XY + 0.1283Y^2$$

Coefficients:

$$p_{00} = 4.287$$

$$p_{10} = 0.3636$$

$$p_{01} = -0.2219$$

$$p_{11} = -0.2094$$

$$p_{02} = 0.1283$$

De igual manera se obtienen las componentes de los vectores de velocidad de la velocidad del viento en función de la posición en el eje x, para ello se realizó una correlación entre las dimensiones de x y i.

Obteniendo los vectores en función de las posiciones x_i

Linear model Poly3:

$$u(x) = p_1x^3 + p_2x^2 + p_3x + p_4$$

$$u(X) = 2.819X^3 + -1.665X^2 + 0.1621X + 0.09857$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p_1 = 2.819 \quad (2.314, 3.324)$$

$$p_2 = -1.665 \quad (-1.897, -1.433)$$

$$p_3 = 0.1621 \quad (0.05963, 0.2646)$$

$$p_4 = 0.09857 \quad (0.07666, 0.1205)$$

Obteniendo los vectores en función de las posiciones y_j

Linear model Poly3:

$$f(x) = p_1x^3 + p_2x^2 + p_3x + p_4$$

$$v = 0.591Y^3 + -1.348Y^2 + 0.7388Y + 0.8046$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p_1 = 0.591 \quad (-4.466, 5.648)$$

$$p_2 = -1.348 \quad (-15.2, 12.5)$$

$$p_3 = 0.7388 \quad (-8.677, 10.15)$$

$$p_4 = 0.8046 \quad (-0.6217, 2.231)$$

Obteniendo los vectores en función de las posiciones z_k

General model Sin1:

$$f(x) = a_1\sin(b_1x+c_1)$$

$$w=0.2873\sin(26.99Z+ 136.8)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a_1 = 0.2873 \quad (-0.02475, 0.5993)$$

$$b_1 = 26.99 \quad (-75.33, 129.3)$$

$$c_1 = 136.8 \quad (-299.9, 573.5)$$

En la gráfica se localizan las posiciones y la concentración del material particulado PM10 como se visualiza.

Figura 13 Plano UTM XY

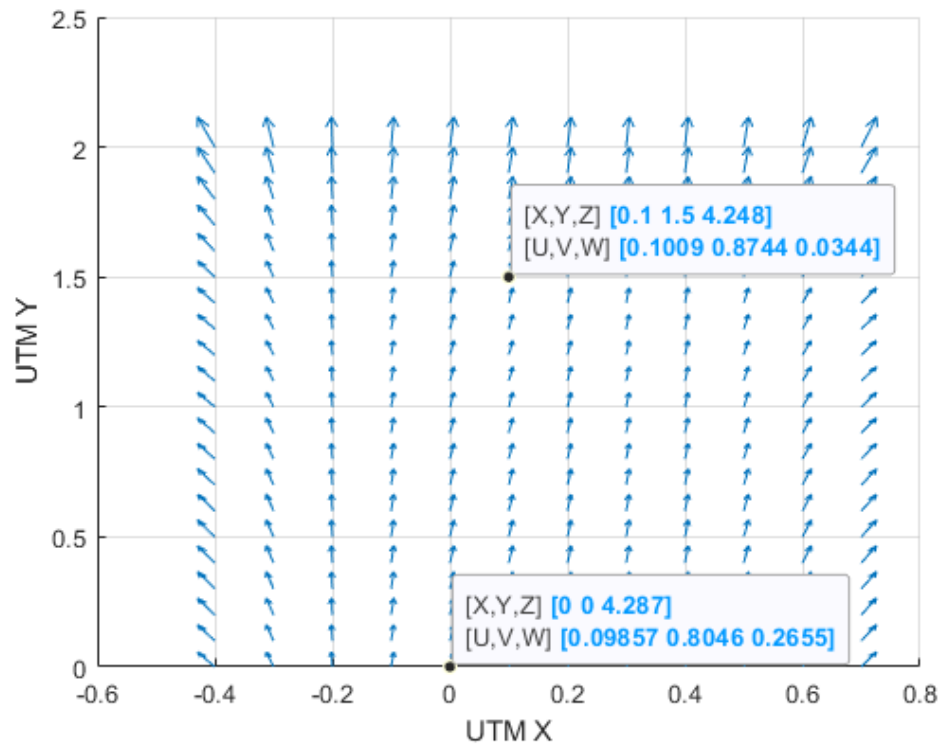
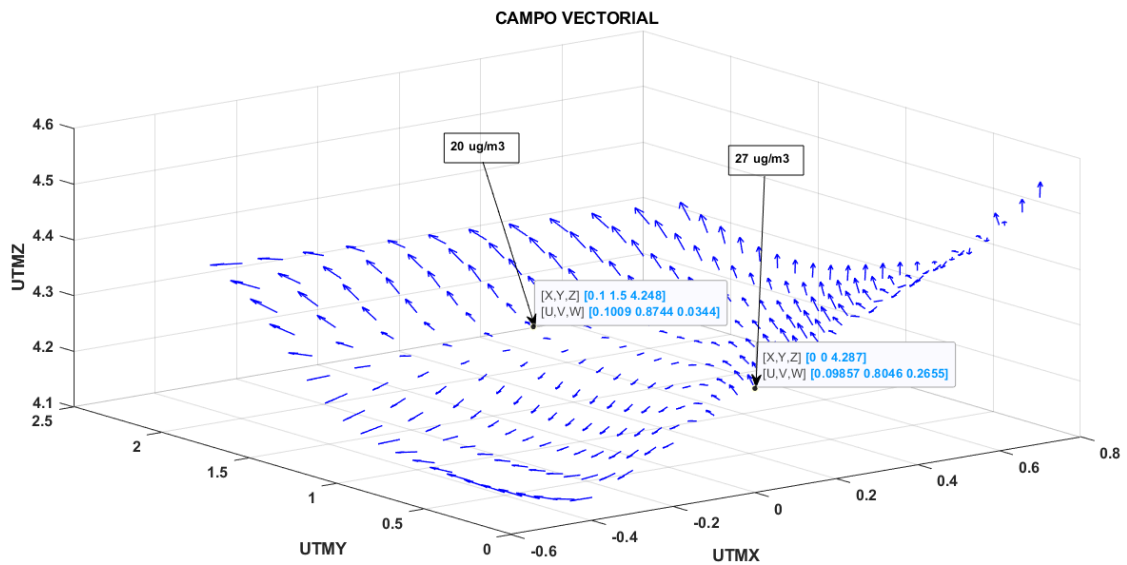


Figura 14 Campo vectorial del material particulado PM10

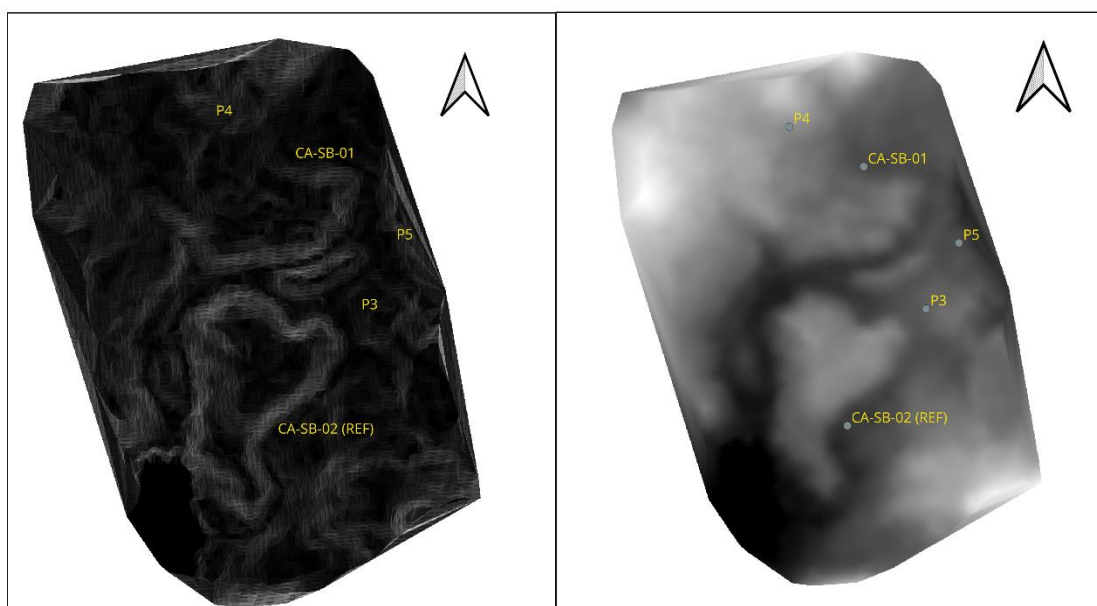


Nota. El campo vectorial productos de función quiver3 (X,Y,Z,u,v,w) en Matlab

La Figura 15, correspondiente al Modelo Digital de Elevación (MDE), representa de manera espacial y continua la variabilidad altitudinal del terreno, siendo un insumo para el análisis del campo vectorial de la velocidad del viento, el MDE

permite comprender la topografía influyente en la modificación local del campo vectorial, generando aceleraciones, desaceleraciones y cambios direccionales del viento que inciden directamente en los procesos de transporte, dispersión y acumulación del material particulado PM_{10} . La localización de los puntos de monitoreo (CA-SB-01, CA-SB-02 y puntos auxiliares P3, P4 y P5) sobre el modelo altimétrico permite interpretar la interacción entre relieve y dinámica atmosférica.

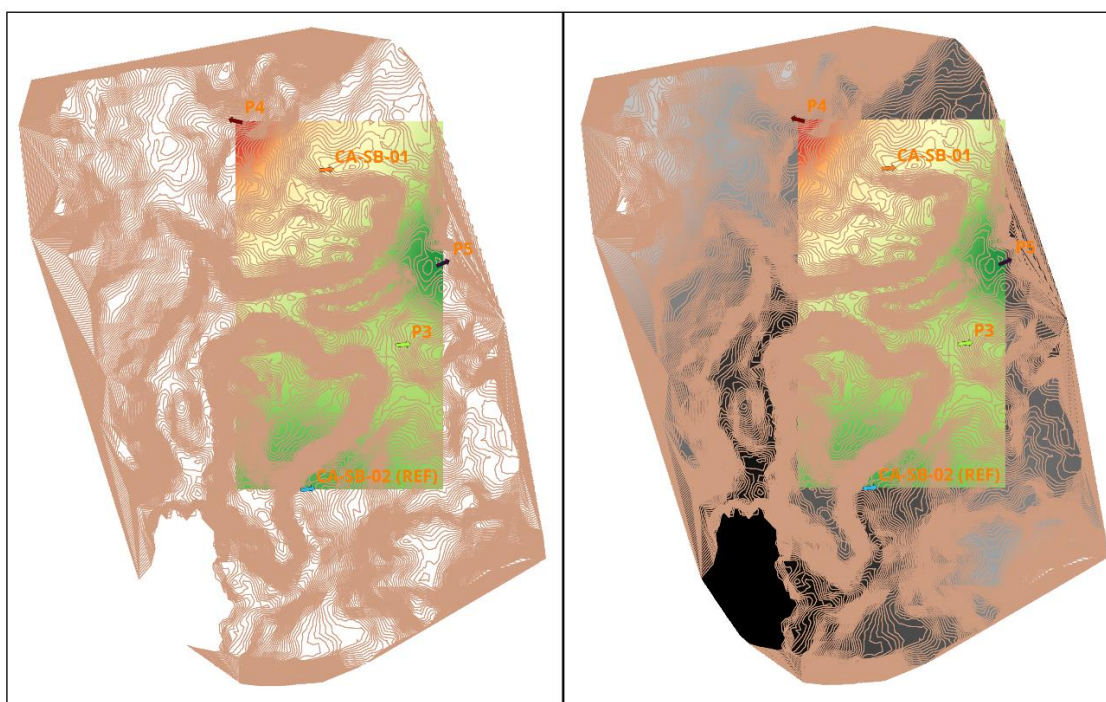
Figura 15 *Modelo digital de elevación de la zona de estudio*



Nota. Archivos ráster que representan la altitud del terreno en QGIS

La Figura 16, correspondiente al mapa de velocidad y dirección del viento, evidencia la distribución espacial del campo vectorial del viento en la zona de estudio, con velocidades comprendidas entre 0,76 y 1,23 m/s, rangos característicos de ventolina, lo que refleja un régimen de vientos de baja a moderada intensidad fuertemente condicionado por la topografía local. La representación de velocidad y dirección muestra cómo el flujo de aire que se ve modificado por el relieve, generando zonas de canalización, aceleración y desaceleración en función de las pendientes y diferencias altitudinales, particularmente en los sectores donde se ubican los puntos de monitoreo CA-SB-01, CA-SB-02 (REF) y los puntos P3, P4 y P5.

Figura 16 Mapa de velocidad y dirección de viento



Nota. Velocidad de viento en m/s de 0.76 hasta 1.23

4.3. Prueba de Hipótesis

Hipótesis General

H1 ($u \neq 2\text{m/s}$): El campo vectorial del viento condicionado por su topografía, limita significativamente la capacidad de dispersión atmosférica del PM10

H0 ($u = 2\text{m/s}$): El campo vectorial del viento condicionado por su topografía, no limita significativamente la capacidad de dispersión atmosférica del PM10

Interpretación. Utilizando la Tabla 6 y Tabla 7 donde la media de la velocidad (que es $\sim 0.9\text{ m/s}$) y se demuestran estadísticamente (prueba T para una muestra) que es significativamente menor a 2.0 m/s (umbral donde inicia la dispersión efectiva), confirmando las condiciones de calma mencionadas en el texto, Con un nivel de confianza del 95%, la prueba t-Student ($t_4 = -12.49$, $p < 0.001$) se rechaza la hipótesis nula, confirmando la deficiente capacidad de dilución atmosférica del PM10 en la zona

Tabla 10 Evaluación de la capacidad de dispersión atmosférica del PM10

Prueba para una muestra						
Valor de prueba = 2 m/s						
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
WS4280M	-12,488	4	,000	-1,05695	-1,2919	-,8220

Hipótesis específica 1

H1. La magnitud del viento con una dirección Noreste (NE) dirige los contaminantes hacia las zonas residenciales durante los periodos diurnos.

H0. La magnitud del viento con una dirección Noreste (NE) no dirige los contaminantes hacia las zonas residenciales durante los periodos diurnos.

Interpretación. De igual manera con los datos de la Tabla 6, donde los puntos de monitoreo 4 de los 5 puntos (CA-SB-02, CA-SB-01, P3, P5) marcan direcciones entre 66° y 85° (NE). Asimismo, la Rosa de Vientos (Figura. 6) muestra la frecuencia diurna, demostrando que la frecuencia de vientos NE no es aleatoria, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula.

Hipótesis específica 2

H1. La irregularidad topográfica modifica el flujo laminar del viento, generando variaciones vectoriales locales significativas.

H0. La irregularidad topográfica modifica el flujo laminar del viento, generando variaciones vectoriales locales significativas.

Interpretación. Contrastando estadísticamente el punto P4 (Dirección 284°, Velocidad 1.23 m/s) contra el promedio de los otros puntos (Dirección aproximado 80° y Velocidad de en promedio 0.8 m/s) mostrados en la Tabla 7. Esta diferencia vectorial valida que la topografía descrita en la Figura 7 modifica el flujo, mayor detalle figura 15 y 16.

Hipótesis específica 3

H1. La proximidad espacial de fuentes activas de emisión a receptores sensibles, favorece la suspensión del PM10.

H0. La proximidad espacial de fuentes activas de emisión a receptores sensibles, no favorece la suspensión del PM10.

Interpretación. Empleando la Tabla 10 (Humedad 78.3%, Temp 5.8°C) y las Figuras 14 y 16 que muestran la distancia física (proximidad) del Botadero Excelsior a la escuela N° 34037. Se valida que esos valores meteorológicos corresponden a clases de estabilidad que impiden la dispersión vertical, mayor detalle ver figura 15.

4.4. Discusión de resultados

Los resultados evidencian que la dirección predominante del viento se concentra mayoritariamente en los cuadrantes Norte (N) y Norte–Noreste (NNE) a lo largo del periodo analizado, con una magnitud media de velocidad comprendida entre 0,3 m/s y 1,6 m/s, clasificándose principalmente como vientos tipo calma (0–0,3 m/s) y ventolina (0,3–1,6 m/s). Este rango de velocidades indica una baja capacidad de dispersión atmosférica, favoreciendo la acumulación local de material particulado PM10 en áreas cercanas a las fuentes emisoras.

Desde el punto de vista estadístico, la predominancia de velocidades menores a 2 m/s resulta crítica, ya que diversos estudios señalan que velocidades inferiores a este umbral reducen significativamente el coeficiente de difusión horizontal y vertical del material particulado. Cichowicz et al. (2020) demostraron que, en entornos urbanos, velocidades de viento inferiores a 1,5 m/s incrementan las concentraciones de PM10 hasta en un 30–45 % respecto a escenarios con vientos moderados, debido a la limitada ventilación atmosférica. De manera similar, Adly y Saleh (2025) identificaron correlaciones negativas estadísticamente significativas entre velocidad del viento y concentración de PM10 ($r < -0,60$), lo que respalda los resultados obtenidos en Cerro de Pasco.

En el contexto nacional, Picoy Villanueva (2022) reportó que en el centro poblado de Champamarca, velocidades promedio del viento cercanas a 1,2 m/s presentaron una correlación positiva con la dispersión del PM10 ($r = 0,68$), aunque insuficiente para evitar episodios de acumulación cuando coexistían fuentes mineras

activas. Por lo tanto, los valores de velocidad registrados en la presente investigación confirman que la magnitud del viento no es suficiente para garantizar una dispersión eficiente del PM₁₀, especialmente en periodos de estabilidad atmosférica.

Respecto al análisis topográfico, sustentado en el Modelo Digital de Elevación (MDE) de las imágenes satelitales LANDSAT_8 de fecha 16 de junio del 2023, evidencia que la ciudad de Cerro de Pasco se emplaza a una altitud promedio superior a los 4 300 m.s.n.m., con una topografía altamente irregular caracterizada por pendientes pronunciadas, depresiones locales y zonas de encajonamiento urbano-minero. Estas condiciones geomorfológicas influyen directamente en la configuración del campo vectorial del viento, generando efectos de bloqueo orográfico, canalización y turbulencia mecánica.

Desde una perspectiva físico-atmosférica, la presencia de relieves elevados y estructuras mineras actúa como barreras que reducen la energía cinética del viento, disminuyendo su capacidad de transporte de partículas. Fernández-Pacheco et al. (2023) demostraron que en terrenos complejos, las concentraciones de PM₁₀ pueden incrementarse entre 20 % y 40 % respecto a áreas planas, debido a la formación de zonas de recirculación del flujo de aire. Este comportamiento resulta coherente con lo observado, donde los sectores ubicados a sotavento de los componentes mineros presentan mayor susceptibilidad a la acumulación de contaminantes.

Adicionalmente, Arregocés y Rojano (2023) evidenciaron que parámetros topográficos como el radio de influencia del terreno (TERRAD) y la resolución espacial influyen significativamente en la estimación de PM₁₀, especialmente en zonas mineras con relieve complejo. Aunque la presente investigación no emplea modelación CALPUFF, los patrones observados empíricamente coinciden con estos hallazgos, reafirmando que la topografía de Cerro de Pasco constituye un factor estructural que limita la dispersión del material particulado, incluso bajo condiciones de viento constante.

Con relación a las condiciones meteorológicas registradas durante el periodo de estudio muestran un escenario caracterizado por baja velocidad del viento, temperaturas medias bajas, escasa precipitación y estabilidad atmosférica frecuente, condiciones que favorecen la permanencia del PM10 en la capa baja de la atmósfera. Estas variables, analizadas de manera integrada, explican el comportamiento observado en las concentraciones promedio mensuales de PM10, las cuales presentan incrementos en periodos de menor ventilación.

En términos de fuentes de contaminación, se identifican como principales emisores las operaciones mineras activas y pasivas, incluyendo los depósitos de óxidos, relaveras, botaderos de desmontes, obras civiles del plan de cierre ambiental Excélsior, así como el tránsito vehicular en vías no pavimentadas. Estas fuentes generan partículas primarias que, bajo la acción del viento, son fácilmente resuspendidas. García y Swayne (1997) ya advertían que la resuspensión de partículas finas depende críticamente de la interacción entre velocidad del viento y características superficiales del suelo.

A nivel comparativo, Jenkins et al. (2022) demostraron que, en escenarios con fuentes naturales o antrópicas de polvo, concentraciones diarias de PM10 pueden superar ampliamente los $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ cuando coinciden con condiciones meteorológicas desfavorables. Si bien en la ciudad de Cerro de Pasco los valores promedio no alcanzan dichos extremos, estudios locales como Huaricapcha Alania (2024) evidencian que las concentraciones se aproximan peligrosamente a los Estándares de Calidad Ambiental, configurando un riesgo crónico acumulativo para la población expuesta.

En el ámbito nacional, Enriquez Vicuña (2021) reportó concentraciones de PM10 de hasta $145 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Arequipa, asociadas a condiciones de viento y fuentes locales, lo que refuerza la necesidad de interpretar los resultados de Cerro de Pasco desde un enfoque preventivo.

La importancia y el impacto del estudio del campo vectorial de la velocidad del viento para evaluar la dispersión del material particulado PM10 son significativos en el ámbito de la ingeniería ambiental y el cumplimiento normativo. Esta evaluación ayuda a entender los patrones de dispersión de contaminantes en el aire y también contribuye al diseño e implementación de estrategias de mitigación eficaces para mejorar la calidad del aire. Comparando los resultados de nuestra discusión hipotética y análisis estadístico con los antecedentes y metodologías mencionadas, se destaca su gran relevancia.

CONCLUSIONES

Con respecto al primer objetivo, se concluye que la dirección y magnitud del viento en la ciudad de Cerro de Pasco se caracterizan por un régimen predominantemente débil, con velocidades medias comprendidas entre 0,76 m/s y 1,24 m/s y una media general aproximada de 0,90 m/s a una altitud de 4 280 m s.n.m. Estos valores corresponden principalmente a condiciones de calma y ventolina, claramente inferiores al umbral de 2,0 m/s considerado como referencia para una dispersión atmosférica eficiente. La prueba t-Student para una muestra confirmó estadísticamente esta condición, obteniéndose un valor $t = -12,49$ con $p < 0,001$, lo que evidencia que la velocidad del viento es significativamente menor al valor crítico de dispersión. Asimismo, la dirección predominante del viento se concentró entre 66° y 85° (N–NNE) en 4 de los 5 puntos de monitoreo, patrón corroborado por las rosas de viento mensuales, especialmente en los periodos diurno y vespertino.

En relación con el segundo objetivo, los resultados evidencian que la topografía de la ciudad de Cerro de Pasco, caracterizada por una morfología altoandina altamente irregular, constituye un factor determinante en la modificación local del campo vectorial del viento. El análisis del Modelo Digital de Elevación y de las curvas de nivel con equidistancia de 10 m permitió identificar pendientes pronunciadas, depresiones y elevaciones asociadas a frentes mineros y botaderos, generando efectos de canalización, bloqueo orográfico y recirculación del flujo atmosférico. Esta influencia topográfica se reflejó claramente en el punto P4, donde se registró una dirección de viento de 284° y una velocidad media de 1,24 m/s, contrastando significativamente con el promedio de los demás puntos, que presentaron direcciones cercanas a 80° y velocidades alrededor de 0,80 m/s. Esta diferencia vectorial confirma que la irregularidad del relieve altera el flujo laminar del viento, produciendo variaciones espaciales significativas que condicionan la dispersión del PM10.

Finalmente, en función del tercer objetivo, se destaca que las condiciones meteorológicas locales y la proximidad de fuentes mineras activas y pasivas configuran un escenario altamente desfavorable para la dispersión del material particulado PM10 en la ciudad de Cerro de Pasco. Los registros meteorológicos evidenciaron temperaturas promedio

bajas (5,8 °C), humedad relativa elevada (78,3 %) y presión barométrica reducida (457,7 mmHg), condiciones típicas de estabilidad atmosférica en zonas altoandinas, las cuales limitan la dispersión vertical del contaminante. La velocidad promedio del viento fue de 0,9 m/s, con máximos de apenas 2,6 m/s, reforzando la predominancia de regímenes de baja ventilación, las concentraciones mensuales de PM10 alcanzaron valores máximos de hasta 64,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en septiembre, coincidiendo con periodos de baja velocidad del viento y direcciones dominantes N–NNE, además de la presencia de metales asociados como Fe (hasta 1,502 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y Zn (hasta 0,112 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). La cercanía espacial de fuentes como el botadero Excélsior, la planta de Óxidos de Pasco S.A.C. y los depósitos de Paragsha respecto a receptores sensibles (institución educativa N° 34037 y parque infantil) incrementa el riesgo de exposición crónica.

RECOMENDACIONES

Seleccionar estratégicamente las ubicaciones de las estaciones de monitoreo del viento y del material particulado PM10. Estas estaciones deben ubicarse en puntos que representen tanto las áreas de emisión como las de exposición potencial de la población. La selección de ubicaciones debe basarse en un estudio previo de la topografía local y los patrones de asentamiento urbano, garantizando así que los datos capturados reflejen adecuadamente la dispersión real de los contaminantes a través de diferentes sectores de la ciudad.

Implementar el uso de tecnología avanzada y bien calibrada es esencial para obtener mediciones precisas de la velocidad y dirección del viento, así como de las concentraciones de PM10. Los equipos deben ser capaces de registrar datos en un rango amplio de condiciones meteorológicas y deben ser mantenidos y calibrados regularmente para asegurar la integridad de los datos. La selección del equipo adecuado puede variar según las condiciones climáticas específicas del área de estudio y los objetivos específicos del monitoreo.

Utilizar modelos de dispersión atmosférica avanzados, como AERMOD o CALPUFF, es fundamental para interpretar los datos obtenidos y predecir la dispersión del PM10 en diferentes condiciones meteorológicas. Estos modelos permiten simular cómo las variaciones en la velocidad y dirección del viento afectan la dispersión de contaminantes, proporcionando una herramienta valiosa para la evaluación de impacto ambiental y la planificación de estrategias de mitigación. Es importante validar los modelos con datos reales regularmente para asegurar su precisión y relevancia.

Integrar los datos de velocidad y dirección del viento con otros datos ambientales y meteorológicos, como temperatura, humedad, y precipitación, es crucial para una comprensión completa de la dinámica de dispersión del PM10. Esta integración permite a los investigadores y a las autoridades entender mejor cómo las interacciones entre diferentes variables ambientales afectan la concentración y dispersión de partículas. La colaboración

con meteorólogos y otros especialistas en ciencias ambientales puede enriquecer el análisis y mejorar la interpretación de los resultados.

Establecer un programa de monitoreo continuo es esencial para evaluar la efectividad de las políticas implementadas y para detectar cambios en los patrones de dispersión del PM10 a lo largo del tiempo. Este monitoreo no solo ayuda a identificar episodios agudos de contaminación, sino que también permite a los investigadores y planificadores urbanos observar tendencias a largo plazo y ajustar las estrategias de mitigación según sea necesario. Además, el análisis de tendencias a largo plazo proporciona datos valiosos para estudios epidemiológicos y de impacto en la salud pública.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adly, M., & Saleh, M. (2025). Assessment of PM10 and PM2.5 concentrations and their relation to meteorological parameters at three sites in Makkah over the 2020–2024 period. *Atmosphere*, 16(4), 415. <https://doi.org/10.3390/atmos16040415>
- Arregocés, H. A., & Rojano, R. (2023). Sensitivity of the CALMET–CALPUFF model system on estimating PM10 concentrations at a mining site in northern Colombia. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7, 100402. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100402>
- Cichowicz, R., Wielgosiński, G., & Fetter, W. (2020). Dispersion of atmospheric air pollution in urban areas under low wind speed conditions. *Atmospheric Environment*, 230, 117–507. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117507>
- Chávez Limay, M. V. (2023). Determinación de la calidad del aire por PM10 y su relación con los factores meteorológicos de humedad y temperatura en el distrito de Santa Anita – provincia de Lima durante los años 2018 al 2022 [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana].
- Cichowicz, R., Wielgosiński, G., & Fetter, W. (2020). The effect of meteorological factors on PM10 concentrations in air in the winter season in the city of Zabrze, Poland. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 77, 189–202. <https://doi.org/10.1007/s10874-020-09401-w>
- Dialnet. (2023). El uso de modelos de dispersión como AERMOD para estimar la dispersión del material particulado en relación con la velocidad del viento. <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/6096112.pdf>
- Enriquez Vicuña, J. F. (2021). Caracterización del material particulado para la evaluación de la calidad del aire en el Ovalo San Lázaro - Arequipa [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/82949/Enriquez_VJF-SD.pdf?sequence=1

- Fernández-Pacheco, V. M., Álvarez-Álvarez, E., Blanco-Marigorta, E., & Ackermann, T. (2023). CFD model to study PM10 dispersión in large-scale open spaces. *Scientific Reports*, 13, 5966. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33122-3>
- García, J., & Swayne, G. (1997). Monitoreo de material particulado en emisiones. *Revista de Química*, 11(1), 59–72.
- Gaviria, C., Benavides, P., & Tangafire, C. (2011). Contaminación por material particulado (PM2,5 y PM10) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009). *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-386X2011000300004
- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). Metodología de la investigación: las tres rutas cuantitativa, cualitativa y mixta (Vol. 1). McGraw-Hill.
- Huaricapcha Alania, C. W. (2024). Evaluación de la calidad de aire del Centro Poblado de Colquijirca influenciado por la producción del tajo norte de la Sociedad Minera El Brocal – 2023 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional UNDAC.
- Infobae. (2023, 23 de septiembre). Contaminación del aire en Perú: el 58% proviene del parque automotor. <https://www.infobae.com/peru/2023/09/23/contaminacion-del-aire-en-peru-el-58-proviene-del-parque-automotor/>
- Jenkins, G. S., Yorke, C., Camara, M., Diawara, A., & Sylla, M. B. (2022). WRF-CHEM simulations of unhealthy PM10 concentrations during four dust events in Senegal. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(19), e2022JD036798. <https://doi.org/10.1029/2022JD036798>
- Lee, D., Kang, H., Choi, Y., Chae, Y., & Kim, Y. (2025). Integrating CFD simulation and machine learning to analyze fine dust dispersion characteristics in densely built urban environments. *Land*, 14(3), 632. <https://doi.org/10.3390/land14030632>

- Li, Z., Tanzer-Gruener, R., Presto, A., Adams, P., & Singh, S. (2025). Simulations of near-source wind development and pollution dispersion over complex terrain under different thermal conditions. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.07050>
- Linda, A., Ganbat, G., Nadeem, I., Adamu, B., & Park, S. (2025). Modeling wind-induced resuspension of PM10 in urban street canyons: A CFD study. npj Climate and Atmospheric Science, 8, Artículo 30. <https://doi.org/10.1038/s41612-025-00969-2>
- Medina Luque, Y. D., & Quispe Ccuno, F. S. (2022). Material particulado PM10 y el tráfico vehicular en la salida Lampa (tramo Jr. Kantú—Jr. América) de la ciudad de Juliaca, 2022 [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2018a). *Informe N.º 359-2018-OEFA/DEAM-STEAC: Monitoreo ambiental de calidad de aire en el distrito de Simón Bolívar, Cerro de Pasco*. OEFA.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2018b). *Informe N.º 360-2018-OEFA/DEAM-STEAC: Evaluación de material particulado PM10 y metales asociados en Cerro de Pasco*. OEFA
- Orjuela Mendoza, J. P. (2012). Modelo de concentraciones de material particulado en corredores viales de Bogotá [Tesis de grado, Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/11570/u608324.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Picoy Villanueva, J. A. (2022). Dispersión del material particulado PM10 y PM2,5 y su relación con los factores meteorológicos en el centro poblado de Champamarca, distrito de Simón Bolívar, Pasco [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional UNDAC.
- Rivera Tiza, P. (2022). Simulación de la concentración de contaminantes atmosféricos provenientes de las fuentes de la Unidad Minera El Porvenir en el Centro Poblado San Juan de Milpo, Pasco [Tesis de maestría, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional UNDAC.

- Salas Orihuela, T. (2023). Evaluación del material particulado PM10 de plomo (Pb) para determinar su tendencia aplicando el modelo ARIMA en el distrito de Chaupimarca, Pasco [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional UNDAC.
- Santos Sanche, G. (2017). Validez y confiabilidad del cuestionario de calidad de vida SF-36 en mujeres con LUPUS, Puebla [Tesis de grado, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla].
- Universidad Libre. (2022). La evaluación de la calidad del aire, tomando en cuenta la concentración y dispersión del material particulado PM10. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/19179/DOCUMENTO%20FINAL.pdf?sequence=1>
- Universidad Nacional Federico Villarreal. (2023). Análisis de los factores meteorológicos que influyen en la dispersión, como la velocidad del viento. https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13084/7918/UNFV_FIGAE_Abanto_Trujillo_Bryan_Titulo_profesional_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Zeydan, Ö., & Karademir, A. (2023). Comparison of two air quality models in complex terrain near seashore. *Atmósfera*, 37(1), 1–17. <https://doi.org/10.20937/atm.53118>
- Zhou, H., Gao, B., & Deng, F. (2023). Dust diffusion in large-scale urban construction combining WRF and CALPUFF model—Take Xiamen as an example. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 31(4), 288–306. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2023.20044>

ANEXOS

Instrumentos de Recolección de Datos

Anexo 1. Certificado de calibración de los equipos



Certificado de Calibración

LF - 4212017

Pág. 1 de 1

1. Cliente : ORGANISMO DE EVALUACION Y FISCALIZACION AMBIENTAL - OEFA

2. Dirección : Av. Faustino Sánchez Carrión Nro. 603 Lima - Jesús María

3. Datos del Instrumento

.Instrumento de Medición	: Muestreador de Partículas	.N° de serie del venturi	: P9327 X
.Marca	: Thermo Scientific	.Flujo	: 1,13 m³/min
.Modelo	: Volumétrico	.Motor	: 1 HP / 220V
.Identificación	: 60226409-0028		

4. Lugar de Calibración : Laboratorio de Flujo de Aire - Green Group PE S.A.C.

5. Fecha de Calibración : 2017-09-04

6. Método de Calibración

La calibración fue realizada de acuerdo al EPA Compendium Method IO - 2.1.

7. Condiciones Ambientales.

	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%h.r)	Presión Atmosférica (mbar)
Inicial	24,2	51,6	999,9
Final	24,6	50,3	1000,0

8. Trazabilidad.

Patrón Usado	Código Interno	N° Serie /Certificado	F. Vencimiento
Calibrador Variflow Tisch / TE-5028A	GGP-75	336N	2018-08-03
Manómetro Diferencial Digital	GGP-23	LFP-305-2016	2017-09-05
Barómetro	GGP-02	LFP-227-2017	2019-07-04
Termómetro	GGP-02	T-1553-2017	2019-06-08

9. Resultados

Ta (°K)	297	Presión (in hg) :	29,52	Slope :	0,96829
Ta (°C)	24,4	Pa (mmHg)	750,0	Int :	-0,01889

Corrida	Orificio	Qa	Muestreador	Pf	Look Up	% de
Número	"H2O	m³/min	"H2O	mm Hg	Po/Pa	Diferencia
1	3,20	1,182	10,06	18,769	0,975	1,52%
2	3,15	1,174	12,07	22,517	0,970	1,70%
3	3,09	1,162	14,06	26,232	0,965	2,15%
4	3,05	1,154	16,04	29,928	0,960	2,34%
5	2,99	1,143	18,02	33,630	0,955	2,71%

Incertidumbre de medición: 0,015 m³/min

10. Observaciones

a) El método de referencia establece que se debe tener un % de diferencia menor al +/- 4%.

b) El tiempo mínimo de estabilización del motor antes de la calibración fue de 15 minutos.

c) La calibración se realizó con motor Thermo Scientific 2340.

La Incertidumbre de medición expandida reportada es la incertidumbre de medición estándar multiplicada por el factor de cobertura $k=2$ de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%.

Los resultados emitidos son válidos solo para el motor instalado y venturi calibrado, en el momento de la Calibración.

Se recomienda al usuario recalibrar a intervalos adecuados, los cuales deben ser elegidos en base a las características del instrumento.

La incertidumbre de medida en el presente certificado ha sido estimado siguiendo las directrices de: "Guía para la expresión de la incertidumbre de medida" primera edición, septiembre 2008 CEM.

El certificado de Calibración solo puede ser difundido completamente y sin modificaciones, sin firma y sellos carecen de validez.

Fecha de Emisión: 2017-09-07

Jefe de Laboratorio de Calibración

Enzo Barrera



Av. Aviación 4210 - Surquillo

Central: 560-6134 / 273-3550

FO-[LC-PR-01]-03

www.greengroup.com.pe

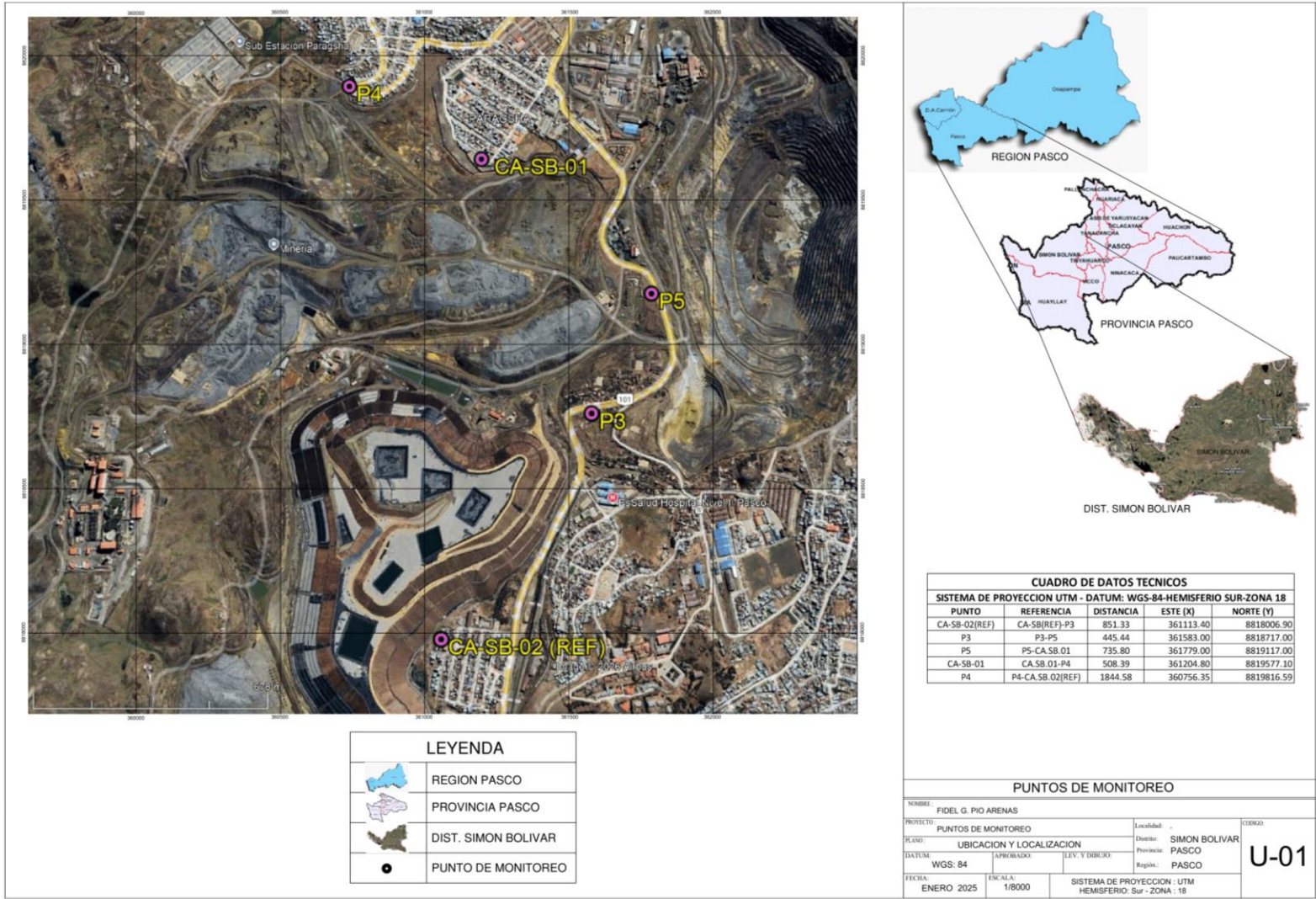
"EL USO INDEBIDO DE ESTE CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY"

Anexo 2 Matriz de consistencia

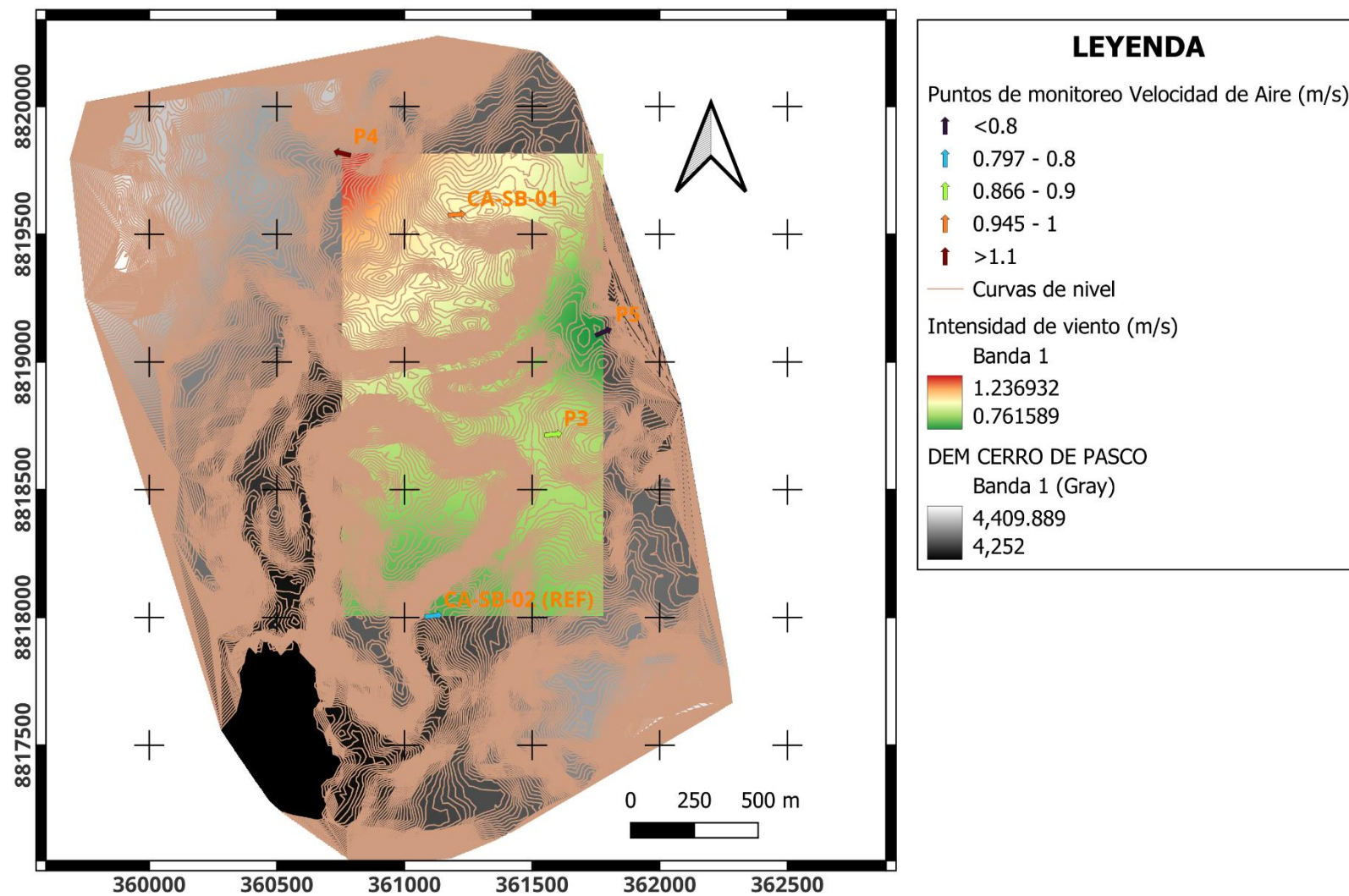
Título: “Campo vectorial de la velocidad del viento para evaluar la dispersión del material particulado PM10 en la ciudad de Cerro de Pasco”

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES E INDICADORES	MUESTRA	DISEÑO	ESTADISTICA
Problema General ¿Cuál es el “Campo vectorial de la velocidad del viento para evaluar la dispersión del material particulado PM10 en la ciudad de Cerro de Pasco”?	Objetivo General Determinar el “Campo vectorial de la velocidad del viento para evaluar la dispersión del material particulado PM10 en la ciudad de Cerro de Pasco”	Hipótesis General El campo vectorial del viento condicionado por su topografía, limita significativamente la capacidad de dispersión atmosférica del PM10	V.I Campo vectorial de viento	Población Velocidad del viento en la ciudad de Cerro de Pasco	Método Hipotético - deductivo	 Estadística Inferencial
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	V.D	Muestra	Nivel de investigación	Validación de hipótesis
¿Cuál es la dirección y magnitud del viento en la ciudad de Cerro de Pasco?	Determinar la dirección y magnitud del viento en la ciudad de Cerro de Pasco	La magnitud del viento con una dirección Noreste (NE) dirige los contaminantes hacia las zonas residenciales durante los periodos diurnos.	Dispersión de material particulado PM10	Muestreo intencionado no probabilístico	Explicativo	Pruebas paramétricas
¿Cuál es la topografía de la ciudad de Cerro de Pasco?	Determinar la topografía de la ciudad de Cerro de Pasco	La irregularidad topográfica modifica el flujo laminar del viento, generando variaciones vectoriales locales significativas.			Diseño	T Student
¿Cuáles son las condiciones meteorológicas y fuentes de contaminación por material particulado en la ciudad de Cerro de Pasco?	Determinar las condiciones meteorológicas y fuentes de contaminación por material particulado en la ciudad de Cerro de Pasco	La proximidad espacial de fuentes activas de emisión a receptores sensibles, favorece la resuspensión del PM10.			No experimental	

Anexo 3. Mapa detallado de los puntos de monitoreo



Anexo 4. Mapa de velocidad de viento



Anexo 5. Código de campo vectorial con el Matlab

```
[X,Y]=meshgrid(-0.4:0.1:0.7,0:0.1:2);  
Z= 4.287 + 0.3636.X + -0.2219.Y + -0.2094.X.Y + 0.1283Y.^2;  
u=2.819.X.^3-1.665.X.^2+0.1621.X+0.09857  
v=0.591.Y.^3-1.348.Y.^2+0.7388.Y+0.8046  
w=0.2873sin(26.99Z+136.8)  
quiver3(X,Y,Z,u,v,w)
```

Anexo 6. Toma de puntos con la estación total

