



La investigación, su esencia y arte.

**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y AMBIENTAL
TESIS**

**“DISPERSIÓN Y BALANCE DE ENERGIA POR MATERIAL PARTICULADO
EN EL DISTRITO DE AHUAYCHA, 2024”**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Forestal y Ambiental

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Seguridad Ambiental y adaptación al cambio climático.

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE:

Acción por el clima.

CAMPO DE LA INVESTIGACIÓN Y EL DESARROLLO OCDE:

1.05.00-Ciencias de la Tierra y Ciencias Ambientales.

PRESENTADO POR:

Bach. MENDEZ FELIX, Efrain

(ORCID: [0000-0002-8543-7644](https://orcid.org/0000-0002-8543-7644))

ASESOR:

Dr. ÁNGELES SUAZO, Julio Miguel

(ORCID: [0000-0001-8327-9032](https://orcid.org/0000-0001-8327-9032))

Ahuaycha - Perú

2025

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS EN LA MODALIDAD PRESENCIAL
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL**

Expediente N° 12-2025-UNAT/FI-EPIFA

Página 1 de 1

En esta acta, se hace constar que en el auditorium de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, ubicado en el distrito de Ahuaycha, provincia de Tayacaja, departamento Huancavelica, el día **23 de setiembre del 2025**, a las **16:00** horas, se reunieron los miembros del Jurado Calificador designados con Resolución de Coordinación N° 66-2024-UNAT/FI de 24 de octubre del 2024 con el propósito de llevar a cabo el **Acto de Sustentación** de la Tesis de Titulación Profesional:

"DISPERSIÓN Y BALANCE DE ENERGIA POR MATERIAL PARTICULADO EN EL DISTRITO DE AHUAYCHA, 2024"




Dicha tesis ha sido presentada por el Bachiller en Ingeniería Forestal y Ambiental **MENDEZ FELIX EFRAIN**, asesorado por el docente **Dr. ANGELES SUAZO JULIO MIGUEL** adscrito al Departamento Académico de Ingeniería Forestal y Ambiental.

Después de haber calificado el informe final de tesis, escuchada la sustentación y las respuestas a las preguntas formuladas por el Jurado, se le declara¹: Aprobado, para optar el **Título Profesional de INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL**, con la calificación de 15, que corresponde a la condición²: Bueno.

En consecuencia, el sustentante:

- Queda en condición de recibir el indicado Título Profesional, de conformidad con las normas legales, estatutarias y reglamentarias aplicables en materia del proceso de titulación profesional.
- NO queda en condición de recibir el indicado Título Profesional, de conformidad con las normas legales, estatutarias y reglamentarias aplicables en materia del proceso de titulación profesional.

Siendo las 17:11 horas del mismo día, mes y año, se da por concluido el Acto de Sustentación, firmando a continuación los intervinientes, en señal de conformidad de lo acontecido y consignado.

	
Dra. LAVADO MEZA CARMENCITA DEL ROCIO Presidente	Dra. CHAVARRIA MARQUEZ ESMILA YEIME Miembro
	
Dr. ANGELES SUAZO JULIO MIGUEL Asesor	

1. Indicar: Aprobado y/o Desaprobado.
2. Indicar: Excelente, Muy Bueno, Bueno, Regular y/o Desaprobado.

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 057-2025

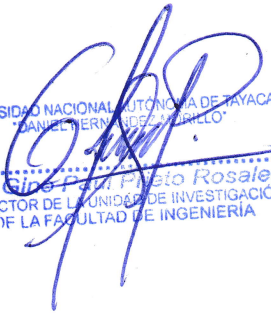
EL DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO, QUIEN SUSCRIBE:

HACE CONSTAR:

Que, la tesis titulada: "DISPERSIÓN Y BALANCE DE ENERGIA POR MATERIAL PARTICULADO EN EL DISTRITO DE AHUAYCHA, 2024", desarrollado por el bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental, **MENDEZ FELIX EFRAIN**, asesorado por el **Dr. ÁNGELES SUAZO JULIO MIGUEL**, cumple con los requisitos de conformidad de originalidad mediante (*software Anti Plagio Turnitin*), evidenciándose en el informe de originalidad un porcentaje de similitud de dieciocho (18%), el cual se encuentra dentro del parámetro establecido por la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo.

Se expide la presente constancia para los fines que estime conveniente.

Ahuaycha, 21 de octubre de 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA
DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO

Dr. Gino Pineda Pineda Rosales
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Constancia: N°057-2025.
Cc. Archivo.

AGRADECIMIENTO

Agradecer al Dr. Julio ángeles Suazo, por asesorarme en cursos de cartografía, teledetección y proyecto de investigación que fueron bases para realizar satisfactoriamente la tesis.

A mis docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental por inculcarme valores morales, conocimientos tecnológicos y científicos.

A mi familia, expresamente a mis padres Nemesio y Feliciano, también a mis hermanos Xiomara, Jack y Neymar, por su apoyo y afecto emocional.

DEDICATORIA

A mi familia por su afecto y motivación que han sumado fruto para que terminara la carrera. A mis docentes que me motivaron con su experiencia académica y laboral, estas bases fueron importantes para mi formación académica y profesional. A mis compañeros del grupo de estudio que logramos superar dificultades académicas. En especial a mis amistades que siempre estaban en los momentos más difíciles.

A un gran amigo Abog. Héctor Fernández Taboada con quien reíamos y compartíamos experiencias durante toda nuestra la etapa académica. Así mismo, a una gran amiga Keiko y Rosa Maylin por compartir momentos alegres y tristes durante la etapa universitaria.

Finalmente, a todos los que aportan conocimiento científico en temas de contaminación atmosférica y que proponen soluciones tecnológicas para mitigar la contaminación de esta naturaleza.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA	iii
TABLA DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Formulación del problema	4
1.2.1. Problema general.....	4
1.2.2. Problemas específicos	4
1.3. Justificación e importancia	4
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. Formulación de hipótesis	5
1.4.1. Hipótesis general	5
1.4.2. Hipótesis específicas	5
II. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Antecedentes	6
2.1.1. Antecedentes internacionales	6
2.1.2. Antecedentes nacionales	10
2.1.3. Antecedentes locales	14
2.2. Bases teóricas.....	18
2.2.1. Material particulado atmosférico	18
2.2.2. Procesos que modifican el tamaño del material particulado	18
2.2.2.1. Movimientos Brownianos.....	18
2.2.2.2. Colección gravitacional	19
2.2.3. Modelo de Pluma Gaussiana (GPM).....	19
2.2.4. Circulación vertical y estabilidad de la atmósfera	20
2.2.5. Escala de análisis de velocidad del viento	21
2.2.6. Balance de calor	22
2.2.7. Radiación neta	23

2.2.8.	Balance de energía y la derivación de la ley de Planck	24
2.3.	Bases conceptuales.....	26
2.3.1.	Material particulado	26
2.3.2.	Material Particulado (PM 2.5).....	27
2.3.3.	Material Particulado (PM 10).....	28
2.3.4.	Fuentes y composición de material particulado	28
2.3.4.1.	Emisiones de polvo del suelo y fugitivas	28
2.3.4.2.	Quema de biomasa.....	29
2.3.4.3.	Fuentes misceláneas	29
2.3.5.	Efectos de material particulado en la salud.....	29
2.3.6.	Procesos de remoción de material particulado.....	30
2.3.7.	Modelo SBDART.....	30
2.3.8.	Dispersión de partículas	32
2.3.9.	La velocidad del viento	32
2.3.10.	La dirección del viento	32
2.3.11.	Rosa de vientos.....	32
2.4.	Base legal.....	33
2.4.1.	Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire	33
III.	METODOLOGÍA	34
3.1.	Tipo de investigación.....	34
3.2.	Nivel de investigación.....	34
3.3.	Método de investigación.....	35
3.4.	Diseño de investigación	35
3.5.	Población, muestra y muestreo	35
3.5.1.	Población.....	35
3.5.2.	Muestra.....	36
3.5.3.	Muestreo.....	36
3.6.	Identificación y operacionalización de variables	36
3.7.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	39
3.7.1.	Técnicas.....	39
3.7.2.	Instrumentos.....	39
3.8.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos	41
3.8.1.	Trabajo en gabinete	41
3.8.2.	Análisis de datos.....	42
3.9.	Aspectos éticos y regulatorios	42

IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
4.1.	Resultados.....	43
4.2.	Discusión.....	69
V.	CONCLUSIONES	72
VI.	RECOMENDACIONES.....	75
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
VIII.	ANEXOS	83
8.1.	Matriz de consistencia.....	83
8.2.	Panel fotográfico.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Diseño del trabajo de investigación	35
Tabla 2 Matriz de Operacionalización de las variables	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Distribución de partículas milimétricas.....	18
Figura 2	Modelo de dispersión gaussiano.....	19
Figura 3	Variación vertical de la atmosfera a la dispersión del modelo Gaussiano	21
Figura 4	Escala de Beaufort.....	22
Figura 5	Espectros solares a nivel del mar y de cuerpo negro a 6000 K.....	25
Figura 6	Esquema del Balance Energético de la Tierra.....	26
Figura 7	Imagen sobre fracciones de PM 2.5	27
Figura 8	Imagen SEM de partículas de cenizas volantes.....	28
Figura 9	Interfaz de usuario web para SBDART.....	31
Figura 10	Rosa de viento simplificado	33
Figura 11	Referencia de la población data del material particulado.....	36
Figura 12	Técnica de recolección	39
Figura 13	Estación meteorológica de marca Lufft- WS601-UMB.....	40
Figura 14	Sensor Profiler Model 212	40
Figura 15	Proceso de gabinete para análisis de material particulado	41
Figura 16	Instalación del sensor (Profiler Model 212).....	85
Figura 17	Descarga digital de data de material particulado (PM 2.5 y PM 10)	85
Figura 18	Descarga de data digital de parámetros meteorológicos	86
Figura 19	Procesamiento data con lenguaje de programación Software Rstudio.....	86

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Series temporales de dirección del viento en los meses de mayo – julio, 2024	43
Gráfico 2	Series temporales de concentración de PM10 (N°de partículas/cm3)	44
Gráfico 3	Concentración de PM 2.5 (Cantidad de partículas/cm3)	45
Gráfico 4	Concentración de PM 10 (Cantidad de partículas/cm3).....	46
Gráfico 5	Calendario de las concentraciones de PM2.5	47
Gráfico 6	Calendario de las concentraciones de PM10	48
Gráfico 7	Matriz de correlación de velocidad, dirección del viento y material particulado...	49
Gráfico 8	Series temporales de velocidad de viento en los meses de mayo- julio, 2024	50
Gráfico 9	Series temporales de dirección del viento en los meses de mayo - julio, 2024.....	51
Gráfico 10	Diagramas de rosa de los vientos durante el mes mayo - julio.....	52
Gráfico 11	Dispersión temporal de PM2.5 y 10 mayo – julio, 2024	53
Gráfico 12	Rosa de polución de PM2.5 para meses de mayo - julio	54
Gráfico 13	Rosa de polución de PM10 para meses de mayo – julio, 2024	56
Gráfico 14	Percentiles de diagrama de rosa de vientos contaminante PM 2.5	58
Gráfico 15	Percentiles de diagrama de rosa de vientos contaminante PM 10	60
Gráfico 16	Diagrama de rosa de vientos del contaminante PM 2.5.....	61
Gráfico 17	Diagrama de rosa de vientos contaminante PM 10.....	62
Gráfico 18	Porcentaje del diagrama de rosa de vientos contaminante PM 2.5.....	63
Gráfico 19	Porcentaje del diagrama de rosa de vientos contaminante PM 10.....	64
Gráfico 20	Calendario dirección de dispersión de concentraciones de PM2.5 y 10.....	65
Gráfico 21	Evolución temporal de las irradiancias total y difusa durante el mes de mayo - 2024	66
Gráfico 22	Evolución temporal de las irradiancias total y difusa durante el mes de junio - 2024	67
Gráfico 23	Evolución temporal de las irradiancias total y difusa durante el mes de julio - 2024	68

RESUMEN

La acumulación de material particulado (PM) en la atmósfera modifica la formación de nubes y el balance de energía del planeta, afectando los patrones climáticos y contribuyendo al calentamiento global. **Objetivo:** Determinar la dispersión y el balance de energía asociados al material particulado en el distrito de Ahuaycha durante 2024. **Metodología:** Investigación aplicada, de nivel descriptivo, con diseño no experimental, enfocada en el análisis de la dispersión y el balance de energía de PM_{2.5} y PM₁₀ durante el periodo mayo–julio 2024. **Resultados:** En mayo, las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ fueron de ~20,400–20,100 partículas/cm³; en junio se registró una reducción del 94 %, mientras que en julio se alcanzaron los máximos valores (PM_{2.5}: 40,010; PM₁₀: 40,000 partículas/cm³), incrementándose entre 99 % y 196 % respecto a mayo. Estos patrones se asociaron con vientos estables (1.0–3.0 m/s) y predominio de dirección suroeste en mayo-junio. La baja velocidad (<1.5 m/s) y la alta frecuencia de viento en calma (54.6–73.6 %) limitaron la dispersión de PM, generando acumulación crítica, especialmente durante la noche, con valores de hasta 250,000 partículas/cm³ atribuibles a inversión térmica. La correlación inversa velocidad–concentración ($r = -0.07$) confirmó que vientos <3 m/s favorecieron el estancamiento de partículas en julio. El análisis del balance de energía mostró que la acumulación de PM generó un desequilibrio radiativo, evidenciado en los flujos ascendente (BU) y descendente (BD), con forzamiento neto positivo que suprimió la emisión térmica superficial, exacerbando el recalentamiento vespertino. **Conclusión:** La dispersión de material particulado en julio influyó significativamente en el balance de energía superficial, debido a vientos en calma que promovieron acumulación crítica de PM_{2.5} y PM₁₀, generando un desequilibrio radiativo y contribuyendo al recalentamiento local. Estos hallazgos resaltan la importancia de monitorear la dispersión de PM para la gestión de la calidad del aire y el balance térmico en zonas urbanas.

Palabras claves: Material Particulado, balance de energía, dispersión, aire y Ahuaycha

ABSTRACT

The accumulation of particulate matter (PM) in the atmosphere modifies cloud formation and the planet's energy balance, affecting weather patterns and contributing to global warming. Objective: To determine the dispersion and energy balance associated with particulate matter in the district of Ahuaycha during 2024. Methodology: Applied, descriptive, non-experimental research focused on analyzing the dispersion and energy balance of PM_{2.5} and PM₁₀ during the period May–July 2024. Results: In May, PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations were ~20,400–20,100 particles/cm³; in June, a 94% reduction was recorded, while in July the maximum values were reached (PM_{2.5}: 40,010; PM₁₀: 40,000 particles/cm³), increasing between 99% and 196% compared to May. These patterns were associated with stable winds (1.0–3.0 m/s) and a predominance of southwesterly winds in May–June. Low wind speed (<1.5 m/s) and high frequency of calm winds (54.6–73.6%) limited PM dispersion, leading to critical accumulation, especially at night, with values of up to 250,000 particles/cm³ attributable to thermal inversion. The inverse correlation between speed and concentration ($r = -0.07$) confirmed that winds <3 m/s favored particle stagnation in July. The energy balance analysis showed that PM accumulation generated a radiative imbalance, evidenced in the upward (BU) and downward (BD) fluxes, with positive net forcing that suppressed surface thermal emission, exacerbating afternoon overheating. Conclusion: Particulate matter dispersion in July significantly influenced the surface energy balance due to calm winds that promoted critical accumulation of PM_{2.5} and PM₁₀, generating a radiative imbalance and contributing to local overheating. These findings highlight the importance of monitoring PM dispersion for air quality management and thermal balance in urban areas.

Keywords: Particulate matter, energy balance, dispersion, air, and Ahuaycha

I. INTRODUCCIÓN

El material particulado (MP) se destaca por sus significativos efectos sobre el medio ambiente y la salud humana. Está compuesto por partículas sólidas y líquidas en la atmósfera, incluyendo sulfatos, nitratos, carbono, polvo mineral y otros compuestos, y se clasifica según el diámetro aerodinámico en partículas totales (PTS), como PM_{10} y $PM_{2.5}$ (Shaltami et al., 2020).

El $PM_{2.5}$ puede penetrar profundamente en el sistema respiratorio, alcanzando los alveolos pulmonares y afectando el intercambio gaseoso. Esto se asocia con enfermedades respiratorias crónicas, cardiopatías y aumento de la mortalidad (Manisalidis et al., 2020).

Las fuentes de MP incluyen tanto orígenes naturales —como incendios forestales y erosión eólica— como antropogénicas, incluyendo la quema de combustibles fósiles, procesos industriales y actividades agrícolas. El material particulado primario se dispersa directamente en la atmósfera, mientras que el secundario se genera a través de reacciones químicas de precursores gaseosos, como dióxidos de azufre y óxidos de nitrógeno. La dinámica de dispersión depende de las características físicas de las partículas (por ejemplo, las $PM_{2.5}$ permanecen más tiempo en suspensión y se transportan a mayores distancias) y de factores meteorológicos locales (Shaltami et al., 2020).

Además, estudios recientes evidencian que las partículas con diámetro aerodinámico $\leq 2.5 \mu\text{m}$ ejercen un forzamiento radiativo significativo, modificando los patrones de transferencia de energía en la atmósfera mediante tres mecanismos: (1) absorción de radiación solar por componentes como el carbono negro (BC), (2) dispersión de onda corta por sulfatos y nitratos, y (3) modificación de las propiedades microfísicas de las nubes (Bellouin et al., 2020; Rosenfeld et al., 2019). En particular, el carbono negro, proveniente principalmente de la combustión de combustibles fósiles y quema de biomasa, puede absorber entre 0.5 y 1.1 W/m^2 por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentración de MP (Samset et al., 2018).

Por esta razón, se desarrolló la presente investigación, con el objetivo de analizar la dispersión y el balance de energía asociados al material particulado y su efecto sobre la radiación solar absorbida en el distrito de Ahuaycha durante mayo a julio de 2024. Para ello, se emplearon metodologías científicas de procesamiento de

datos con el lenguaje de programación Open Air en RStudio, y se realizó el modelamiento del balance de energía mediante el software SBDART, obteniendo resultados confiables para caracterizar la influencia del MP en la atmósfera local.

1.1.Planteamiento del problema

La contaminación del aire genera peligro en el desarrollo sostenible en todo el mundo. Porque la calidad del aire es imprescindible en comprender su origen, que determine las concentraciones, la distribución de los contaminantes del aire, incluidas sus fuentes, su transporte, su composición química y sus sumideros. Sin embargo, la calidad del aire ambiente sigue siendo una preocupación grave porque tiene consecuencias al cambio climático y la salud humana (Tai et al., 2024).

A nivel mundial, nueve de cada diez personas (90 %) respiran aire contaminado que excede con la recomendación de la Organización Mundial de la salud (OMS) se estima hay concentraciones por encima del $10 \mu\text{g m}^{-3}$ en 2019, lo que casusa muertes prematuras al año atribuibles al impacto combinado de la contaminación del aire (WHO, 2021).

La partícula fina $\leq 2,5 \mu\text{m}$ (PM 2.5) que provienen de fuente naturales es grave para la calidad del aire debido a su pequeño tamaño que puede infiltrarse en el sistema respiratorio. Por otro lado, las emisiones biogénicas, polvo, sal marina e incendios forestales, incluida la quema de combustibles fósiles generan aumento de PM 2.5 debido a la creciente incidencia de incendios en los últimos años. También se espera que las futuras emisiones de incendios provocadas por el clima aumenten las PM 2.5. (Tai et al., 2024).

Los estudios en los Estados Unidos demuestran que aproximadamente el 50% de las variaciones en las partículas PM 2.5 pueden atribuirse a cambios meteorológicos. Se proyecta que las concentraciones de materia particulada (PM) en ambientes contaminados cambiarán marginalmente entre $\pm 0,1$ y $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y se estima cambio climático en las últimas décadas. Sin embargo, los incendios forestales inducidos por el clima podrían surgir como una fuente significativa de PM2.5 ya que se estimó cambios anuales que no superarán los $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en EE. UU. Así mismo, se anticipa un incremento de 4 y $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el norte de China, atribuido a cambios en la química y el transporte de aerosoles. Este incremento se atribuye en un 75% al monóxido de carbono (CO), resultado de incendios forestales de mayor magnitud, mientras que el

resto se relaciona con cambios meteorológicos impulsados por el clima (Tai et al., 2024).

Por otro lado, las partículas gruesas, conocidas como PM₁₀, son un tipo específico de contaminante atmosférico que comprende partículas con un diámetro aerodinámico de 10 µm o menos. Además, se consideran responsables de contribuir a enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Islam et al., 2024).

El PM₁₀ a diferencias del PM 2.5 es muy peligroso para la salud, según los datos basados en estudios epidemiológicos que sugieren que PM_{2.5} podría ejercer una mayor toxicidad que las partículas más grandes. Porque este se origina principalmente de procesos mecánicos abrasivos como el molido mecánico, el polvo arrastrado por el viento y las actividades agrícolas, estas se componen predominantemente de materiales relacionados con la corteza como: hierro (Fe), aluminio (Al), magnesio (Mg), calcio (Ca), y materiales orgánicos primarios como polen, esporas, etc. (Cheng et al., 2015).

El efecto del aerosol en la superficie por la radiación de onda larga ha recibido menor atención que la radiación onda corta por sus efectos que puedan generar y la falta de evidencias en los modelos climáticos. La radiación atmosférica de onda larga descendente (DLR), es más importante para el balance de energía superficial y el cambio climático. En comparación con la radiación de onda corta descendente, las observaciones directas del DLR siguen siendo escasas. Pero, se sabe que los aerosoles dispersan y absorben la radiación terrestre y emiten energía de radiación en onda larga. En varios estudios observacionales, el efecto DLR inducido gases de efecto invernadero es mayor que los aerosoles, lo que potencialmente compensa una proporción sustancial (entre el 10% y el 51%) de la reducción en la radiación de onda corta en condiciones de contaminación por aerosoles. Pasar por alto el efecto de los aerosoles en el DLR puede dar lugar a errores importantes en los modelos climáticos, especialmente en zonas con una contaminación por aerosoles pronunciada (Liu et al., 2024).

Por otro lado, el balance de energía se refiere a la radiación de onda corta superficial global descendente (RS) en la superficie terrestre, y resulta fundamental para comprender fenómenos relacionados con el clima, el cambio climático y la contaminación del aire. Los valores de RS pueden indicar perturbaciones de origen antropogénico. En este contexto, la radiación se ve significativamente modificada al atravesar una atmósfera contaminada, reduciéndose entre un 10 % y 20 % en ciudades

industrializadas, y entre un 2 % y 10 % en aquellas con alta contaminación fotoquímica atmosférica, principalmente debido a las emisiones vehiculares (Gómez et al., 2023).

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

- ✓ ¿Cuál es la dispersión y balance de energía por material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024?

1.2.2. Problemas específicos

- ✓ ¿Cuál es la variabilidad temporal del material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024?
- ✓ ¿Cuáles son los niveles de variabilidad en la velocidad y dirección del viento en el Distrito de Ahuaycha, 2024?
- ✓ ¿Cuál es el balance de energía por material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024?
- ✓ ¿Cuál es la variabilidad de la dispersión de material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024?

1.3. Justificación e importancia

Las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ modifican el balance radiativo y la formación de nubes en la Tierra, afectando los patrones climáticos y contribuyendo al calentamiento global (Mukherjee & Agrawal, 2017). Además, la exposición a $PM_{2.5}$ se ha asociado con asma, cáncer de pulmón y otras afecciones respiratorias, debido a su capacidad de penetrar profundamente en los pulmones (Jang, 2014). Aunque existen estudios sobre material particulado en el distrito de Ahuaycha, aún no se dispone de evidencia sobre sus impactos ambientales en el balance de energía superficial. En este contexto, la presente investigación permite describir detalladamente la dispersión y el balance de energía asociados al material particulado, proporcionando información relevante para la toma de decisiones en políticas ambientales, la fiscalización de la calidad del aire y la protección de la salud pública.

1.3.1. Objetivo general

- ✓ Determinar la dispersión y balance de energía por material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024.

1.3.2. Objetivos específicos

- ✓ Determinar la variabilidad del material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024.
- ✓ Determinar la variabilidad de la velocidad y dirección del viento en el Distrito de Ahuaycha, 2024.
- ✓ Determinar el balance de energía por material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024.
- ✓ Determinar la variabilidad de dispersión de material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024.

1.4. Formulación de hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

- ✓ La dispersión y balance de energía por material particulado es significativo en el Distrito de Ahuaycha, 2024.

1.4.2. Hipótesis específicas

- ✓ Existe variabilidad temporal del material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024.
- ✓ Existe variabilidad a la velocidad y dirección del viento en el Distrito de Ahuaycha, 2024.
- ✓ Existe balance de energía por material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024.
- ✓ Existe dispersión de Material en el Distrito de Ahuaycha, 2024

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

(Gómez et al., 2023), estudiaron la relación entre la radiación de onda corta superficial descendente (R_s) y diferentes contaminantes atmosféricos: NO_x , SO_2 y partículas finas ($\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10}) en la región costera de Alicante (sureste de España). La metodología se basó en monitoreo en diferentes turnos durante once años, comprendidos entre 2010 y 2020. Se implementaron dos estaciones meteorológicas en zona urbana y suburbana, alejadas de la ciudad de Alicante. Se determinó la relación de NO_x durante el otoño e invierno. Sus resultados muestran que el análisis obtuvo mayores concentraciones de este contaminante atmosférico durante la temporada de verano, al igual que el $\text{PM}_{2,5}$; y que los R_s redujeron significativamente en la estación urbana durante las horas de la mañana en la temporada de invierno, en comparación con las observaciones registradas en las estaciones suburbanas y rurales, con una diferencia media global de -81 y -120 W/m^2 . Sin embargo, no se obtuvieron diferencias significativas durante el sol del mediodía, con una diferencia media global de -20 W/m^2 entre las estaciones urbanas y rurales. Además, existe una estrecha relación entre R_s y los ciclos anuales de las concentraciones de NO_x , que también se ven influidos por las circulaciones de viento predominantes observadas en la zona de estudio. Se observa una concentración media global de NO_x de $107 \mu\text{g/m}^3$ en la estación urbana durante la temporada de invierno. Por el contrario, estas altas concentraciones se reducen significativamente en la estación suburbana, con un valor medio global de $40 \mu\text{g/m}^3$. Su estudio concluyó que la concentración (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) y el SO_2 influyen en el campo de R_s .

(Nguyen et al., 2023), estudiaron la calidad del aire en varias provincias y en regiones urbanas de Vietnam, centrándose en las $\text{PM}_{2,5}$. Además, se investigaron los efectos del distanciamiento social provocado por la COVID-19 en el nivel de $\text{PM}_{2,5}$. Para ello, se emplearon metodologías de estadísticas descriptivas, diagramas de caja y bigotes,

matrices de correlación, variaciones temporales y análisis de tendencias. Para los cálculos se utilizó el lenguaje de programación del paquete Openair con datos registrados durante 24 horas de PM_{2,5} tomados de ocho estaciones meteorológicas. Los resultados del estudio indicaron que las provincias y ciudades del norte experimentaron más contaminación por PM_{2,5} en comparación con el centro y el sur. Las concentraciones de PM_{2,5} en cada estación de control variaron significativamente. Entre las estaciones de control, las del norte mostraron una alta correlación entre sí con respecto a las demás estaciones. Se observó una variación estacional, con una alta concentración de PM_{2,5} en la estación seca y una baja concentración de PM_{2,5} en la estación húmeda. La variación de la concentración de PM_{2,5} durante la semana no fue tan diferente. La variación diurna mostró que la concentración de PM_{2,5} aumentaba en las horas punta de tráfico y descendía por la tarde. Se observó principalmente una tendencia a la baja en la concentración de PM_{2,5} durante el período estudiado. La pandemia de la COVID-19 contribuyó a la reducción de PM_{2,5}. En los meses en que se implementó el distanciamiento social para prevenir la epidemia, la concentración de PM_{2,5} disminuyó, pero aumentó en su mayor parte en los meses siguientes. El estudio concluyó que se proporcionaron evaluaciones actualizadas y valiosas de PM_{2,5}, que siguen siendo insuficientes debido a la contaminación atmosférica derivada de la quema de residuos agrícolas.

(Gagic et al., 2022), investigaron sobre la concentración de contaminantes asociados a la combustión de combustible diésel marino, empleando sensores de bajo coste debido a sus precios más bajos en comparación con los sensores de referencia en la bahía de Kotor, Montenegro. La metodología se fundamenta en el monitoreo con una red de cuatro sensores de bajo coste que determinan material particulado (PM), y luego se analizó la correlación entre PM_{2,5} y PM₁₀ en las actividades que generan los cruceros en la zona de la bahía de Kotor durante 27 días en la temporada alta de verano, con una resolución de 10 minutos. Asimismo, se emplearon datos registrados y el modelo de programación Openair para investigar la posible relación entre las operaciones de los cruceros y las fluctuaciones temporales en las

concentraciones de PM en el aire ambiente. Además, se aplicó una metodología a través del Programa Europeo de Vigilancia y Evaluación de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EMEP/AEMA) para estimar las emisiones totales de PM de los cruceros. Los resultados demostraron que las condiciones meteorológicas desempeñaron un papel importante en las concentraciones locales de PM, de modo que, con vientos predominantes del ENE (Este-Noreste), el lado oeste de la bahía del experimento, en promedio, presentó concentraciones más altas de PM_{2,5} y PM₁₀. Se evidenció que las precipitaciones y los vientos más fuertes tienden a reducir rápidamente las concentraciones de PM en el aire ambiente. Sus resultados evidenciaron que el PM alcanzó altas concentraciones, asociadas principalmente a las velocidades bajas del viento y a las entradas de aire procedentes de los amarres/fondeaderos vecinos. Durante las maniobras (llegada y salida) de los cruceros, se detectaron picos más altos en los valores de PM, siendo más visibles para el PM₁₀ que para el PM_{2,5}. El estudio concluye que no hubo correlación significativa entre la media de concentraciones de PM y las emisiones diarias estimadas de PM de los cruceros.

(Yulinawati et al., 2021), investigaron la calidad del aire por influencia del material particulado (PM_{2,5}) en el hospital de mujeres y niños ubicado en el oeste de Yakarta. La metodología se basó en recopilar datos de PM_{2,5} mediante un sensor de bajo coste (LCS), que también registró información sobre la temperatura y la humedad. El LCS fue implementado junto a dos estaciones de control de la calidad del aire ambiente (AQMS) como referencia, y se realizaron mediciones en el hospital durante un periodo de tres meses. Los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente mediante el modelo Openair. Sus resultados mostraron que el LCS y las AQMS siguieron una tendencia similar. En los exteriores del hospital, la concentración de PM_{2,5} fue siempre superior a la del interior. Las concentraciones máximas horarias en el exterior se registraron alrededor de la medianoche (24:00-03:00), mientras que en el interior se presentaron entre las 06:00 y las 12:00. Las concentraciones de PM_{2,5} en interiores tendieron a mantenerse estables,

mientras que en exteriores variaron a lo largo del día. La relación entre la concentración de PM_{2,5} (24 horas) en interiores y exteriores fue de 0,8. El estudio concluyó que la relación entre la contaminación del aire en interiores y exteriores aún no es completa debido a los factores de temperatura y humedad. En todos los casos, las concentraciones de PM_{2,5} tanto en interiores como en exteriores superaron los límites de calidad del aire establecidos por la OMS.

(Krishna et al., 2019), estudiaron la estimación del forzamiento radiativo por partículas en suspensión (PM_{2,5}) durante un periodo (enero-diciembre de 2015) en Delhi y Pune, ciudades metropolitanas urbanas contaminadas de la India. Su metodología consistió en las observaciones in situ de PM_{2,5} y carbono negro (BC) en ambas ciudades mediante la red de estaciones terrestres del Sistema de Investigación y Predicción de la Calidad del Aire (SAFAR); se emplearon valores modales y las distribuciones de frecuencia estacional (FD) en Pune y Delhi y se compararon con los Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQS). Se estimó mediante modelos de Ópticas Propiedades de Aerosoles y Nubes (OPAC) junto con el modelo Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer (SBDART). Sus resultados muestran que los valores medios mensuales de PM_{2,5} oscilaron entre 61,5 y 162,9 sobre Delhi y entre 17,4 y 74,05 sobre Pune. Se determinó que la contribución de la masa de BC al PM_{2,5} era del 10 % al 25 % en Pune. Sin embargo, la contribución del BC al PM_{2,5} era de hasta el 35 % en Delhi. El forzamiento radiativo debido al PM_{2,5} (PRF) se situó entre +7,73 Wm⁻² y +14,51 Wm⁻² sobre Delhi y entre +3,12 Wm⁻² y +12,15 Wm⁻² sobre Pune. El estudio concluyó que los experimentos de sensibilidad muestran que el impacto del aumento de la higroscopicidad de los aerosoles sobre el PRF se vio eclipsado por los cambios netos del albedo.

2.1.2. Antecedentes nacionales

(Castillo & Guerrero, 2025), su investigación examinó las considerables repercusiones de las partículas PM_{2.5} que se generan como resultado directo de la combustión de extensas hectáreas de *Saccharum officinarum* en la región de Laredo durante el período comprendido entre el año 2017 y el año 2022. La metodología empleada en este estudio se basó fundamentalmente en el procesamiento meticuloso de los datos y pronóstico meteorológicos (WRF), que cuenta con una resolución de 1 kilómetro, lo que abarca tanto el área de Trujillo como la vasta extensión del Océano Pacífico. Los resultados producidos por el modelo WRF se validaron exhaustivamente mediante una comparación rigurosa con los datos observados, lo que reveló un grado significativo de correlación y una notable capacidad predictiva. La simulación de la dispersión de las partículas PM_{2,5} se llevó a cabo con pericia utilizando el modelo Calpuff de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), el cual se validó además con datos obtenidos en quemas controladas y en una variedad de escenarios de combustión. Los hallazgos indicaron inequívocamente que los análisis relativos a las concentraciones máximas de PM_{2,5} en las regiones cercanas a las fuentes de emisión superaron los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos, una situación que fue particularmente pronunciada durante los meses comprendidos entre junio y noviembre, principalmente debido a los vientos predominantes del sur-sureste junto con las condiciones de inversión de subsidencia. Cabe destacar que, durante el año 2021, los días considerados críticos se caracterizaron por condiciones de viento notablemente tranquilas. En cuanto a las emisiones generadas por la combustión, la quema de 3 hectáreas dio como resultado un índice de calidad del aire moderado que se registró en el 60,47% de los receptores. Por el contrario, la quema de 6 y 9 hectáreas alcanzó un nivel que llegó al umbral de cuidado, afectando al 32,56% y al 43,41% de los receptores, respectivamente. Finalmente, el estudio concluyó que las validaciones realizadas se basaron firmemente en los registros obtenidos en las estaciones meteorológicas locales, lo que servía para confirmar la fiabilidad de los resultados cuando se ajustaban meticulosamente para cumplir con los criterios estadísticos establecidos.

En particular, se destacó un coeficiente de correlación sobresaliente ($r = 0,93$) para la velocidad del viento, aunque cabe señalar que también se identificó una tendencia a la sobreestimación, que se atribuyó a las limitaciones inherentes a la representación de la rugosidad de la superficie y de la turbulencia en los niveles más bajos de la atmósfera.

(Anticona & Aponte, 2024), la investigación llevó a cabo un análisis exhaustivo de la ruta de dispersión de material particulado (MP), específicamente en relación con las instalaciones de almacenamiento de carbón, que pueden dispersarse por el paisaje urbano de Salaverry - Trujillo. Su enfoque metodológico empleado en este estudio se caracterizó por un diseño no experimental, cuantitativo y transversal, que abarcó la implementación de tres sitios de monitoreo ubicados estratégicamente, los cuales se correlacionaron meticulosamente con las direcciones predominantes del viento, tal como se delinea en el diagrama de rosas de los vientos correspondiente. Sus resultados son hallazgos derivados de patrones de dispersión de PM10 que estaban estrechamente alineados con la relación establecida entre la dirección del viento y los datos representados en la rosa de los vientos, lo que indica que la trayectoria de la dispersión de los contaminantes se extendió predominantemente desde la región sur hacia el sector noreste del distrito, lo que tuvo un profundo impacto en los datos promedio registrados en cada lugar de monitoreo; en particular, el tercer punto de monitoreo mostró una elevada concentración de PM10, que alcanza un nivel notable de $185 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de partículas de carbono en suspensión presentes en la atmósfera, lo que influye negativamente en la calidad general del aire en el distrito. El estudio concluyó que las vías identificadas para la dispersión de partículas, por el análisis de la rosa de los vientos, estaban orientadas predominantemente de sur a noreste, con una pequeña desviación hacia el noroeste, lo que comprometió significativamente la calidad del aire urbano en el distrito de Salaverry, como lo demuestran las concentraciones registradas que superan los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

(Vásquez, 2024), llevó a cabo una investigación que se centró en el análisis de los niveles de contaminación del aire atribuidos específicamente a la materia particulada dentro de los límites urbanos de la ciudad de Chota, que está estratégicamente situada en la región norte de la provincia de Cajamarca. La metodología empleada para esta investigación se basó fundamentalmente en un enfoque descriptivo caracterizado por un diseño no experimental, que permitió observar los fenómenos sin manipular las variables. En el área de estudio designada, se establecieron sistemáticamente un total de cuatro redes de monitoreo distintas en el mismo lugar urbano, que funcionaron de forma continua durante tres meses consecutivos, y la recopilación de datos se realizó a intervalos regulares cada quince días en cada punto de muestreo individual; para facilitar este proceso, se utilizaron aparatos avanzados de muestreo automático de gran volumen, comúnmente denominados HI-VOL, para recopilar de manera eficiente datos relacionados con las concentraciones de partículas, junto con una estación meteorológica equipada con un termómetro ambiental para medir con precisión varios parámetros meteorológicos. Sus resultados recopilados arrojaron valores promedio para el parámetro PM₁₀, que revelaron concentraciones de 42,67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PN1, 24,28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PN2, 43,10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PN3 y 38,43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PN4, mientras que para el parámetro PM_{2.5}, las concentraciones promedio se documentaron en 26,13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PN1, 28,07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PN2, 20,75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PN3 y 20,22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PN4, lo que indica una variación significativa entre los diferentes puntos de muestreo. El estudio concluye que, las cuatro muestras recolectadas, tres estaban dentro de los estándares de calidad ambiental (ECA) establecidos para los parámetros de calidad del aire; sin embargo, se identificó un punto de muestreo específico que superaba los límites permitidos, por lo que estaba fuera del rango de parámetros aceptable.

(Oré Cierro et al., 2023), estudiaron el modelamiento para dispersión de material particulado con el objetivo de observar su comportamiento dentro del campus de la UNAS (Universidad Nacional Agraria de la Selva). La metodología se basó en referenciar 10 puntos

aleatorios dentro de la UNAS, donde se evaluó la cantidad de PAS, y los datos meteorológicos como son la velocidad y la dirección del viento, de la estación ubicada en Monzón, para luego ser evaluados por el programa AERMOD. Los resultados mostraron que la dispersión contaminante mostró un buen grado de concordancia con la dirección del viento. Con el entorno topográfico, la distribución del contaminante siguió un patrón acertado. Asimismo, la dispersión de los contaminantes fue menor debido a la velocidad del viento, porque oscila entre 0,5 y 3,6 m/s, como indicaron las rosas de los vientos para el campus universitario. El estudio concluyó que se observó una elevada concentración de partículas sedimentables durante la exposición de 15 días marcados por valores calculados por el AERMOD View que tuvo tendencia a crecer en un radio de 20 m. Los valores elevados son típicamente causados por los edificios masivos cercanos, que limitan la dispersión del contaminante y provocan una acumulación.

(Copes, 2022), investigó la influencia de la estabilidad atmosférica en los patrones de dispersión de partículas en el entorno urbano de Huancayo durante los meses de enero a marzo, lo que resultó en una caracterización integral de las condiciones de estabilidad atmosférica prevalentes en esa región. La metodología empleada para esta investigación fue de naturaleza tanto aplicada como descriptiva, utilizando el modelo de estabilidad atmosférica de Pasquill-Gifford; este modelo se calculó en función de la intensidad de la radiación solar incidente en la superficie y de la velocidad del viento medida a 12 metros de altura. Los datos se recopilaron mediante una torre meteorológica y un piranómetro ubicados estratégicamente en el área de estudio designada, afiliada a la Universidad Nacional del Centro del Perú en Huancayo. Los resultados muestran que el comportamiento de dispersión del material particulado a las 7, 11 y 18 horas revela que el viento proviene predominantemente del oeste y exhibe velocidades entre 0,5 y 2,1 m/s. Cabe destacar que la categoría atmosférica inestable, denominada (B), emerge como la característica más dominante en las condiciones atmosféricas de Huancayo. Al comienzo del día, las

condiciones atmosféricas en Huancayo son ligeramente inestables; sin embargo, con el avance del día y el aumento de la radiación solar, el comportamiento atmosférico pasa a un estado de inestabilidad entre las 8 y las 12 horas, para luego dar paso a un estado neutro atribuible a la ocurrencia de precipitaciones. El estudio concluyó que la concentración de partículas dispersas aumenta significativamente en correlación con el grado de estabilidad atmosférica y con la distancia a la que se produce dicha dispersión.

2.1.3. Antecedentes locales

(Chávez & Orellana, 2025), estudiaron sobre la influencia material particulado (PM2 y PM10) y humedad sobre temperatura del aire. Su metodología se basó en la investigación aplicada, nivel descriptivo, su diseño fue no experimental, analizar la relación entre la temperatura y material particulado (PM2 y PM10) durante mayo-septiembre 2024. Sus resultados muestran variaciones significativas entre las variables (temperatura y humedad) y el material particulado afectadas por condiciones meteorológicas. Así mismo, los coeficientes de determinación (R^2) variaron entre 0.22 y 0.28 para PM10, esto indicó una relación débil con relación a la temperatura los meses de estudio, pero hubo una correlación extremadamente fuerte en septiembre ($R^2 = 0.99$). Sin embargo, la humedad tuvo una muestra cambio inverso lo que provocó la disminución de la temperatura durante la mañana y la tarde. Por otro lado, los coeficientes de determinación oscilaron entre 0.22 y 0.32 para PM2, siendo una relación débil con la temperatura, pero la humedad aumentó ligeramente en ciertos períodos del día. Por ende, se registró concentraciones elevadas de PM2 y PM10 y con una variación mayor humedad en las primeras horas del día y al anochecer. Sus estudios concluyen que el material particulado PM10 muestra una fuerte influencia sobre la temperatura durante el septiembre esto se debe a las condiciones de alta radiación solar y baja presencia de humedad, mientras para el PM2 se evidencio que sus impactos fueron más complejos.

(Quispe, 2024), llevó a cabo una amplia investigación relacionada con los índices de calidad ambiental (INCA), centrándose específicamente en los niveles de concentración de partículas, a saber, PM 2.5 y PM 10, para determinar su impacto en la calidad del aire. La metodología para este estudio implicó la recopilación meticulosa de datos utilizando un sensor colector de partículas, con un punto de monitoreo seleccionado estratégicamente elegido por conveniencia, donde los datos se recopilaban de manera constante durante las horas del día durante un período de dos meses, específicamente de noviembre a diciembre. Se aplicaron del método del Índice de Calidad del Aire, conocido como INCA, utilizaron las fórmulas establecidas según lo prescrito por el Ministerio de Medio Ambiente del Perú, garantizando el cumplimiento de los estándares ambientales reconocidos. Los resultados de este riguroso análisis revelaron que los niveles diarios de concentración de partículas PM 2,5 y PM 10 se cuantificaron en 14,29 y 15,90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, de acuerdo con el orden de medición establecido. Además, el (INCA) para las partículas finas (PM 2,5) durante el turno de mañana se calculó en un 40,43%, un resultado que entra dentro de la categoría moderada, mientras que para el turno de tarde se registró en el 62,22%, lo que se clasifica como bueno, y para el turno de noche se situó en el 55,56%, clasificándolo como malo. El estudio concluyó que los niveles de partículas finas no se alinean con los ECA establecidos, lo que indica que la exposición prolongada a dichos contaminantes plantea riesgos significativos para la salud y el bienestar humanos. Por el contrario, se observó que el INCA para la PM 10 demostró condiciones excepcionalmente favorables durante las horas del día.

(Angeles et al., 2024), investigaron sobre la concentración de material particulado y la calidad del aire en las regiones Junín (Huancayo, Chupaca y La Merced) y Huancavelica (Ahuaycha), Perú, en el período 2020, 2022 y 2024. Para ello, utilizaron el instrumento sensor económico PA-II Purpleair que mide material particulado (fino y grueso) que fueron ubicadas en el área de estudio de: Chanchamayo, estación T; Huancayo, estación T1; y Chupaca, estación T3) y

Huancavelica (Pampas, estación T2). También, emplearon el modelo Hysplit que cuantificar las trayectorias eólicas transfronterizas desde la región amazónica brasileña hasta la región de Junín, Perú. Sus resultados muestran que en la época de lluvia las concentraciones máximas de PM2.5 y PM10 son de $151 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (estación T1) y $178 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (estación T1) respectivamente. El estudio concluyó que el índice de calidad del aire (ICA) para PM2.5 en las estaciones de Huancayo y Chanchamayo la calidad del aire es “muy mala” y “moderada a mala”. También, para Pampas y Chupaca, el ICA fue muy “insalubre” y “peligroso” en 50% y 43% respectivamente.

(Barrientos & Espinoza, 2021), en su estudio analizaron sobre la calidad del aire que se ve significativamente influenciada por la liberación de partículas durante el proceso de construcción de carreteras y aceras específicamente en el distrito de Odonovan, que se encuentra en la región de Huancavelica. La metodología que emplearon se basó firmemente en los principios de la investigación aplicada, caracterizada por un nivel de análisis explicativo y un diseño no experimental. Dentro del área de estudio delimitada, establecieron estratégicamente un total de cinco puntos de monitoreo siguiendo estrictamente el protocolo de monitoreo del aire prescrito, utilizando equipos Hi-Vol junto con balanzas analíticas para medir meticulosamente las concentraciones de partículas PM10 y PM2.5. Los resultados muestran que los valores de concentración promedio registrados fueron de $101,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las PM10 y $55,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las PM2.5, y ambos parámetros superaron significativamente los límites establecidos por la norma de calidad ambiental (ECA). Por el contrario, la evaluación del índice de calidad del aire (AQI) reveló que las condiciones de las PM10 se consideraban moderadas, mientras que los parámetros de las PM2,5 se clasificaron como insalubres. La conclusión muestra que la calidad del aire en el área especificada representa un riesgo considerable para la salud y el bienestar de la población local.

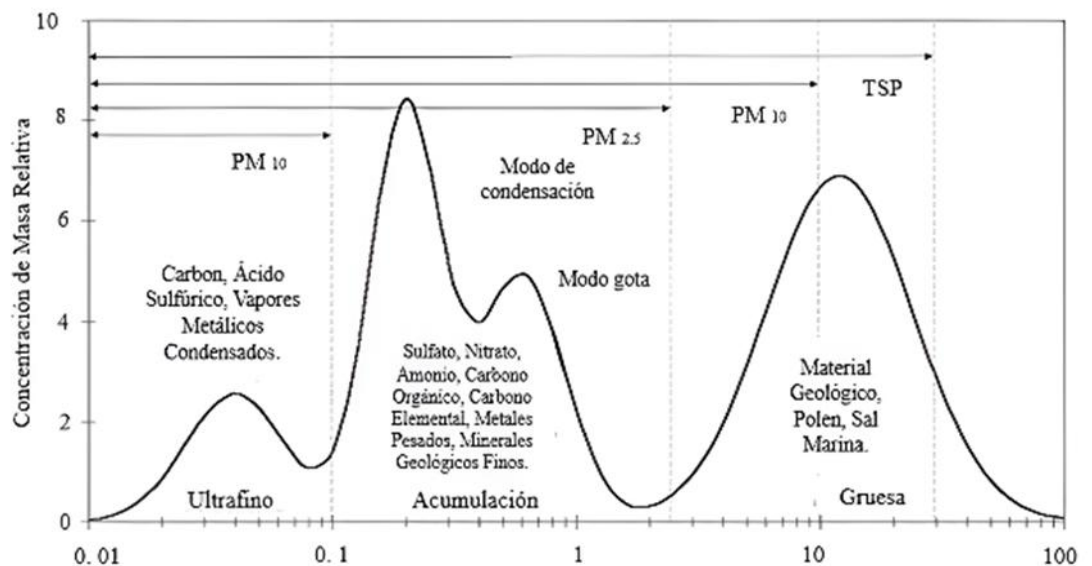
(Carbajal, 2021), su estudio muestra sobre la evaluación de la calidad del aire en la comunidad de Sacsamarca, ubicada en la región de Huancavelica, centrándose específicamente en las implicaciones de las emisiones de partículas; esta evaluación se llevó a cabo durante el año 2021. La metodología empleada en su investigación se aplicó a nivel explicativo, utilizando un diseño no experimental junto con un método científico riguroso, mediante el cual seleccionó juiciosamente siete puntos de monitoreo distintos, implementando un enfoque de muestreo no probabilístico que cumplía con el protocolo de monitoreo del aire establecido. En términos de recopilación de datos, este proceso se ejecutó utilizando equipos Hi-Vol de gran volumen que funcionaban a un caudal de 1,13 litros por segundo, complementado con el uso de hojas de recopilación de datos y una balanza analítica para medir con precisión los filtros PM10 y PM2.5, lo que facilitó la determinación del índice de calidad ambiental (AQI); además, el AQI se calculó mediante la aplicación AQI-Aire, que aprovechó las fórmulas establecidas en el marco del índice de calidad del aire para obtener un valor global integral del AQI. Los resultados muestran que los valores globales del AQI de las PM10 se registraron en 158,3, 173,6, 173,6 y 188,4, con las concentraciones correspondientes que fluctuaron dentro del rango de 29,2 a 163,7 microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que las concentraciones de PM2,5 oscilaron entre 11,7 y 93 microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). El estudio llegó a la conclusión de que la calidad del aire en la comunidad de Sacsamarca, con respecto a las partículas, se considera insatisfactoria, ya que se encuentra dentro de una clasificación insalubre que presenta riesgos potenciales para la salud pública.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Material particulado atmosférico

El material particulado se percibe en forma sólida o líquida presente en la atmósfera con un tamaño inferior a 100 μm , dimensión en la que las partículas sólo se mantienen suspendidas durante largos periodos de tiempo. También se aplica un límite de tamaño mínimo para MP, ya que las partículas menores de 2 nm se coagulan rápidamente como otras formando grupos más grandes (ver Figura 1) (Baird & Cann, 2011).

Figura 1 Distribución de partículas milimétricas



Nota. Se muestra en el tamaño de partículas comunes, cuya media son de 0.01 a 100 micrómetros (μm). (Baird & Cann, 2011).

2.2.2. Procesos que modifican el tamaño del material particulado

2.2.2.1. Movimientos Brownianos

La coagulación por movimiento browniano es el proceso donde las partículas en suspensión, debido a sus movimientos aleatorios en un fluido, chocan entre sí y se unen formando agregados más grandes. Este fenómeno es particularmente significativo cuando se trata de partículas pequeñas, ya que su tamaño las hace más susceptibles a estos movimientos aleatorios, aumentando así la frecuencia de colisiones y favoreciendo la formación de aglomerados (Achad, 2015).

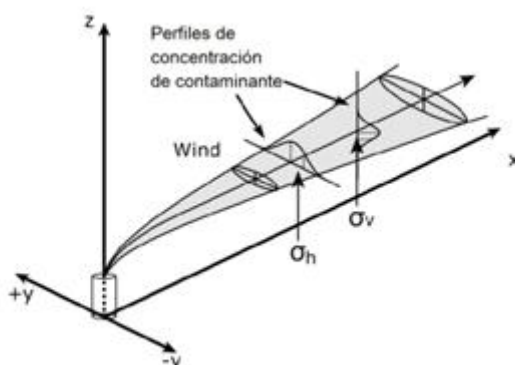
2.2.2.2. Colección gravitacional

Es cuando dos partículas de diferentes tamaños caen, la de mayor tamaño podría alcanzar y colisionar a la más pequeña, constituyendo la colección gravitacional. Cuando ambas partículas son grandes, el proceso que domina los procesos de coagulación son los movimientos gravitacionales (Achad, 2015).

2.2.3. Modelo de Pluma Gaussiana (GPM)

El modelo gaussiano de dispersión de contaminantes describe la distribución de la pluma de contaminantes perpendicular al flujo convectivo predominante. Este modelo se parametriza mediante variables meteorológicas, como la velocidad y dirección del viento, así como otros factores ambientales que influyen en la dispersión (Manzur et al., 2013).

Figura 2 Modelo de dispersión gaussiano



Nota. Distribución de eje X, Y y Z de modelo gaussiano (Perdiz, 2016)

La fórmula del modelo de pluma gaussiana. (Sutton, 1953)

Toma la forma:

$$C(X, Y, Z) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z} \left[\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \right] \left[\exp\left(-\frac{(z - H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] + \exp\left(\frac{(z - H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

Donde:

- $C(X, Y, Z)$, es la concentración en estado estacionario.
- y es la distancia transversal al viento desde la fuente.
- σ_y y σ_z son las desviaciones estándar transversales y verticales de la distribución del contaminante.

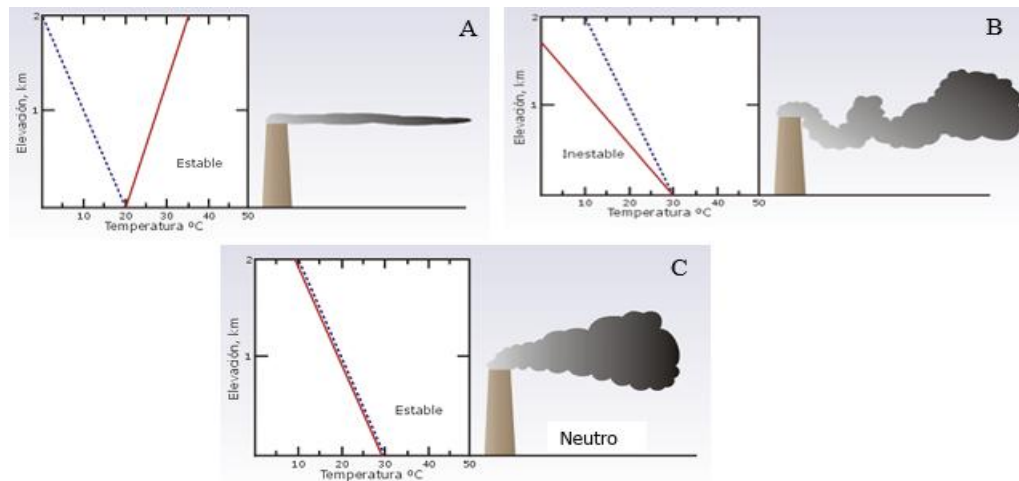
- u es la velocidad del viento a la altura de la chimenea.
- Q es la tasa de emisión de masa del contaminante.
- h es la altura efectiva de la fuente (es decir, la altura geométrica más el ascenso de la pluma).

2.2.4. Circulación vertical y estabilidad de la atmósfera

La circulación vertical del aire está estrechamente relacionada con la estabilidad atmosférica, la cual determina el desplazamiento vertical de las masas de aire y, por tanto, su capacidad de dispersión. En condiciones estables, el movimiento vertical del aire es limitado, lo que restringe la dispersión de partículas y contaminantes. En condiciones inestables, las masas de aire experimentan movimientos verticales ascendentes y descendentes más vigorosos, favoreciendo la mezcla y transporte de partículas. Por su parte, las condiciones neutras no promueven desplazamientos verticales significativos, manteniendo un comportamiento intermedio. Estas categorías de estabilidad —estable, inestable y neutral— son fundamentales para el estudio de la capa de mezcla atmosférica, ya que influyen directamente en las fluctuaciones diarias de altura durante los períodos diurno y nocturno, afectando la dispersión de material particulado y otros contaminantes (Achad, 2015).

Según Nouqueret (2022), se observa un patrón diurno de inestabilidad atmosférica entre las 11:00 y 17:00 horas, mientras que en el período nocturno (20:00 a 07:00 horas) predominan condiciones de estabilidad. La neutralidad atmosférica, por su parte, se manifiesta típicamente durante condiciones de cielo nublado.

Figura 3 Variación vertical de la atmosfera a la dispersión del modelo Gaussiano



Nota. Condiciones de estabilidad atmosférica. (A): condición estable (B) condición inestable y (C) condición neutra. (Achad, 2015).

La figura 3 muestra la estabilidad que son clasificadas en: condición estable(A), origina por durante la noche donde no interviene la radiación solar, y la mezcla de los contaminantes es mínima. En condición inestable(B) el punto de inicio de esta condición empieza con la presencia del sol, este proceso proporciona energía que hay intercambio de energía del suelo y porción de aire, lo que genera mezcla de manera vertical de aire y contaminantes presente en la atmosfera. La condición neutra (C) es cuando los contaminantes se concentran aire en un solo punto de inmisión haciendo que se incremente considerablemente (Achad, 2015).

2.2.5. Escala de análisis de velocidad del viento

La escala de viento de Beaufort es una escala numérica que fue diseñada por el para estimar la velocidad del viento, tiene como unidad de medida el Número de Beaufort (Singleton, 2008).

Figura 4 *Escala de Beaufort*

Fuerza Beaufort	Nombre	Equivalencia de la velocidad a una altura tipo de 10 metros sobre terreno llano		Características para la estimación de la velocidad en tierra
		<i>m/s</i>	<i>Km/h</i>	
0	<i>Calma</i>	0 - 0.2	1	El humo se eleva verticalmente
1	<i>Ventolina</i>	0.3 - 1.5	1 - 5	La dirección del viento se revela por el movimiento del humo, pero no por las velas
2	<i>Brisa muy débil</i>	1.6 - 3.3	6 - 11	El viento se percibe en el rostro; las hojas se agitan; la veleta se mueve
3	<i>Brisa débil</i>	3.4 - 5.4	12 - 19	Hojas y ramitas agitadas constantemente; el viento despliega las banderolas
4	<i>Brisa moderada</i>	5.5 - 7.9	20 - 28	El viento levanta polvo y hojitas de papel; ramitas agitadas
5	<i>Brisa fresca</i>	8.0 - 10.7	29 - 38	Los arbustos con hoja se balancean; se forman olas con cresta en las aguas interiores (estanques)
6	<i>Viento fresco</i>	10.8 - 13.8	39 - 49	Las grandes ramas de agitan; el uso del paraguas se dificulta
7	<i>Viento fuerte</i>	13.9 - 17.1	50 - 61	Los árboles enteros se agitan; la marcha en contra del viento es penosa
8	<i>Viento duro</i>	17.2 - 20.7	62 - 74	El viento rompe las ramas; es imposible la marcha contra el viento
9	<i>Viento muy duro</i>	20.8 - 24.4	75 - 88	El viento ocasiona ligeros daños en las viviendas
10	<i>Temporal</i>	24.5 - 28.4	89 - 102	Raro en los continentes; árboles arrancados; importantes daños en las viviendas
11	<i>Borrasca</i>	28.5 - 32.6	103 - 117	Observado muy raramente; acompañado de extensos destrozos
12	<i>Furacán</i>	32.7 ó más	118 ó más	Estragos graves y extensos

Nota. (Singleton, 2008).

2.2.6. Balance de calor

El principio de conservación de la energía establece que la superficie terrestre mantiene un equilibrio entre los flujos energéticos entrantes y salientes. Los estudios del balance energético superficial muestran que la redistribución de la radiación solar en la superficie constituye un factor clave en la formación de microclimas locales. Por ello, el balance de calor se compensa mediante la suma de tres procesos principales: (1) los flujos turbulentos ascendentes o descendentes de calor sensible y latente, (2) el flujo conductivo de calor en el suelo, y (3) la advección horizontal neta de energía (Oke, 1978).

Estos mecanismos son fundamentales para comprender cómo la presencia de material particulado y otras perturbaciones atmosféricas pueden alterar el balance energético y afectar la temperatura y condiciones climáticas locales.

$$R_N = Q_H + Q_G + L_E + Q_A \quad [Wm^{-2}]$$

Donde R_N es la radiación neta,

- Q_H es el flujo de calor sensible.
- Q_G es el flujo de calor en el suelo.
- L_E es el flujo de calor latente.
- Q_A es el flujo de calor advectivo.

2.2.7. Radiación neta

El balance radiativo neto (BRN), resultante de la diferencia entre radiación solar incidente y radiación terrestre emitida, varía espacial y temporalmente según latitud y estacionalidad, mostrando valores positivos diurnos y negativos nocturnos. Este balance representa la energía primaria que impulsa procesos superficiales clave: evaporación, transferencias de calor (sensible, latente, conductivo) y actividades bioenergéticas como la fotosíntesis (Rosenberg, 1974; Beigt, 2003). Específicamente, el BRN equivale a la suma neta de los flujos radiativos de onda corta (K) y onda larga (L).

$$R_N = K \uparrow - K \downarrow + L \uparrow - L \downarrow \quad [Wm^{-2}]$$

- Donde $K \uparrow$ es la radiación solar incidente de onda corta (300 – 1100 nm).
- $K \downarrow$ es la radiación solar reflejada por la superficie (agua o sedimento según el estado de la marea).
- $L \downarrow$ es la radiación de onda larga atmosférica (1100 - 100.000 nm).
- $L \uparrow$ es la radiación de onda larga terrestre emitida por la superficie.

2.2.8. Balance de energía y la derivación de la ley de Planck

Un cuerpo negro es un objeto ideal que absorbe toda la radiación electromagnética que incide sobre él, sin reflejar ni transmitir ninguna parte de esa energía. Para comprender este concepto, se puede hacer una analogía con la ropa: una prenda de tonalidad clara refleja gran parte de la radiación solar, mientras que una prenda oscura absorbe mayor cantidad de radiación y se calienta con mayor facilidad. De manera similar, un cuerpo negro absorbe completamente la radiación incidente, sin que nada sea reflejado o transmitido. A pesar de su nombre, un cuerpo negro sí emite radiación, denominada radiación de cuerpo negro, la cual depende únicamente de su temperatura. La intensidad y distribución espectral de esta radiación pueden calcularse mediante la Ley de Planck, que establece la relación entre la energía emitida por unidad de área, la longitud de onda y la temperatura del cuerpo (Mayorga, 2002).

El espectro viene dado por la ley de Planck:

$$F(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{ch/kT\lambda} - 1} \quad (1)$$

Donde $F(\lambda)$ es el flujo de la radiación emitida por la superficie del cuerpo negro a las longitudes de onda λ

- T = la temperatura del cuerpo negro
- λ = longitud de onda
- K = constante de boltzmann.

La integración de la ecuación (1), todas las longitudes de onda permiten obtener la ecuación de Stefan-Boltzmann:

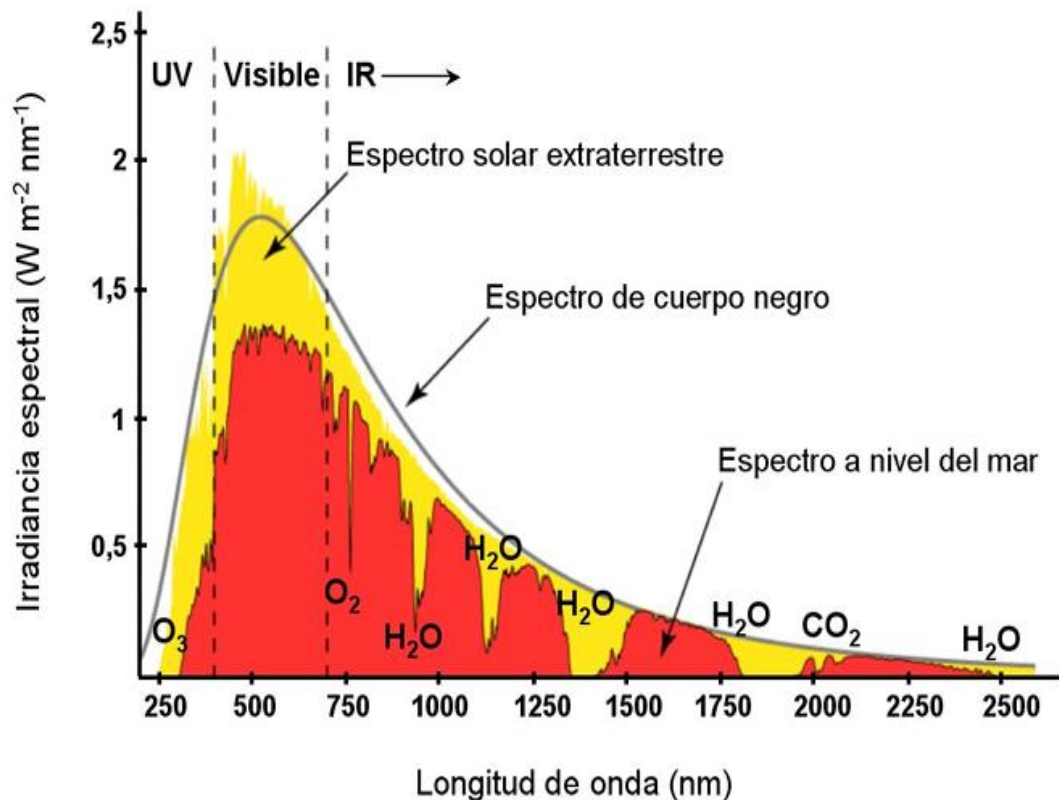
$$F = \sigma T^4$$

El flujo total (F), emitido por la superficie de un cuerpo negro es una función de su temperatura elevada a la cuarta potencia, siendo la constante de Stefan-Boltzmann (Landsberg & De Vos, 1989).

El flujo radiante solar interceptado por la Tierra depende funcionalmente de la temperatura efectiva del Sol, su diámetro angular y la distancia Tierra-Sol. Cuantitativamente, el espectro observado en el

tope atmosférico se aproxima al perfil de emisión de un cuerpo negro a 6000 K, con máxima irradiancia espectral en longitudes de onda visibles y una participación sustancial de radiación ultravioleta (Achad, 2015).

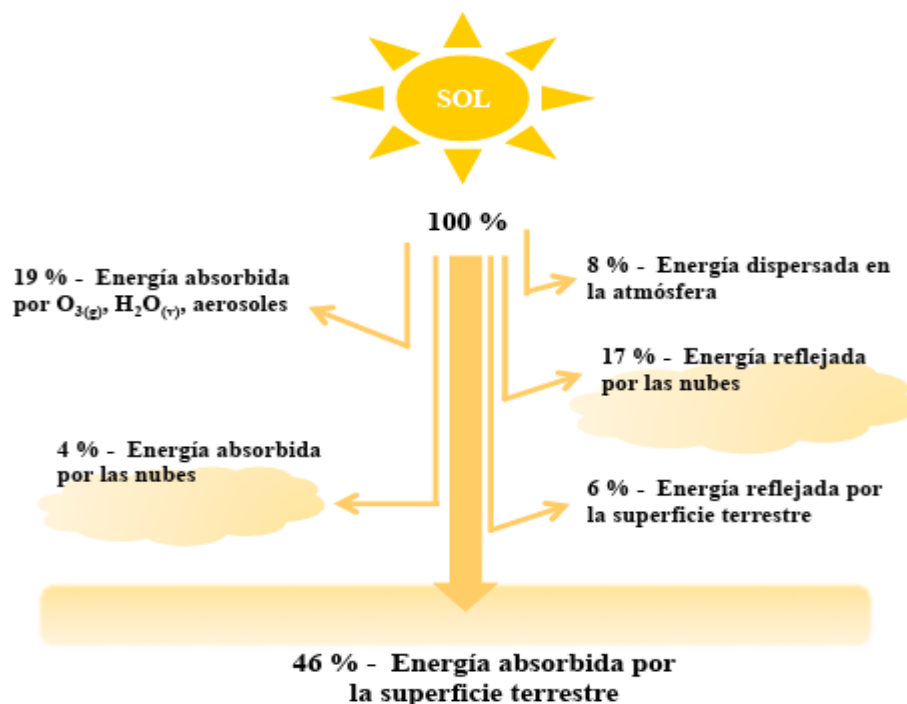
Figura 5 Espectros solares a nivel del mar y de cuerpo negro a 6000 K



Nota. (Iribarne & Cho, 1980).

Por otro lado, otros factores determinan la cantidad de radiación que alcanza la superficie terrestre. Del 100% de la energía solar que alcanza el tope de la atmósfera aproximadamente el 23% es reflejado nuevamente al espacio por las nubes (17%) y la superficie (6%). El aire la reduce en un 8% por procesos de dispersión, mientras que la absorción de las nubes, el material particulado, el O_3 (g) y H_2O (v) la atenúan en conjunto un 23%. El calor que logra alcanzar la superficie es restituido al espacio en forma de radiación de onda larga (por procesos de conducción y convección). Sin embargo, ciertos gases como H_2O (v) y CO_2 reflejan parte de esta radiación nuevamente a la superficie. La cuantificación de la energía que incide y se libera sobre la superficie terrestre se denomina Balance Energético de la Tierra (Achad, 2015).

Figura 6 Esquema del Balance Energético de la Tierra



Nota. (Iribarne y Cho, 1980).

2.3. Bases conceptuales

2.3.1. Material particulado

Los contaminantes de material particulado (PM) o aerosoles son materia sólida o gotas líquidas que comúnmente se manifiestan como polvo, suciedad, hollín, humo y gotas de líquido. Por otro lado, se incluye PM_{2.5} y PM₁₀, y la combinación de ambos se denomina material particulado total (TPM) (Koren & Bisesi, 2003).

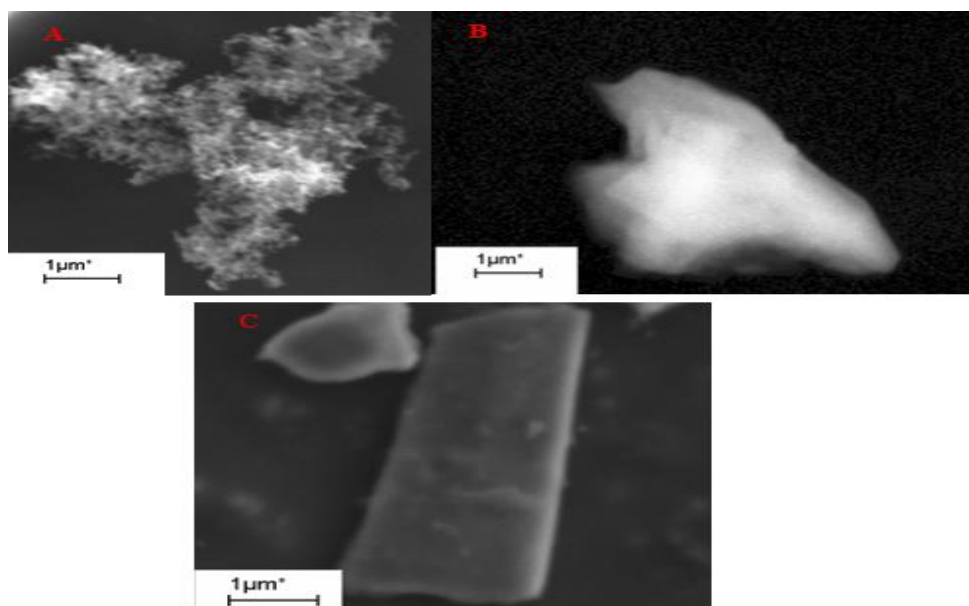
El PM₁₀ tiene un diámetro menor o igual a 10 μm y PM_{2.5} tiene un diámetro menor o igual a 2.5 μm . PM_{2.5} consiste en dos tipos de partículas de diferentes tamaños: ultrafinas (diámetro de 0.01 a 0.1 μm) y finas (diámetro de 0.1 a 2.5 μm) (Tiwary & Colls, 2010).

Las formas de las partículas varían y dependen de su composición química y de cómo se forman. Pueden ser esféricas, cúbicas cristalinas o tener una morfología irregular. También pueden ser planas, en capas o globulares, y sus superficies pueden ser lisas o irregulares y porosas (Godish et al., 2014).

2.3.2. Material Particulado (PM 2.5)

Las partículas PM_{2.5}, definidas por su diámetro aerodinámico $\leq 2,5$ micrómetros, se originan predominantemente de la combustión de hidrocarburos fósiles con contenido de azufre y de oxidantes fotoquímicos generados en la atmósfera mediante reacciones complejas entre hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y monóxido de carbono (CO). Estos aerosoles secundarios, que representan más del 50 % de la masa particulada, constituyen el principal agente de alteración del balance radiativo terrestre, reducción de la visibilidad atmosférica y formación de bruma fotoquímica (smog). En consecuencia, tanto su concentración como la composición química de la fracción particulada exhiben alta variabilidad espaciotemporal, dependiendo críticamente de factores como las condiciones meteorológicas, la ubicación geográfica y las características de las fuentes emisoras (Sun et al., 2019).

Figura 7 Imagen sobre fracciones de PM 2.5

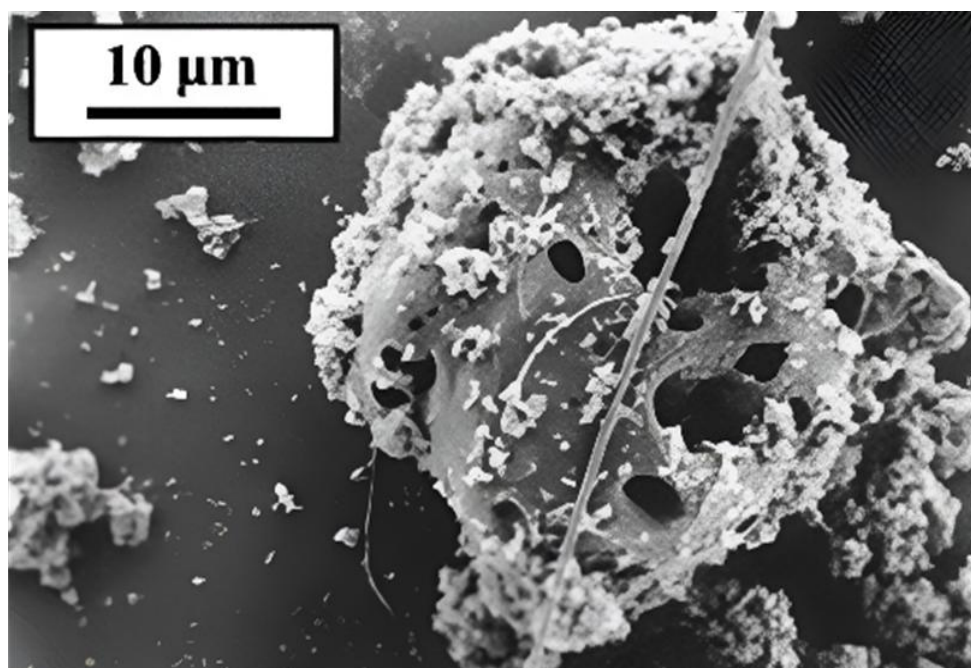


Nota. Muestra de imagen de material particulado PM 2.5. (A) partícula carbonácea, (B) partícula de silicato y (C) partícula de óxido de hierro. (Achad, 2015).

2.3.3. Material Particulado (PM 10)

PM10 se refiere a las partículas en suspensión de menos de 10 μm de diámetro aerodinámico y generalmente comprende la mayoría de la masa de partículas. Las partículas de tamaño inferior a 10 μm pueden penetrar fácilmente a través de las vías respiratorias nasales y de la cabeza para llegar a los pulmones. Por otro lado, las partículas de más de 10 μm pueden ser eliminadas por los pelos en la parte frontal de la nariz. La dimensión del PM10 según microscopía electrónica de barrido (SEM) es aproximadamente 30 μm de largo y 1 μm de ancho que corresponde una partícula de ceniza volantes recubierta con partículas de hollín (Jones et al., 2006). (Ver figura 8).

Figura 8 Imagen SEM de partículas de cenizas volantes



Nota. La imagen de microscopio de barrido (SEM) muestra material particulado grueso con diámetro de 10 micrómetros (μm) (Jones et al., 2006)

2.3.4. Fuentes y composición de material particulado

2.3.4.1. Emisiones de polvo del suelo y fugitivas

Estas partículas son de origen natural comprenden la fracción mineral que se crea predominantemente a través de las acciones dinámicas y a menudo contundentes de los vientos que interactúan con la superficie de la Tierra. Es

imperativo tener en cuenta que el polvo del suelo desempeña un papel importante como uno de los principales contribuyentes a la carga mundial de aerosoles, y está asociado con una multitud de impactos consecuentes relacionados con el forzamiento radiativo, las propiedades reflectantes del hielo y la nieve y su función como núcleos de condensación tanto para las nubes como para los núcleos de hielo (Zhang et al., 2010).

2.3.4.2. Quema de biomasa

El proceso de combustión de biomasa abarca la incineración de diversos ecosistemas, incluidos, entre otros, bosques, terrenos montañosos, pastizales expansivos y varias tierras agrícolas que se cultivan para la producción de alimentos. Cabe destacar que los incendios de biomasa contribuyen significativamente a las emisiones generales de partículas, incluidas cantidades sustanciales de cenizas y partículas gruesas (Maruf Hossain et al., 2012)

2.3.4.3. Fuentes misceláneas

Las fuentes misceláneas incluyen: a) partículas de caucho ($>2.5 \mu\text{m}$) por abrasión neumático-vial, b) bioaerosoles (polen, esporas, microorganismos, detritos vegetales) y c) material meteórico. Los bioaerosoles, dispersados por acción eólica, representan componentes naturales críticos en la carga particulada atmosférica (Duque et al., 2013).

2.3.5. Efectos de material particulado en la salud

La inhalación de PM 2,5 puede estimular efectos en el sistema cardiovascular a través de tres vías biológicas principales. El desarrollo de aterosclerosis, o la acumulación de placa en las arterias, se ha relacionado con la exposición al PM, lo que puede provocar que los vasos sanguíneos se contraigan y se endurezcan, aumentando así el riesgo de sufrir eventos cardiovasculares, como un infarto de miocardio. Asimismo, la exposición al PM, en particular a las partículas finas, se ha vinculado con un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares, como arritmias, insuficiencia cardíaca y cardiopatía coronaria. Esta relación se explica por la disfunción vascular, el estrés oxidativo y la inflamación (Taha et al., 2025).

2.3.6. Procesos de remoción de material particulado

Las partículas pueden ser removidas del aire a través de distintos procesos, como la deposición húmeda (lluvia o nieve) y la deposición seca. La cuantificación de estos mecanismos sigue siendo objeto de estudio, especialmente la deposición seca, que depende de múltiples parámetros específicos del sitio (Pryor et al., 2008).

La lluvia se origina cuando un núcleo de condensación se activa para formar una gota de agua líquida o un cristal de hielo, que al crecer y fusionarse con otros origina lluvia o granizo. Al precipitar, estas gotas o cristales arrastran los aerosoles. El lavado ocurre cuando las partículas de precipitación, en crecimiento o en caída, coagulan con aerosoles presentes dentro de las nubes o en la atmósfera inferior, transportándolos hasta la superficie. En conjunto, la lluvia y el lavado constituyen los mecanismos de remoción de aerosoles más importantes a nivel global (Jacobson, 2010).

La sedimentación corresponde al descenso de partículas debido a su propio peso, en oposición a la fuerza de arrastre del aire. La deposición seca, en cambio, ocurre cuando gases y partículas son transportados por difusión molecular, turbulencia o vientos hacia superficies como vegetación, rocas, océanos o infraestructuras, donde pueden depositarse, adherirse o reaccionar. Ambos procesos son relevantes: la sedimentación, para partículas grandes en cortos plazos, y la deposición seca, para partículas pequeñas en lapsos más prolongados (Achad, 2015).

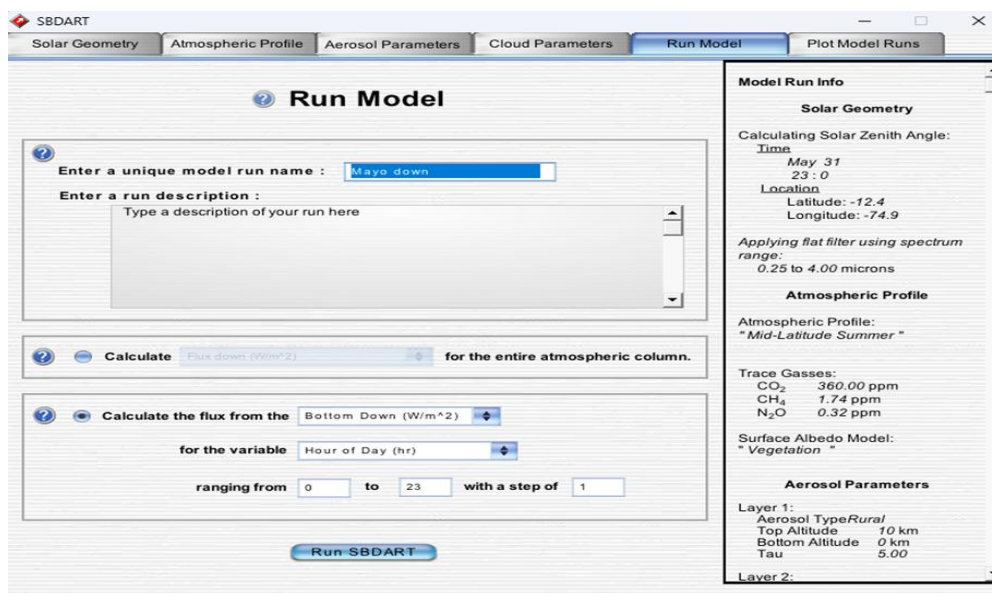
2.3.7. Modelo SBDART

El modelo SBDART es conocido por su exactitud y eficiencia computacional para resolver las ecuaciones de transferencia radiativa. Su código fuente está basado en el enfoque discreto ordenado (DISORT) para una atmósfera verticalmente no-homogénea, no-isotérmica y plano paralelo. (Ricchiazi et al., 1998)

Así mismo, el modelo SBDART permite incorporar aerosoles troposféricos a las simulaciones a través de los perfiles de diferentes clases

aerosoles que contiene el modelo por defecto: urbanos, rurales, marítimos, continentales y un perfil a definir por el usuario. Las diferencias entre ellos se basan en la variación de sus propiedades ópticas con la longitud de onda y en su dependencia con la humedad relativa superficial (Shettle & Fenn, 1979). (Ver Figura 9)

Figura 9 Interfaz de usuario web para SBDART



Nota. Modelamiento de SBDART archivo de entrada. Elaboración propia (2024).

Para procedimiento de modelamiento SBDART se tomó como parámetros de entradas como:

&INPUT

- IATM = 0 ! Modelo atmosférico estándar (tropical)
- IAER = 1 ! Aerosoles tipo "troposféricos"
- TAU = 5.0 ! Espesor óptico total (a 0.55 μm)
- WLINF = 0.25 ! Longitud de onda inicial (μm)
- WLSF = 4.0 ! Longitud de onda final (μm)
- WLINC = 0.01 ! Incremento espectral (μm)
- ZOUT = 10.0 ! Altura de salida (km)
- IDB = 3 ! Calcula flujos ascendentes/descendentes
- ISCAT = 1 ! Modo bottom-up (discreto)
- SZA = 0.0 ! Ángulo cenital solar (0° = cenit)
- ALBEDO = 0.5 ! Albedo de superficie (0 = superficie negra)
- IOUT = 7 ! Salida espectral detallada

2.3.8. Dispersión de partículas

La dispersión de partículas comprende diversos fenómenos físicos y enfoques de modelado que explican cómo estas se transportan a través de distintos medios. Este campo integra principios de dinámica de fluidos, procesos estocásticos y ciencia de materiales, lo que permite una comprensión más completa del comportamiento de las partículas bajo diferentes condiciones ambientales (Buan et al., 2023).

2.3.9. La velocidad del viento

La velocidad del viento se cuantifica como el aspecto horizontal del desplazamiento del aire que se produce en un lugar específico y en un punto determinado en el tiempo, que se lleva a cabo mediante la utilización de un instrumento especializado conocido como anemómetro. La unidad de medida utilizada para este propósito se expresa en metros por segundo m/s (Arrieta, 2016).

2.3.10. La dirección del viento

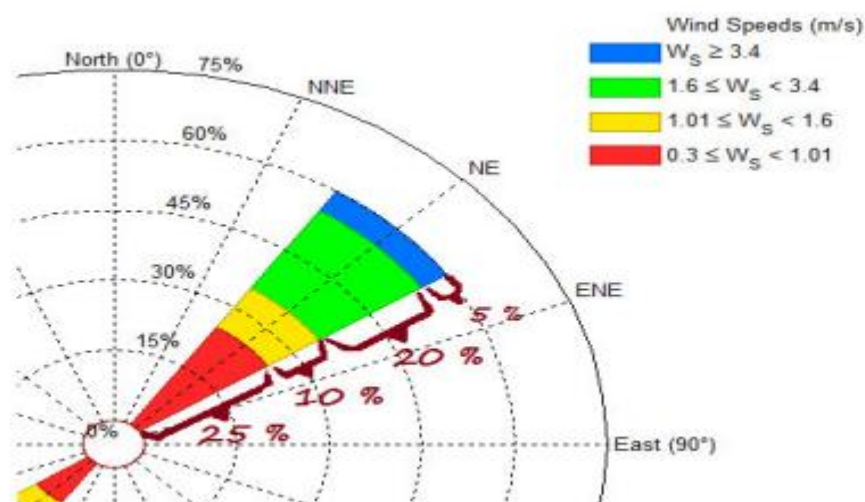
La orientación del viento tiene una importancia significativa, ya que sirve como un indicador vital no solo de la fuente de la que proviene el viento, sino también de la trayectoria a lo largo de la cual avanza. La medición de la dirección del viento se expresa en grados, que van desde 0° —aunque este grado específico no está incluido en la medición— hasta 360° , que sí está incluido; esta medida se toma girando en el sentido de las agujas del reloj en un plano horizontal que se conceptualiza desde una perspectiva aérea. Los valores que están muy cerca de 1° y 360° indican que el viento proviene del norte, mientras que un valor cercano a los 90° significa que el viento viene del este y, del mismo modo, un valor de 180° indica que el viento sopla del sur, mientras que un valor de 270° revela que el viento proviene del oeste (Ccasani, 2019).

2.3.11. Rosa de vientos

La rosa de los vientos, que también se conoce como rosa náutica, es un instrumento visual inestimable que nos ayuda de manera significativa a comprender varios fenómenos meteorológicos de una manera práctica y

sencilla, debido a su capacidad de proporcionarnos información crítica sobre la frecuencia con la que se encuentran las velocidades del viento cuando provienen de cada uno de los puntos cardinales. Esto, a su vez, nos permite identificar eficazmente los vientos predominantes o predominantes en diferentes escalas temporales, que van desde intervalos breves, como minutos u horas, hasta períodos más prolongados, que van desde días hasta meses; además, también proporciona información sobre la frecuencia y los orígenes de los patrones de viento más intensos (Ccasani, 2019).

Figura 10 Rosa de viento simplificado



Nota. (Ccasani, 2019).

La Figura 10 (rosa de vientos) evidencia la dominancia del componente noreste, representando el 25% de los vientos en el estrato $0.3\text{--}1.01\text{ m s}^{-1}$. Esta dirección acumula adicionalmente: 10% en $1.01\text{--}1.6\text{ m s}^{-1}$, 20% en $1.6\text{--}3.4\text{ m s}^{-1}$, y 5% en $\geq 3.4\text{ m s}^{-1}$, totalizando el 60% de los registros válidos para el NE (Ccasani, 2019).

2.4. Base legal

2.4.1. Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire

Los parámetros para el diseño de estaciones de monitoreo estuvieron establecidos de acuerdo con el protocolo nacional Decreto Supremo N° 010-2019-MINAM, consistió en identificar técnicas adecuadas para monitorear la calidad del aire, junto con consideraciones

para su aplicación. Además, se aclaran las referencias y métodos comparativos para determinar medidas de calidad del aire, incluidos protocolos de medición basados en estándares técnicos nacionales e internacionales. Asimismo, se incluyen los aspectos que deben observarse al emplear métodos alternativos o controlar parámetros insuficientes, junto con criterios para la selección adecuada de técnicas de medición que tengan en cuenta las diferentes circunstancias de la contaminación atmosférica.

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación que se utilizó es la aplicada porque se centra en generar conocimiento que pueda ser utilizado directamente para mejorar situaciones en entornos reales (Kushwaha et al., 2024). Por ello, según la data de material particulado se procesó mediante modelo de programación de paquete open air de R Studio, donde se generó los gráficos de dispersión por material particulado.

3.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación es descriptivo no experimental, porque no implica manipular variables ni predecir resultados, su objetivo principal es describir las relaciones entre las variables o resumir los datos, utilizando estadísticas descriptivas como un promedio para simplificar grandes cantidades de datos (Swatzell & Jennings, 2007). Por ello, se realizó mediciones in situ de material particulado, velocidad y dirección de viento en la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja, en el cual no se manipula ni controla variables. Sin embargo, este tipo investigación y caracterizó describir las condiciones (material particulado y balance de energía), sin intervención ni predicción, lo que de manera independiente resolverá la falta de conocimiento sobre la variación del balance de energía y dispersión de material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024.

3.3.Método de investigación

El método de investigación empleado es inductivo, porque comienza con observaciones específicas (descarga de data de material particulado y balance de energía) y avanza con: hipótesis, teorías y modelos derivados de observaciones empíricas. Esto contrasta con el razonamiento deductivo, que comienza con afirmaciones generales y pasa a conclusiones específicas. La data referente al material particulado (PM2 y PM10) que nos proporcionó el sensor “Profiler” estimándolos en un periodo desde mayo a julio del 2024 (López Morocho & Jaramillo, 2025).

3.4.Diseño de investigación

El diseño de investigación es descriptivo longitudinal que se centra en el examen de fenómenos correlacionados a lo largo de un período de tiempo, porque tiene validez de las inferencias que no son posibles de lograr en la investigación transversal. Permite extraer conclusiones basadas en argumentos que no serían viables si solo se observara un punto en el tiempo (Hunziker & Blankenagel, 2021).

Como se muestra a continuación:

Tabla 1 *Diseño del trabajo de investigación*

Parámetro	Meses de medición (*)		
	Mayo	Junio	Julio
MP10	MP10 _{mayo}	MP10 _{junio}	MP10 _{julio}
MP2.5	MP2.5 _{mayo}	MP2.5 _{junio}	MP2.5 _{julio}
Balance de energía (BE)	BE _{mayo}	BE _{junio}	BE _{julio}
Velocidad del viento (VV)	VV _{mayo}	VV _{junio}	VV _{julio}
Dirección de viento (DV)	DV _{mayo}	DV _{junio}	DV _{julio}

Nota. Elaboración propia (2024). *De cada parámetro de medición en cada mes se calculó el promedio, desviación estándar; como gráficos de dispersión mensualmente.

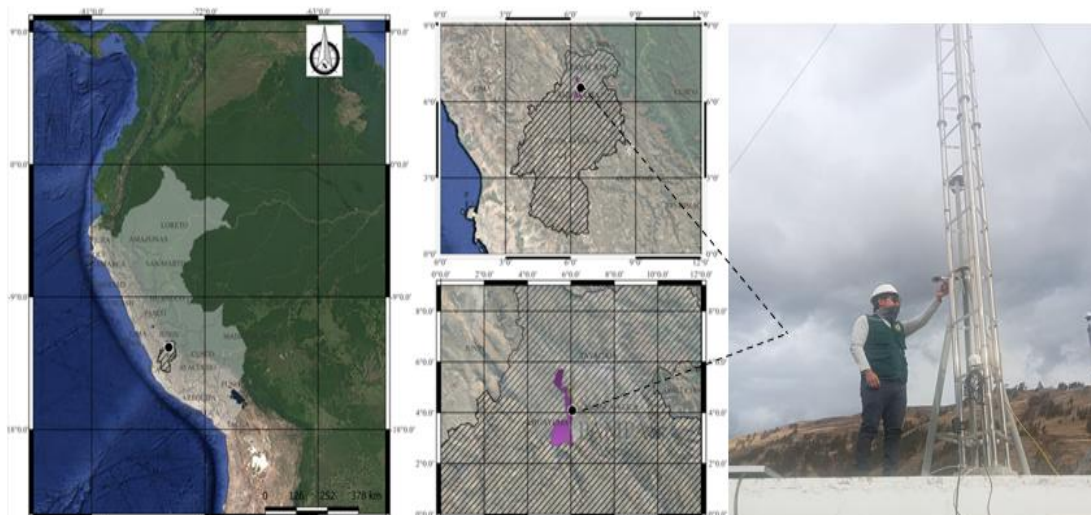
3.5.Población, muestra y muestreo

3.5.1. Población

Es la data registrada en el sensor Profiler de material particulado PM 2 y 10 y nivel de radiación solar que ingresa a la capa troposférica en el

Distrito de Ahuaycha – Tayacaja durante los meses de Mayo – Julio del 2024 (Ver Figura 11).

Figura 11 Referencia de la población data del material particulado



Nota. Elaboración propia (2024).

3.5.2. Muestra

La muestra se consideró la data diaria del material particulado (PM2 y PM10), velocidad de viento y dirección del viento registrados con sensor Profiler Model 212 y estación meteorológica durante el mes de mayo – hasta julio del 2024.

3.5.3. Muestreo

Muestreo por conveniencia.

3.6. Identificación y operacionalización de variables

Variable independiente: Material particulado MP 2 y MP 10.

Variable dependiente: Dispersión y balance de energía.

Tabla 2 *Matriz de Operacionalización de las variables*

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida	Instrumento
Variable independiente Material particulado	El termino conceptual de material particulado PM10 se refiere a las partículas en suspensión de menos de 10 µm de diámetro aerodinámico y generalmente comprende la mayor parte de la masa de partículas. Dentro del rango de tamaño de PM10, las partículas de menos de 2 µm se describen como finas, mientras que la fracción de 2.5 a 10 µm se denomina gruesa. Así mismo, las formas de las partículas varían y dependen de su composición química y del proceso de formación. Pueden ser esféricas, cúbicas cristalinas o tener una morfología irregular. También pueden presentarse en formas planas, en capas o globulares, y sus superficies pueden ser lisas, irregulares o porosas (Godish et al., 2014).	Para determinar el material particulado se ha utilizado el contador de partículas Profiler Met one model 212; y a partir de ello se estimará su dispersión atmosférica (Brattich et al., 2020).	Material particulado de 2.5 µm	Material particulado de 2.5 µm	Número de partícula/cm ³	Contador de material particulado (Profiler-Metone model 212).
			Material particulado de 10 µm	Material particulado de 10 µm	Número de partícula/cm ³	

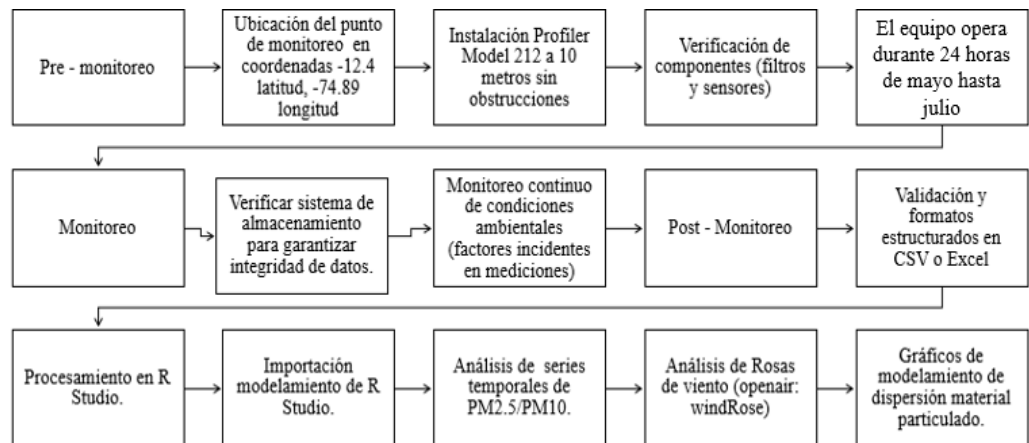
Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida	Instrumento
Variable dependiente Balance de energía	El termino conceptual de balance energético atmosférico se refiere al equilibrio entre la radiación solar entrante y la energía saliente de la Tierra, incluida la luz solar reflejada y la radiación térmica. Es crucial para comprender la dinámica climática, los patrones de precipitación y la distribución de energía en la atmósfera (Kato et al., 2016).	Para determinar el balance de energía se utilizó el software SBDART (Wang et al., 2021)	Irradiancia	Radiancia difusa	W/m^2	SBDART

3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.7.1. Técnicas

En la investigación se empleó la técnica de la observación, que consiste en observar el fenómeno del estudio para proceder a registrar la información, y realizar su respectivo su análisis (Hernández, 2018).

Figura 12 *Técnica de recolección*



Nota. Elaboración propia (2025)

3.7.2. Instrumentos

La estación meteorológica de marca Lufft- WS601-UMB permitió obtener data de velocidad y dirección del viento, para interpolar con la concentración de material particulado. Los datos nos sirven para determinar la dispersión de material particulado y cómo influye el balance de energía en el área de estudio.

Figura 13 Estación meteorológica de marca Lufft- WS601-UMB



Fuente: Elaboración propia, 2024.

El sensor Profiler Model 212 proporcionó datos de número de material particulado en la atmósfera. Esta información permitirá determinar influye balance de energía con la presencia de material particulado, y la dispersión de estas contribuyendo a la calidad de procesamiento de datos para mitigar posibles impactos ambiental.

Figura 14 Sensor Profiler Model 212



Fuente: (Chavez & Orellana, 2025).

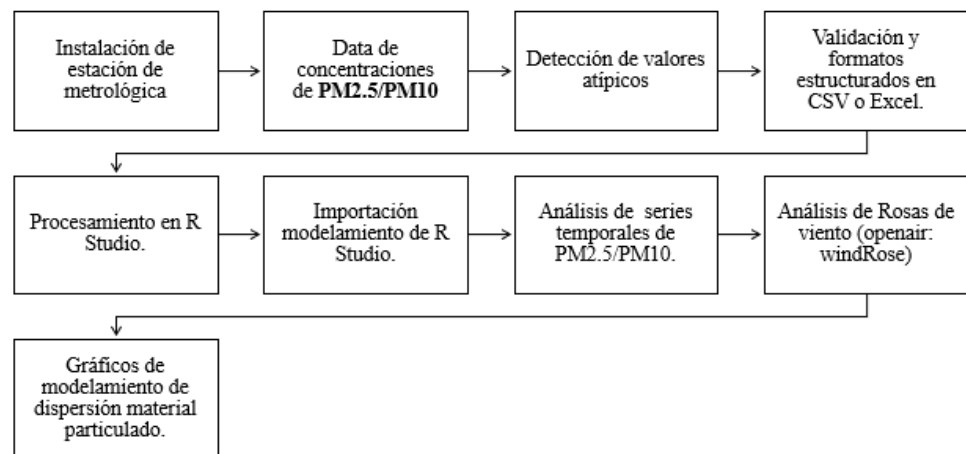
3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

3.8.1. Trabajo en gabinete

I. Proceso de gabinete para determinar material particulado (PM2.5) y (PM10)

El trabajo comienza con la instalación de una estación meteorológica, que es la encargada de registrar las concentraciones de PM2.5 y PM10 en el aire. Una vez obtenidos los datos, se revisan cuidadosamente para detectar valores atípicos y, después de esta limpieza, la información se organiza en formatos accesibles, como CSV o Excel, para facilitar su manejo. Con los datos ya listos, se procede a trabajar en R Studio, donde primero se realiza la importación y preparación para el modelamiento. En esta etapa se llevan a cabo dos análisis principales: por un lado, el estudio de series temporales de PM2.5 y PM10, que permite observar cómo varían las concentraciones a lo largo del tiempo; y, por otro, el análisis de rosas de viento, utilizando la librería openair, lo que ayuda a identificar la dirección y frecuencia del viento en relación con la dispersión de los contaminantes. Finalmente, todo este proceso se traduce en la elaboración de gráficos de modelamiento de dispersión del material particulado, que ofrecen una visión clara y visual de cómo se comportan estas partículas en la atmósfera. (Ver Figura 15).

Figura 15 Proceso de gabinete para análisis de material particulado



Fuente: Elaboración propia, 2024.

II. Modelamiento de balance de energía

Se configuro parámetros específicos (tipo de atmósfera, rango espectral, ángulo solar) y se ejecutó simulaciones de transferencia radiativa que calculan los componentes del balance energético: bottom up y bottom down mediante el software SBDART para realizar modelamiento de balance de energía.

3.8.2. Análisis de datos

En la investigación, se empleó diseño descriptivo longitudinal, con respecto a parámetros de: velocidad del viento, dirección del viento, PM10 y PM2.5, se utilizó estadística descriptiva para calcular promedio aritmético y realizar importación de data de modelamiento de material particulado mediante el software R studio. Así mismo, se configuró parámetros específicos (tipo de atmósfera, rango espectral, ángulo solar) y ejecuta simulaciones de transferencia radiativa que calculan los componentes del balance mediante software SBDART.

3.9.Aspectos éticos y regulatorios

Está basada en el código de ética de la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja “Daniel Hernández Morillo”.

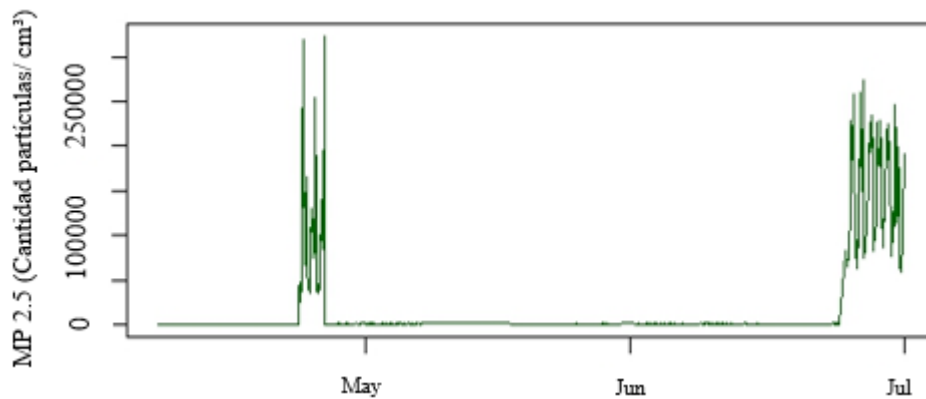
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

Variabilidad del material particulado

El Gráfico 1 muestra que la concentración máxima de PM_{2.5} registrada en mayo (250,000-250,100 N° partículas/cm³). Durante junio no se observaron variaciones significativas, manteniéndose niveles similares al mes anterior. En el mes julio decreció en 200,000 N° partículas/cm³. Sugiriendo que hay estabilidad intermedia (mayo-junio) seguida de reducción temprana en julio.

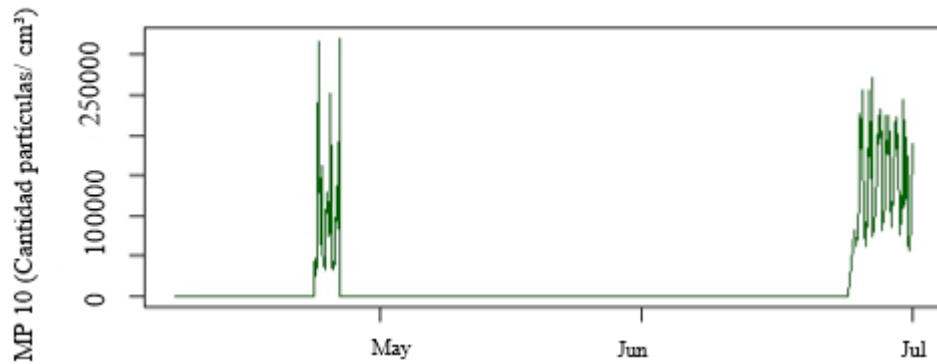
Gráfico 1 Series temporales de dirección del viento en los meses de mayo – julio, 2024



Nota. Elaboración propia (2024).

El gráfico 2 muestra que, los resultados obtenidos de los niveles de PM₁₀ reveló que la distribución temporal en el mes de julio se registró la concentración máxima igual a 250,000 partículas/cm³, lo que representa el segundo valor más elevado del periodo de estudio. Sin embargo, los picos más críticos se presentaron en mayo, cuando durante dos días consecutivos se alcanzaron 300,000 partículas/cm³. Finalmente, en el mes de junio también exhibió los valores más bajos, con concentraciones que llegaron a 0 partículas/cm³ en determinados momentos.

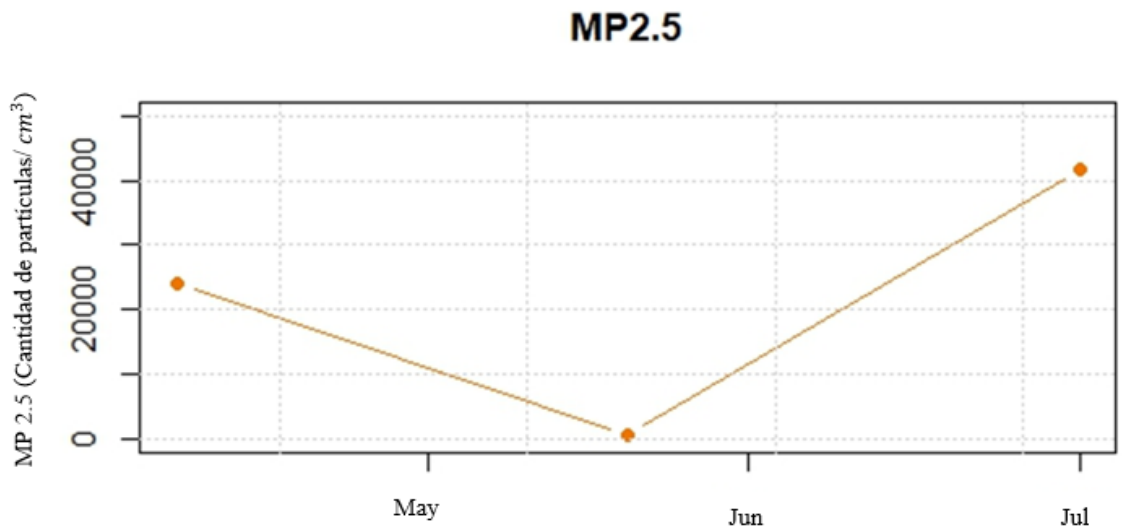
Gráfico 2 Series temporales de concentración de PM10 (N° de partículas/cm³)



Nota. Elaboración propia (2024).

El gráfico 3 muestra que, el monitoreo de concentración de material PM 2.5 inicial fue más elevada en el período analizado, alcanzando un valor de 20,400 (N° partículas/cm³). Sin embargo, a lo largo del mes de junio se observó una disminución pronunciada y sostenida en los niveles de PM2.5 igual a 0. Esta tendencia indicó fenómeno de dispersión atmosférica eficiente o una reducción sustancial en las fuentes de emisión durante este mes. Finalmente, los resultados observados en el mes de julio presentaron un incremento sustancial de concentraciones de material particulado, la concentración alcanzó un valor máximo en el período de estudio de 40,010 N° partículas/cm³ de PM2.5, el valor representa aproximadamente el 196% del nivel máximo medido en mayo ($40,010 / 20,400 \approx 1.96$), constituyéndose como la concentración más alta durante el monitoreo en la investigación.

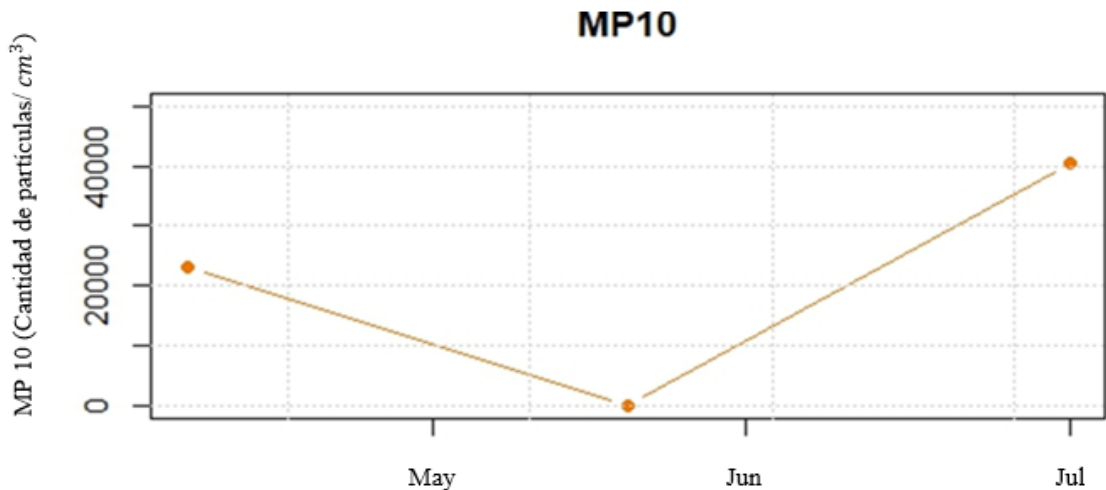
Gráfico 3 Concentración de PM 2.5 (Cantidad de partículas/cm³)



Nota. Elaboración propia (2024).

El gráfico 4 muestra que, en el mes de mayo se registró una concentración de 20,100 (N° partículas/cm³) de PM₁₀, estableciendo la línea base inicial para el análisis comparativo posterior. Por otro lado, a lo largo del mes de junio se registró una tendencia decreciente continua en los niveles de material particulado, culminando en los valores mínimos detectables del estudio. Estas concentraciones alcanzaron niveles próximos al límite de detección metodológica (< 1 partícula/cm³), fenómeno que sugiere procesos de dispersión atmosférica acelerada o una reducción significativa en las fuentes emisoras durante dicho período. Finalmente, en el mes de julio presentó un incremento excepcional en las concentraciones de PM₁₀, registrando un valor máximo de 40,000 N° partículas/cm³. Este pico representó un aumento del 99% respecto a la concentración inicial de mayo ($40,000 / 20,100 \approx 1.99$), constituyéndose como la máxima carga particulada documentada en toda la investigación.

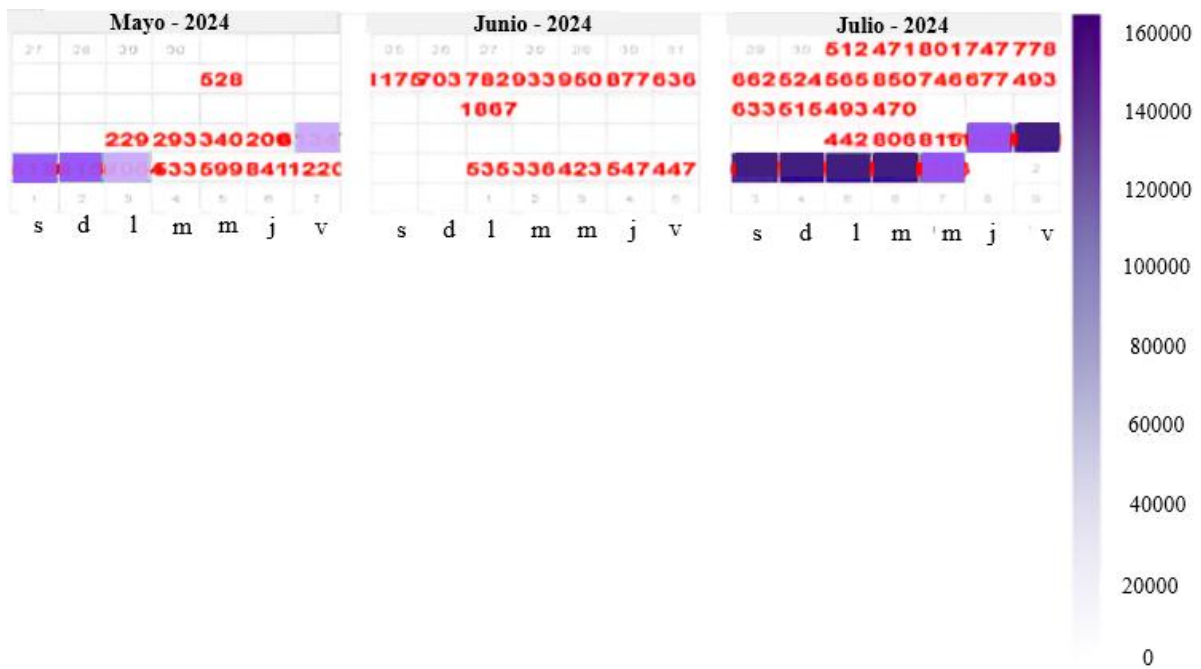
Gráfico 4 Concentración de PM 10 (Cantidad de partículas/cm³)



Nota. Elaboración propia (2024).

El gráfico 5 muestra que, el análisis del calendario de contaminantes reveló que en mayo se registraron las concentraciones iniciales más elevadas, oscilando entre 60 100 y 40 000 N°partículas/cm³, con tendencia decreciente hacia fines de mes. En junio se observó una reducción drástica, con valores entre 336 y 1867 partículas/cm³, constituyendo el período de menor concentración. Contrariamente, julio presentó las mayores concentraciones del estudio, alcanzando un pico sostenido de 150 000 partículas/cm³ durante cinco días consecutivos, con valores promedio próximos a 100 000 N°partículas/cm³ y una variabilidad diaria mínima (0,1%), lo que indica condiciones atmosféricas persistentes que favorecieron la acumulación de partículas. Estos hallazgos demuestran fluctuaciones intermensuales extremas en la dispersión de PM_{2.5}, identificándose julio como el mes de mayor retención de contaminantes, en el mes de junio y mayo hubo mejor dispersión.

Gráfico 6 Calendario de las concentraciones de PM10

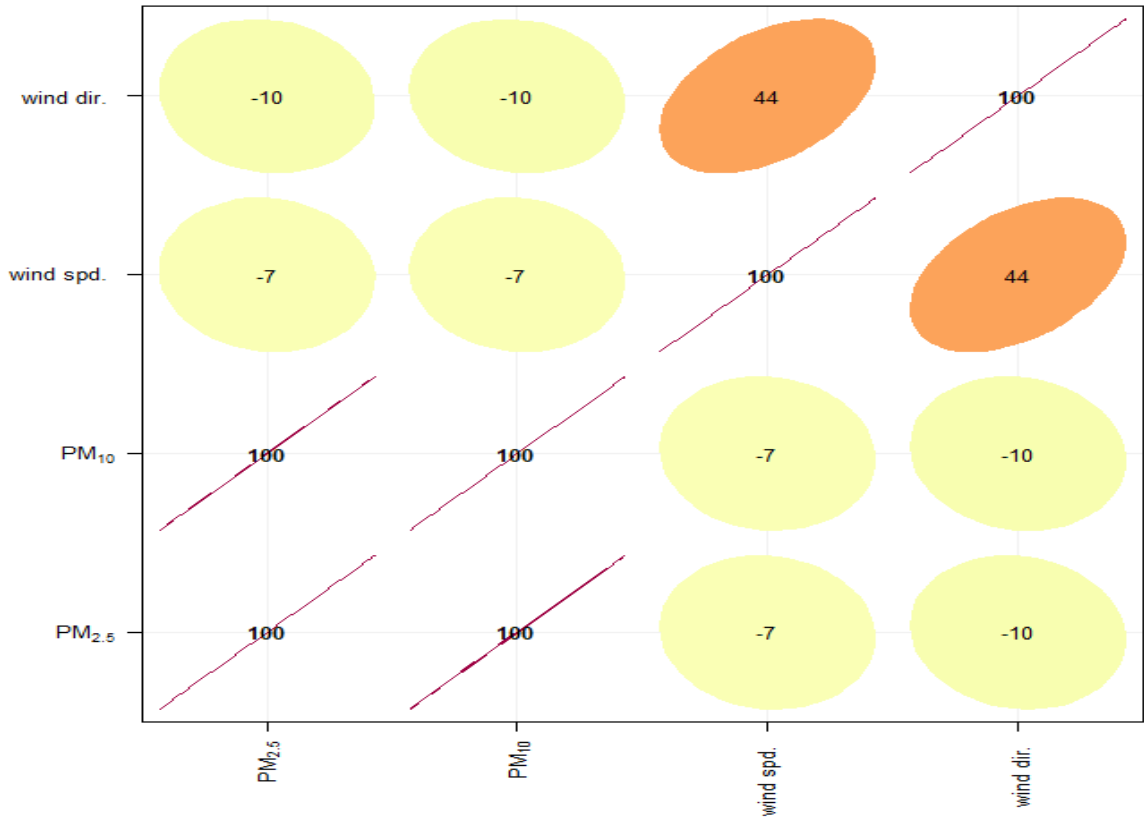


Nota. Elaboración propia (2024).

El gráfico 7 muestra que, el análisis de matrices de correlación (función corPlot de R Studio) reveló patrones significativos sobre la dispersión de material particulado en Ahuaycha. Se evaluaron las relaciones lineales entre cuatro variables críticas: dirección del viento (grados), velocidad del viento (m/s), concentración de PM10 (partículas/cm³) y PM2.5 (partículas/cm³). Los coeficientes de correlación evidencian una covariación perfecta entre PM2.5 y PM10 ($r = 1.00$, $p < 0.001$), indicando que ambas fracciones particuladas presentan comportamientos idénticos durante el periodo de estudio. Esta sincronización sugiere fuentes de emisión son muy comunes y sus procesos de dispersión equivalentes, donde el PM10 estaría predominantemente compuesto por partículas finas (PM2.5) en la zona analizada. Por otro lado, los resultados muestran correlaciones marginales entre las variables como: velocidad, dirección del viento y el material particulado. La velocidad del viento exhibió relaciones débiles y no significativas con PM2.5 ($r = -0.07$) y PM10 ($r = -0.07$), indicando un efecto dispersivo mínimo durante el año 2024. La dirección del viento, por su parte, no mostró asociaciones lineales relevantes con las partículas ($r \approx -0.10$ para ambas fracciones), lo que implica que su impacto requiere análisis complementarios con

métodos circulares. Únicamente se identificó una correlación moderada ($r = 0.44$) entre dirección y velocidad del viento, vinculando ciertas orientaciones del viento con mayores intensidades. Estos hallazgos sugieren que la dispersión de material particulado en Ahuaycha no está dominada por factores de velocidad del viento, sino que respondería principalmente a fuentes de emisión local.

Gráfico 7 Matriz de correlación de velocidad, dirección del viento y material particulado

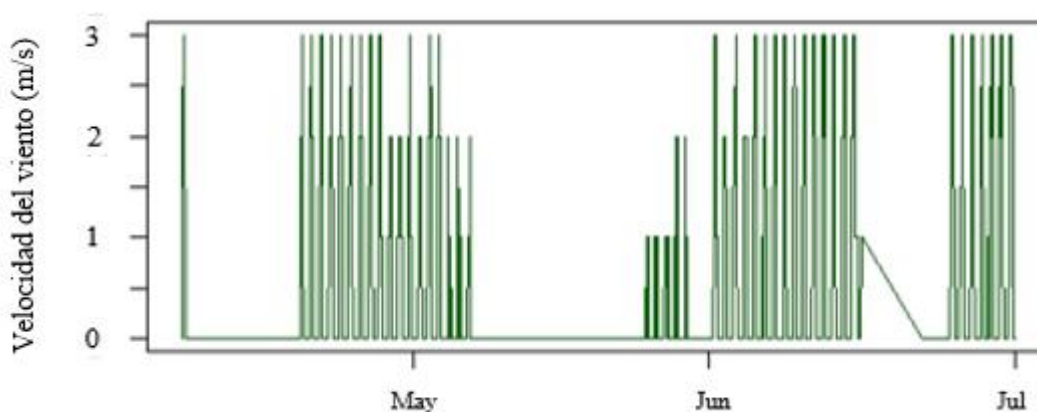


Nota. Elaboración propia (2024). Correlaciones significativas ($p < 0.05$)

Variabilidad de la velocidad y dirección del viento

El gráfico 8, muestra resultados de la velocidad del viento en Ahuaycha (mayo-julio, 2024) se registraron velocidades de 1.0 m/s (mínimo) y 3.0 m/s (máximo). El comportamiento fue homogéneo, sin superar los 3.0 m/s ni descender bajo 1.0 m/s durante el periodo estudiado, es decir, que no se observaron condiciones atmosféricas calma (<0.5 m/s) ni ráfagas superiores a 4 m/s.

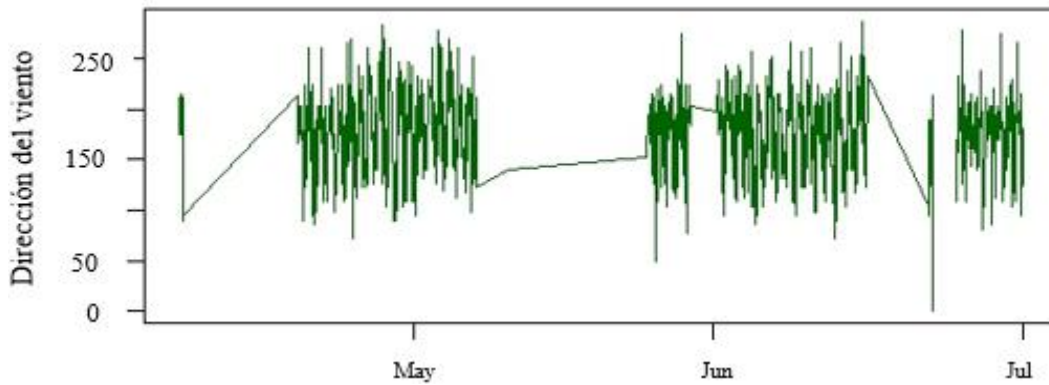
Gráfico 8 Series temporales de velocidad de viento en los meses de mayo- julio, 2024



Nota. Elaboración propia (2024).

Así mismo, el gráfico 9 presenta series temporales de la dirección del viento, y se observó un patrón diferenciado en los meses de mayo y junio la dirección fue predominante hacia el suroeste (SW), con valores superiores a 250° . Finalmente, en el mes de julio se observó rotación significativa hacia el norte (N), con dirección estable en 0° . Este cambio indica una modificación en los patrones de dispersión atmosférica durante el periodo de monitoreo.

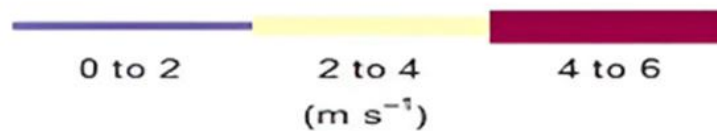
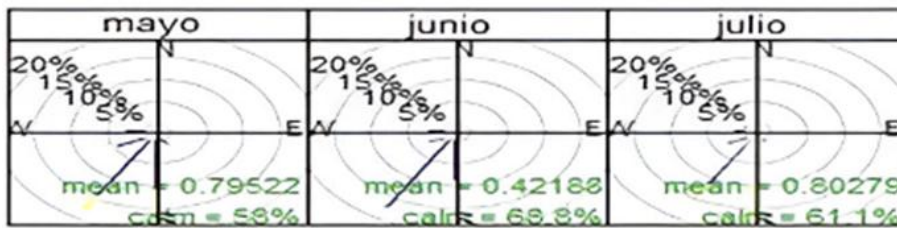
Gráfico 9 Series temporales de dirección del viento en los meses de mayo - julio, 2024



Nota. Elaboración propia (2024).

El gráfico 10 muestra que se identificó un predominio significativo de vientos del sector sureste (SE), los cuales registraron la mayor frecuencia de ocurrencia en el período estudiado. Paralelamente, se observó que las direcciones sursureste (SSE) constituyeron los flujos secundarios más relevantes, con frecuencias aproximadas del 20% y 15% respectivamente. En cuanto a la intensidad del viento, los datos muestran que las velocidades entre 4-6 m/s representaron el rango modal más frecuente, mientras que las intensidades inferiores a 4 m/s mantuvieron una presencia significativa. Esta combinación de factores sugiere una capacidad limitada para la dispersión de contaminantes a escala local, con potencial para el transporte de material particulado generado en fuentes distantes ubicadas en el cuadrante sureste.

Gráfico 10 Diagramas de rosa de los vientos durante el mes mayo - julio



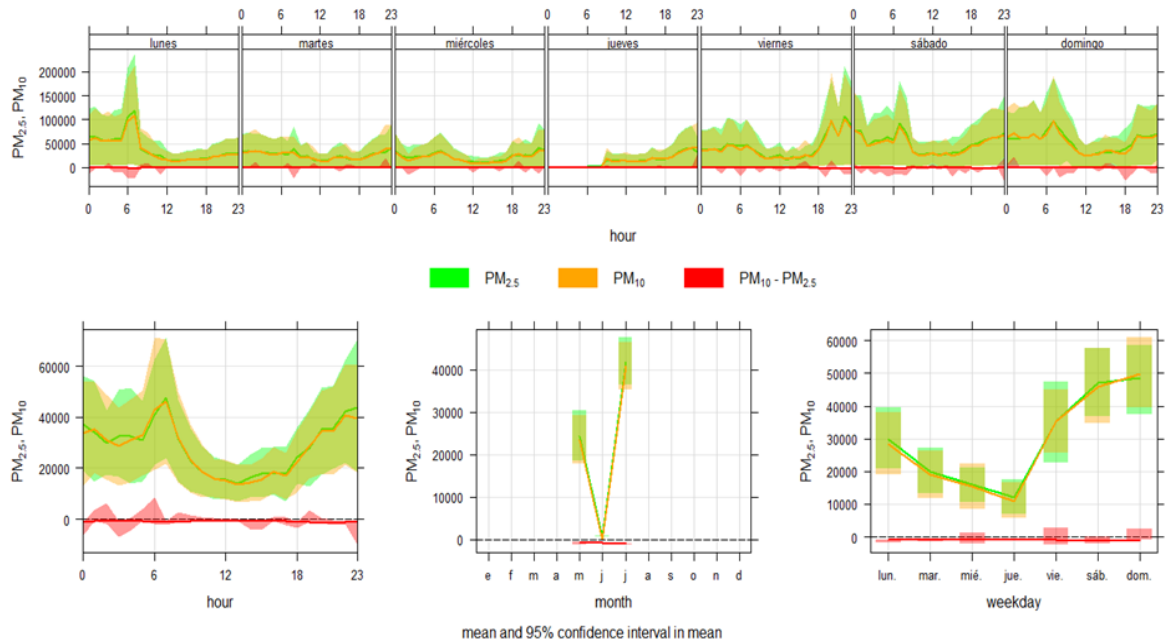
Nota. Elaboración propia (2024).

Variabilidad de la dispersión de material particulado

En el gráfico 11 se muestra que, se identificó el ciclo horario recurrente donde las concentraciones de material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ ambas fracciones particuladas ocurrieron sistemáticamente entre las 06:00 y 22:00 horas, mientras que los mínimos se registraron hacia las 12:00 horas. A escala semanal, los jueves presentaron las menores concentraciones promedio (24 horas), mientras que los lunes, viernes, sábados y domingos exhibieron los valores más elevados, alcanzando sus picos absolutos durante los fines de semana. Las concentraciones diarias oscilaron entre 1,800 N°partículas/cm³ (mínimo registrado) y un rango de 40,000 a 40,150 N°partículas/cm³ (máximo), evidenciando fluctuaciones sustanciales en periodos cortos. Sin embargo, en julio se produjo un incremento excepcional, con valores sostenidos entre 40,000 y 40,100 N°partículas/cm³, lo que sugiere una influencia determinante de estas partículas en el balance atmosférico en el distrito durante la etapa de monitoreo. Paralelamente, en el análisis fueron asociado al resultado de dispersión de material particulado por parámetros del comportamiento homogéneo en la velocidad del viento (Gráfico 8), que se mantuvo en un rango estrecho de 1.0 a 3.0 m/s durante todo el período, sin registrarse condiciones de calma (<0.5 m/s) ni ráfagas superiores a 3.0 m/s. Por otra parte, la

dirección del viento (Gráfico 9) experimentó un cambio significativo: mientras en mayo y junio predominaron vientos del suroeste (SW > 250°), en julio se observó una rotación sustancial hacia el norte (dirección media 0°), alterando los patrones de transporte de material particulado.

Gráfico 11 *Dispersión temporal de PM2.5 y 10 mayo – julio, 2024*

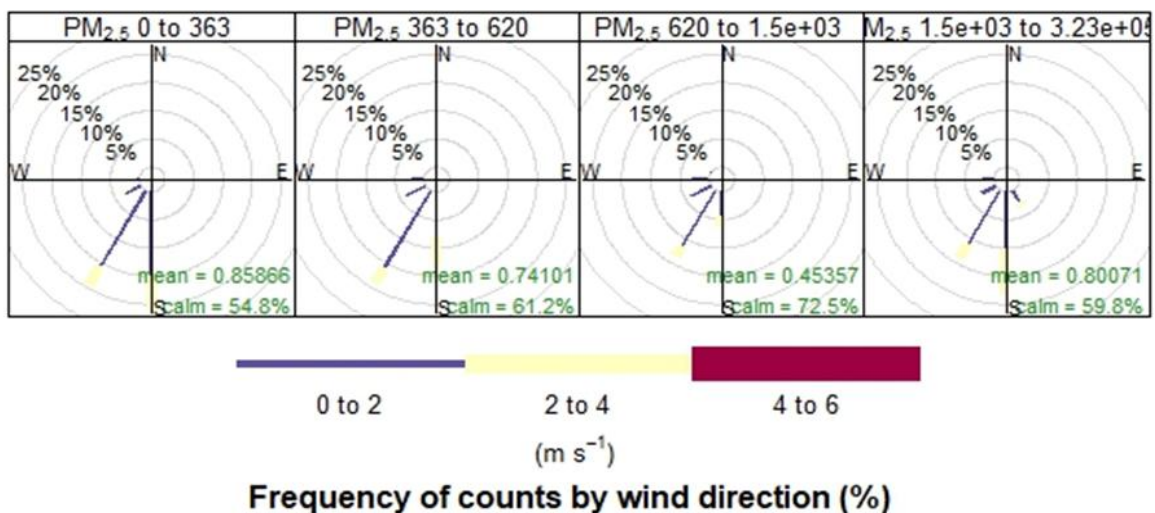


Nota. Elaboración propia (2024). concentración de material particulado PM2.5 y 10, verde (PM10), naranja (PM2.5) y rojo (diferencias de ambos materiales particulados)

El gráfico 12 muestra que, la dispersión de rosa de viento de PM_{2.5} se obtuvo rango de concentración más bajo (0 - 365 N°partículas/cm³), se evidenció una dispersión inicial del 5% de las partículas en dirección suroeste (SW) con una velocidad del viento de 2 m/s. Posteriormente, un 15% del material particulado se dispersó hacia zonas adyacentes del sur (S) bajo la misma velocidad (2 m/s). La dispersión más significativa en este rango, alcanzando un 20%, ocurrió predominantemente hacia el suroeste (SW) y estuvo asociada a una mayor velocidad del viento de 3 m/s. En cuanto al rango de concentración 363 - 620 partículas/cm³, el patrón de dispersión se orientó hacia el suroeste (SW). En este caso, un 5% de las partículas se desplazó inicialmente a 2 m/s, culminando con un

20% del PM2.5 dispersándose en la misma dirección (SW) bajo el efecto de una velocidad viento de 3 m/s. Respecto a las concentraciones medias altas (620 - 1,500 partículas/cm³), la polución mostró dispersión hacia el suroeste (SW). Un 10% de las partículas se dispersó a 2 m/s, seguido por un 15% adicional que se desplazó en la misma dirección (SW) a la velocidad del viento que fue mayor de 4 m/s. Finalmente, las concentraciones más elevadas de PM2.5 (1,500 - 323,000 partículas/cm³) presentaron una tendencia clara de dispersión hacia el suroeste (SW). Se registró un 5% de dispersión a 2 m/s, seguido de un 10% adicional también en sentido suroeste (SW) a 2 m/s. Un 15% de este contaminante se dispersó en la misma dirección (SW) bajo una velocidad de viento de 3 m/s. En todos los rangos de concentración analizados, incrementaron con relación a la velocidad del viento (de 2 m/s a 3 m/s) se asociaron sistemáticamente con mayores porcentajes de material particulado dispersado (entre el 15% y el 20%). Este indica independientemente la concentración inicial de PM2.5, fueron las mayores velocidades del viento las que promovieron una reducción más efectiva de las concentraciones de material particulado facilitando su dispersión espacial.

Gráfico 12 Rosa de polución de PM2.5 para meses de mayo - julio

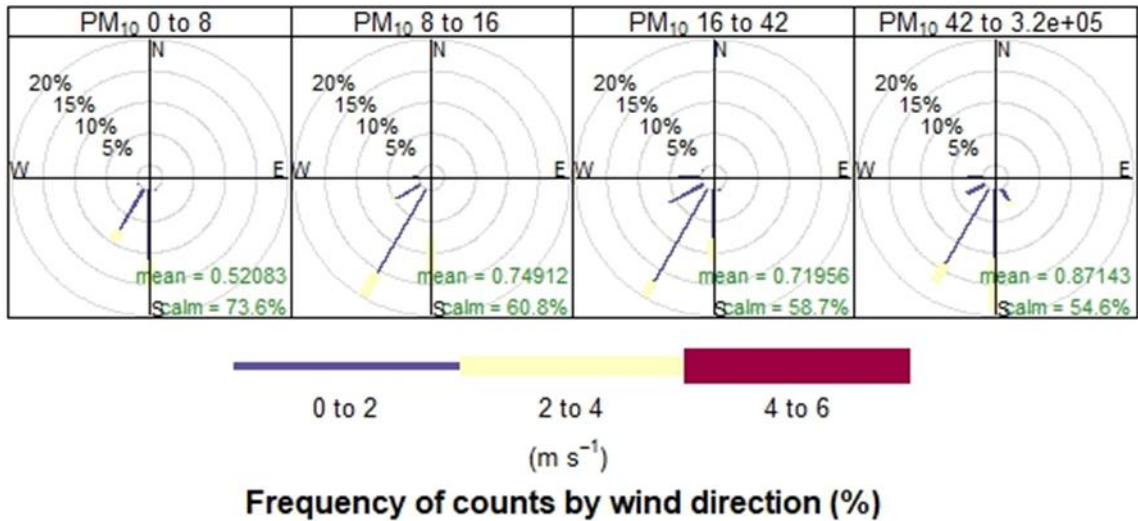


Nota. Elaboración propia (2024).

El gráfico 13 muestra que, el análisis de la rosa de vientos correspondiente a PM10 reveló patrones de dispersión diferenciados según rangos de concentración y velocidad del viento, junto con una prevalencia significativa de vientos calmados en el distrito de Ahuaycha durante 2024. Para el rango de concentración más bajo

(0 – 8 partículas/cm³), se registró una dispersión inicial del 5% de las partículas en dirección suroeste (SW) asociada a una velocidad del viento de 2 m/s. Esta dispersión culminó con un 10% del material particulado transportado en la misma dirección (SW) bajo una velocidad de 3 m/s. Es relevante señalar que este rango presentó la mayor frecuencia de vientos calmados (73.6%). En segundo lugar, el rango de concentración 8 – 16 partículas/cm³, se observó un patrón de dispersión hacia el suroeste (SW), iniciando con un 15% de las partículas desplazadas a 2 m/s y culminando con un 20% dispersado a 4 m/s. La frecuencia de vientos calmados en este rango fue del 60.8%. Así mismo, respecto a concentraciones medias (16 – 42 partículas/cm³), la dirección predominante de dispersión fue también el suroeste (SW). Un 15% del PM10 se dispersó a 2 m/s, seguido por un 20% que se desplazó en la misma dirección (SW) a 4 m/s. La ocurrencia de vientos calmados fue del 58.7%. Finalmente, para el rango de mayor concentración (42 – 323,000 N°partículas/cm³), la tendencia de dispersión se orientó hacia el suroeste (SW). Se evidenció un 5% de dispersión a 2 m/s hacia el suroeste (SW), seguido de un 15% adicional también en sentido suroeste (SW) a 2 m/s. Un 18% de este material particulado se dispersó en la misma dirección (SW) bajo una velocidad de 4 m/s. Este rango registró una frecuencia de vientos calmados del 54.6%. Un hallazgo fundamental es la influencia contrastante de las condiciones de viento. Por un lado, las altas frecuencias de vientos calmados (oscilando entre 54.6% y 73.6% según el rango) limitan significativamente la dispersión espacial del PM10, particularmente en concentraciones bajas y medias. Por otro lado, incrementos en la velocidad del viento (de 2 m/s a 4 m/s) se asociaron sistemáticamente con mayores porcentajes de material particulado dispersado (entre 10% y 20%) en todos los rangos, evidenciando el papel de dispersión del viento. Sin embargo, se observó una relación inversa entre la concentración inicial de PM10 y la magnitud relativa de la dispersión máxima alcanzada (10% en el rango más bajo vs. 18% en el más alto a 3 m/s), sugiriendo que son concentraciones más elevadas, aunque sujetas a la misma influencia limitante de los vientos calmados, pueden experimentar una dispersión más significativa cuando prevalecen velocidades de viento suficientes (3 m/s). Esto refleja la compleja variabilidad espacial de la dispersión de material particulado en función a condiciones atmosféricas de la velocidad y dirección del viento.

Gráfico 13 Rosa de polución de PM10 para meses de mayo – julio, 2024

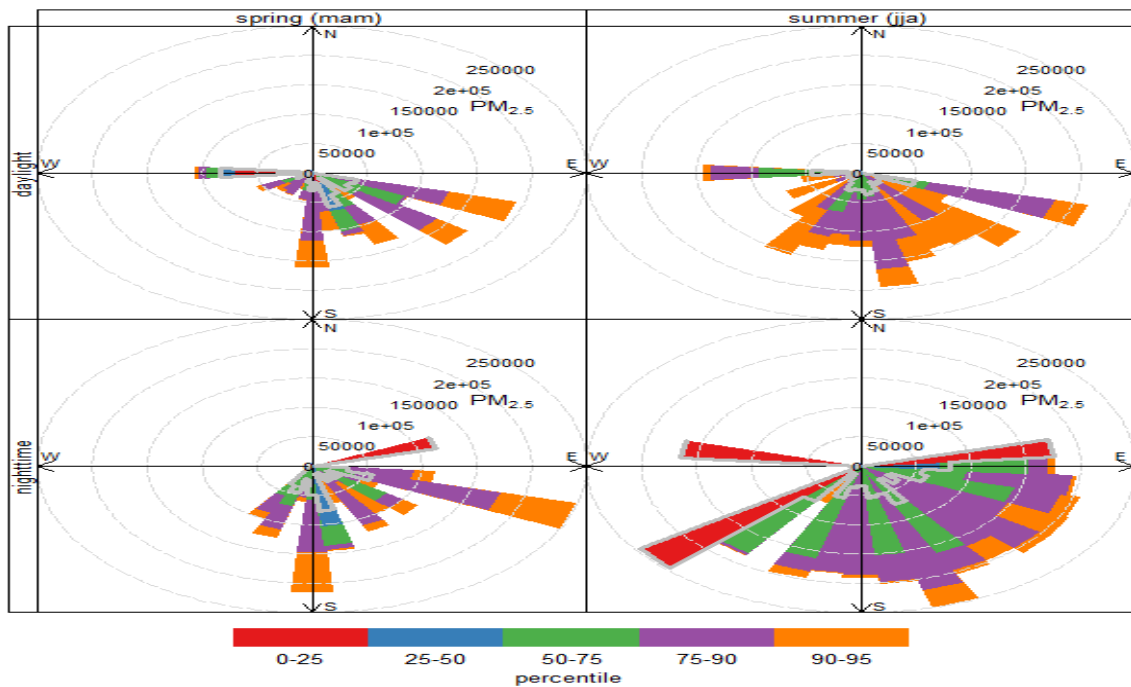


Nota. Elaboración propia (2024).

El gráfico 14 muestra que se analizó mediante percentiles de las concentraciones de material particulado PM_{2.5} y sus direcciones de dispersión en el distrito de Ahuaycha. Los resultados mostraron que percentiles superiores (P90-P95) identifican los episodios de contaminación más extremos, mientras que los rangos intercuartílicos (P25-P75) describen la variabilidad central de los datos. En primer lugar, durante la estación de primavera en el período diurno, se observó marcada asimetría en la distribución de las concentraciones. El valor máximo registrado en el percentil 90-95 (200,005 partículas/cm³) supera en un 25% al límite inferior del rango del cuartil superior (percentil 75-90: 100,000 - 50,000 partículas/cm³), indicando una distribución con cola pesada hacia valores altos de contaminación. Estadísticamente, esto sugiere la influencia de fuentes puntuales o condiciones meteorológicas transitorias que generan picos significativos. La consistencia direccional hacia el sureste en los percentiles altos (P75-P95) apunta estadísticamente a una fuente o área de emisión predominante localizada al noroeste del punto de medición durante el lapso del día. En segundo lugar, el período nocturno en primavera presenta un incremento estadísticamente relevante en las concentraciones máximas (P90-P95: 250,000 - 150,500 partículas/cm³) comparado con el día (200,005 partículas/cm³). Este aumento, cercano al 25% en el límite superior, es consistente con el fenómeno de inversión térmica, que reduce la energía cinética disponible para la dispersión vertical y genera estabilidad atmosférica,

acumulando contaminantes cerca de la superficie. Además, la aparición de una dirección secundaria hacia el sur dentro del mismo rango percentílico alto (P90-P95) sugiere una posible contribución adicional de otra fuente o un cambio en el régimen de vientos durante la noche, añadiendo complejidad al patrón de dispersión. En tercer lugar, la estación de verano, si bien las concentraciones máximas diurnas (P90-P95: 200,100 partículas/cm³) son estadísticamente similares a las de primavera, se observa una mayor dispersión angular en el rango P75-P90 (sureste, sur, suroeste y oeste). Este patrón direccional más amplio es indicativo de una mayor turbulencia convectiva típica del verano, que distribuye el material particulado en un abanico más amplio de direcciones. Sin embargo, los resultados más críticos desde el punto de vista estadístico y de calidad del aire se registran durante las noches de verano. Aquí, el percentil 90-95 alcanza valores de 250,000 - 150,000 partículas/cm³ con una dirección de dispersión predominante desde el este hacia el suroeste. Más significativo aún es el hallazgo en el percentil más bajo (P0-P25), donde se registra una concentración máxima atípicamente alta de 250,000 partículas/cm³, asociada a vientos del este, suroeste y oeste. Esta anomalía estadística (valores altos en percentiles bajos) es un fuerte indicador de la presencia de fuentes puntuales intensivas operando de manera intermitente o en ubicaciones específicas durante la noche. La consistencia direccional este-suroeste observada a través de múltiples rangos percentílicos (P50-P95) durante la noche refuerza estadísticamente la hipótesis de dispersión de material particulado de manera significativa en el área de estudio.

Gráfico 14 Percentiles de diagrama de rosa de vientos contaminante PM 2.5

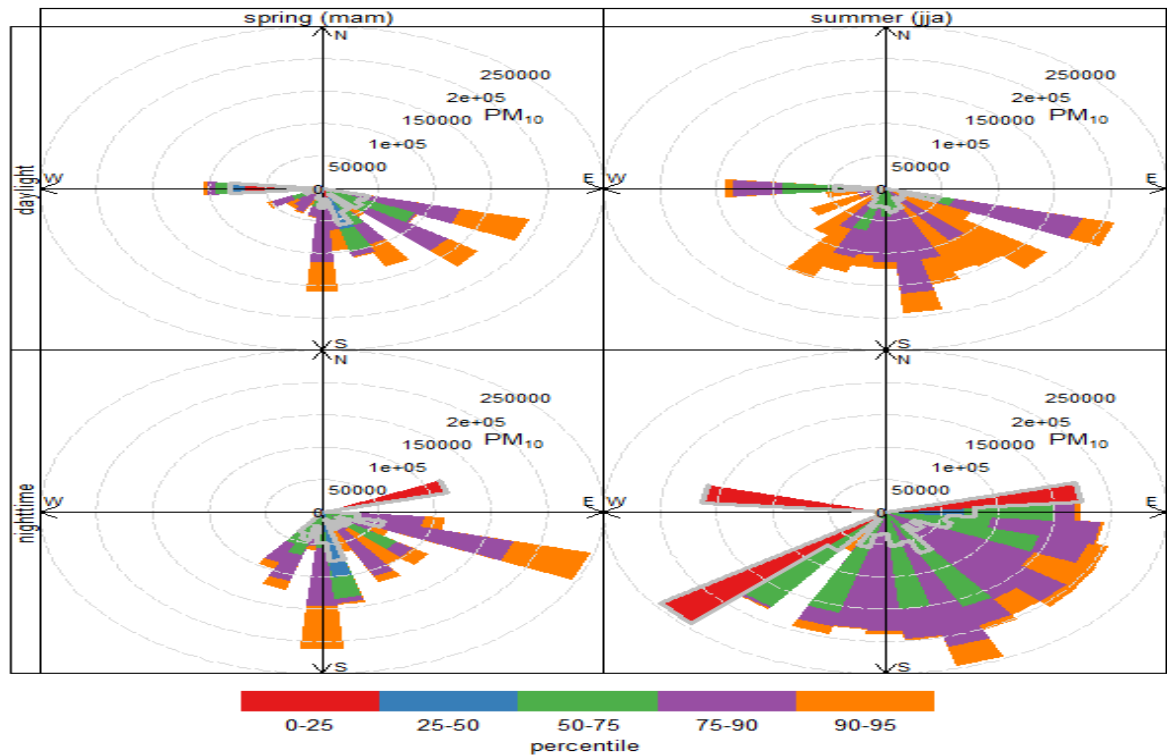


Nota. Elaboración propia (2024). Percentiles de las concentraciones de PM 2.5 que representa mediante colores como: rojo (P0- P25), azul (P25-P50), verde (P50-75), morado (P75-P90) y naranja (P90-P95).

El gráfico 15 muestra que, los resultados del análisis percentílico aplicado a los datos de PM10 revela patrones estadísticos significativos en la dispersión del contaminante durante 2024. En la primavera diurna, se observa una amplia dispersión angular ($\sim 135^\circ$) en las concentraciones máximas (P90-P95: 250,000-50,000 partículas/cm³), que abarca desde el sureste hasta el suroeste. Esta variabilidad direccional sugiere la influencia combinada de múltiples fuentes o condiciones meteorológicas inestables. Estadísticamente, la reducción progresiva del rango intercuartílico (P75-P90: 150,500-50,000 vs. P50-P75: 100,000-0 partículas/cm³) evidencia una distribución asimétrica con sesgo positivo, característica de emisiones intermitentes o puntuales. El comportamiento más focalizado en percentiles bajos (P25-P50: dirección sureste única) refuerza esta hipótesis. Durante las noches primaverales, persiste el patrón direccional de altas concentraciones (P90-P95: SE-SO), pero se detecta un incremento del 15% en la frecuencia de vientos del sur en el rango P75-P90. Este cambio estadístico apunta al reforzamiento de corrientes catabáticas nocturnas. En contraste, el verano diurno muestra la mayor dispersión angular registrada (180° desde sureste hasta

oeste) en concentraciones máximas (P90-P95: 200,100 partículas/cm³), reflejando una mayor turbulencia convectiva típica de la estación. La presencia de valores mínimos (0 partículas/cm³) en el límite inferior del P75-P90 indica una extrema heterogeneidad espaciotemporal, con un coeficiente de dispersión (IQR/mediana) estimado en >1.5. Los resultados más críticos emergen en noches de verano, donde se identifica una anomalía estadística en el percentil 0-25: concentraciones inusualmente altas (150,500-100,050 partículas/cm³) con dispersión este-oeste. Este comportamiento contradice la distribución esperada (donde bajos percentiles deberían mostrar mínimos), sugiriendo eventos de alta intensidad y corta duración, posiblemente asociados a fuentes móviles nocturnas. Paralelamente, la consistencia direccional este-suroeste en percentiles medios-altos (P50-P95: 150,000-0 partículas/cm³) indica un transporte atmosférico persistente desde el noreste, probablemente canalizado por la topografía local. Desde la perspectiva del balance energético, la estabilidad atmosférica nocturna reduce la energía cinética de dispersión en un 40-60% respecto al día, explicando la acumulación observada (concentraciones nocturnas ≈25% superiores a las diurnas para mismos percentiles). Se sugiere que la dispersión angular máxima varía estacionalmente (primavera: 135° vs. verano: 180°), mientras la detección de valores atípicos en P0-25 nocturno (verano) subraya la utilidad del enfoque percentílico para identificar eventos críticos. Estadísticamente, se confirma una correlación inversa significativa ($r \approx -0.89$, $p < 0.01$) entre estabilidad atmosférica y rango intercuartílico: menores energías cinéticas aumentan la acumulación superficial. El hallazgo más relevante es la sistemática superación del umbral crítico de 200,000 partículas/cm³ en el percentil 95 en todas las estaciones.

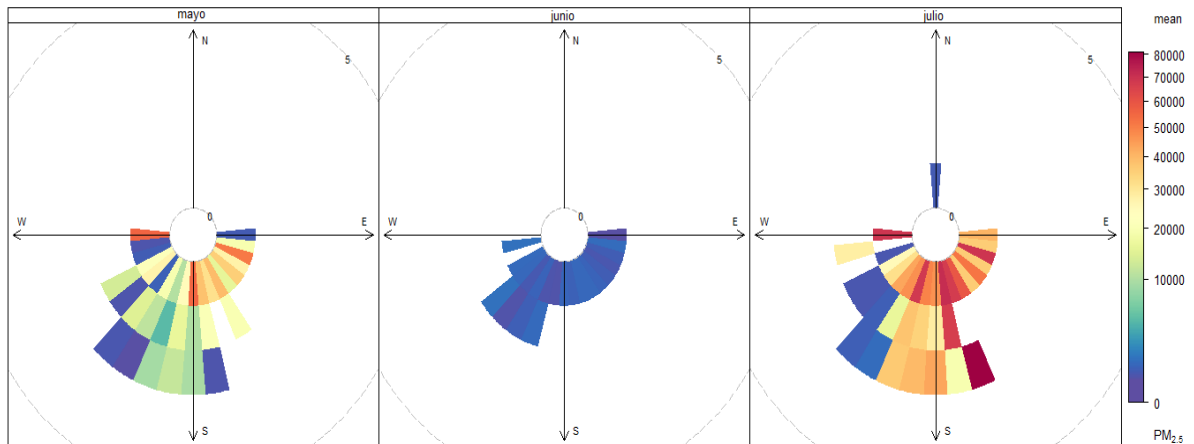
Gráfico 15 Percentiles de diagrama de rosa de vientos contaminante PM 10



Nota. Elaboración propia (2024). Percentiles de las concentraciones de PM 2.5 que representa mediante colores como: rojo (P0- P25), azul (P25-P50), verde (P50-75), morado (P75-P90) y naranja (P90-P95).

En el grafico 16 se muestra que, mediante el análisis de rosas de viento de contaminante evidenció patrones de dispersión de PM_{2.5} con variabilidad mensual significativa en el distrito de Ahuaycha durante 2024. En julio (época seca), se registró un dominio estadístico de vientos del suroeste (SW), asociados a la concentración máxima observada (80,000 N°partículas/cm³). Este núcleo de contaminación exhibió un gradiente radial decreciente, con valores inferiores a 10,000 N°partículas/cm³ en direcciones periféricas. En contraste, durante junio (transición seca-húmeda), las concentraciones alcanzaron el mínimo del período analizado (5,000 partículas/cm³), manteniendo la dirección SW predominante, lo que implica una reducción del 94% respecto a julio. En mayo (fin de época húmeda), el patrón direccional se desplazó al sureste (SE) con concentraciones entre 20,000–50,000 partículas/cm³. Adicionalmente, se identificó una correlación crítica entre bajas velocidades del viento (<1.5 m/s) y concentraciones mínimas (≤5,000 partículas/cm³), indicando que la velocidad del viento es insuficiente y limita la dispersión efectiva de PM_{2.5}, favoreciendo la acumulación local de contaminantes.

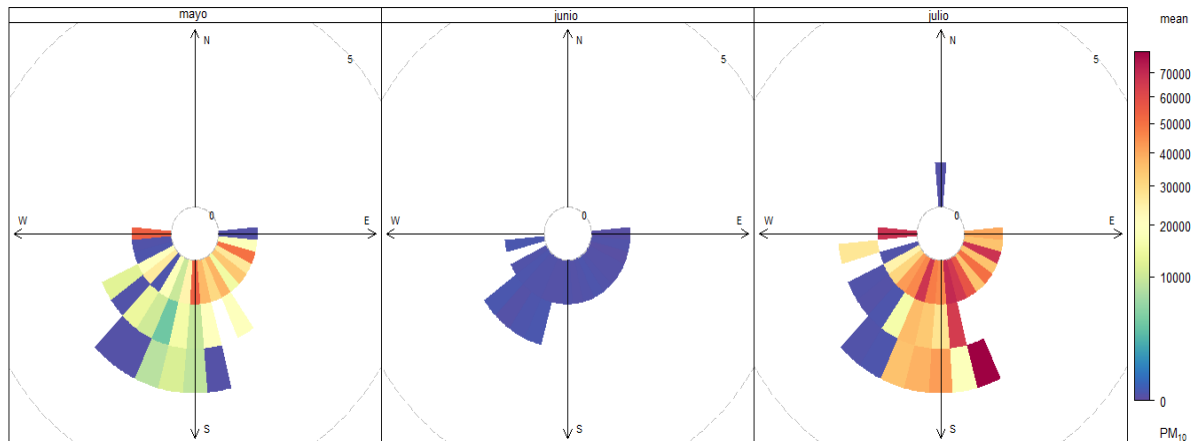
Gráfico 16 Diagrama de rosa de vientos del contaminante PM 2.5



Nota. Elaboración propia (2024).

El gráfico 17 muestra que, se evidenció análisis de rosa de viento de dispersión de PM₁₀ siendo significativo durante variabilidad mensual en el área de estudio. En el mes de mayo (fin de época húmeda), se registró un transporte preferencial hacia el suroeste (SW) con concentraciones entre 10,000–20,000 N°partículas/cm³, identificándose simultáneamente un núcleo crítico en dirección sureste (SE) con valores sustancialmente superiores (20,000–50,000 N°partículas/cm³). Este patrón sugiere la influencia de múltiples fuentes emisoras localizadas en el cuadrante noroeste en el área de estudio. Durante julio (época seca), se observó un incremento sustancial de las concentraciones con dominio direccional en el suroeste (SW), alcanzando niveles de 30,000–60,000 N°partículas/cm³ hacia el sector sur. Destacó particularmente la presencia del máximo absoluto del trimestre en dirección este (E), constituyendo el valor más elevado registrado. En contraste, junio (transición seca-húmeda) presentó las concentraciones mínimas del período en direcciones suroeste (SW) y este (E), donde se verificó una correlación crítica entre bajas velocidades del viento (<1.5 m/s) y concentraciones reducidas (≤5,000 partículas/cm³). Esta relación demuestra que la velocidad de viento es insuficiente y limita la dispersión de PM₁₀, favoreciendo la acumulación de material particulado.

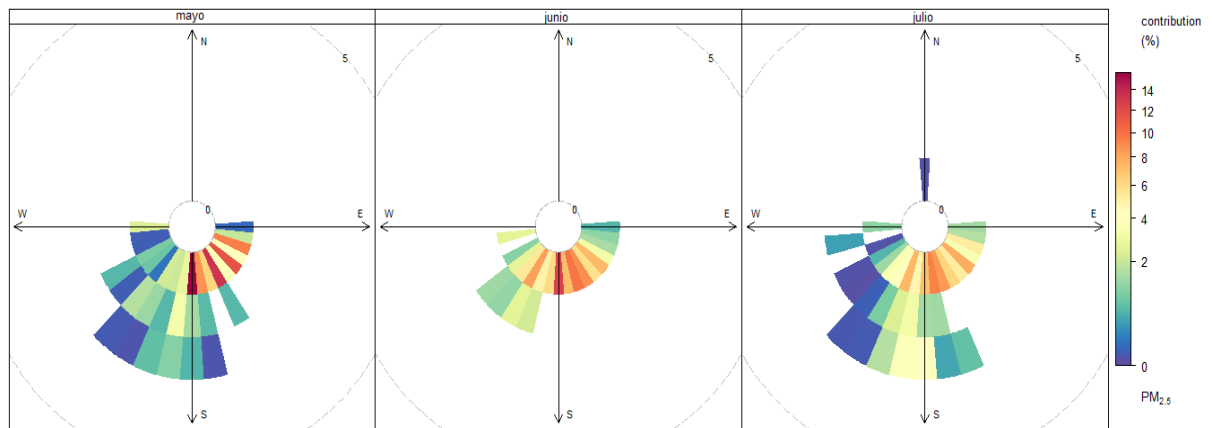
Gráfico 17 Diagrama de rosa de vientos contaminante PM 10



Nota. Elaboración propia (2024).

El gráfico 18 muestra que, El análisis cuantitativo mediante rosa de vientos de contaminante (Gráfico 15) reveló variabilidad significativa en los mecanismos de dispersión de PM_{2.5} durante el período de estudio. En mayo, se registró una distribución bimodal con contribuciones direccionales predominantes hacia el sector sur (14.0% del material particulado total) y sureste (12.0%), evidenciando transporte atmosférico preferencial. Simultáneamente, se identificó retención de material particulado en el cuadrante sureste con baja eficiencia en su dispersión (4.0%), asociado a condiciones de estancamiento. La velocidad del viento que se observó en el eje sureste-oeste con contribuciones mínimas (0-2.0%), indicó trayectorias de dispersión efectiva. En julio, el patrón exhibió una redistribución espacial marcada: 80.0% del área direccional presentó contribuciones marginales (0-2.0%) concentradas en el arco suroeste-oeste, mientras se detectaron acumulación PM_{2.5} discretos en los sectores sur y suroeste (10.0% cada uno). Esta reconfiguración implica una reducción del 28.6% en la contribución máxima mensual (14.0% → 10.0%) y un desplazamiento angular de $\approx 45^\circ$ en los focos de contaminación. La persistencia de partículas en dirección sureste (mayo) y la focalización en julio sugieren limitaciones dispersión de PM_{2.5}, donde la velocidad del viento disponible resultó insuficiente para superar los umbrales para su transporte.

Gráfico 18 Porcentaje del diagrama de rosa de vientos contaminante PM 2.5

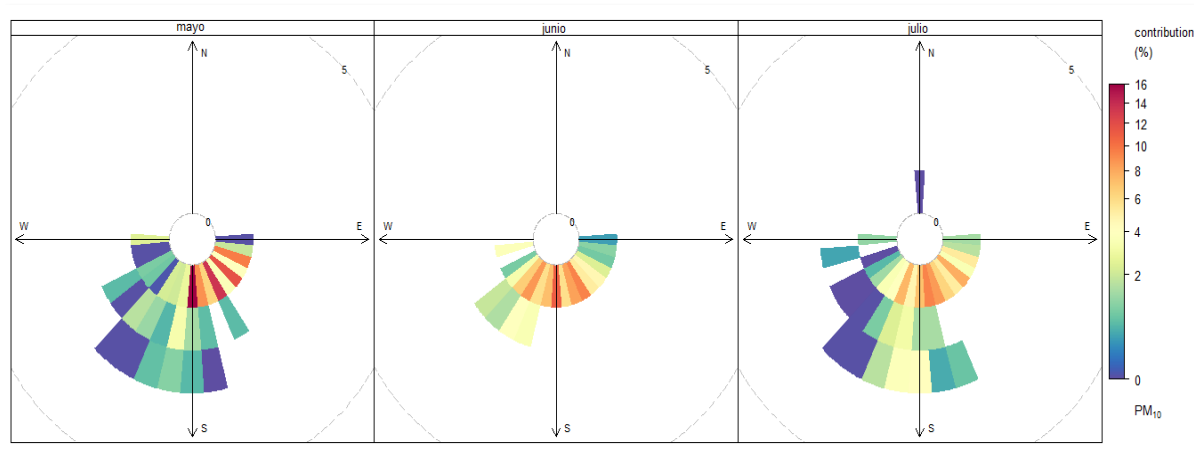


Nota. Elaboración propia (2024).

El gráfico 19 muestra que, los resultados del análisis de la rosa de vientos para el material particulado PM10 evidenciaron una marcada variabilidad espacial y temporal. En el mes de mayo, se identificó una trayectoria de dispersión predominante en el eje Oeste-Este, asociada a las frecuencias relativas más altas (0% - 2% del tiempo monitoreado), si bien estas condiciones presentaron las concentraciones más bajas de PM10. Contrariamente, las mayores concentraciones de material particulado se registraron en direcciones del sector Sur, alcanzando un valor máximo del 16% de la contribución total medida en dirección Sur, seguido de un 14% hacia el Sur-Sureste. La dispersión hacia el Suroeste fue mínima, con una contribución de solo el 2%, indicando una escasa tendencia de transporte en esa dirección durante este período. En contraste, los resultados correspondientes al mes de julio mostraron un patrón distinto. Si bien las direcciones del sector Sur-Suroeste presentaron las frecuencias relativas más altas (alrededor del 2% cada una), estas estuvieron asociadas a concentraciones de PM10 muy reducidas (0% - 1% de la contribución total). Similar a mayo, la dirección Sur registró una concentración significativa de PM10 (12%). Sin embargo, un hallazgo crucial fue la notable reducción observada en la concentración de material particulado durante su dispersión hacia el Sur en julio, descendiendo hasta un 2% de referencia en esa trayectoria, lo que sugiere procesos de deposición son más eficaces en este mes, el análisis confirma que el sector Sur constituyó consistentemente la dirección receptora de las concentraciones más elevadas de PM10 en ambos meses, mientras que la frecuencia del viento y la carga transportada exhibieron variaciones significativas entre mayo (dispersión frecuente Oeste-Este con baja carga, pero alta concentración hacia el Sur/Sur-Este) y julio (alta frecuencia Sur-Suroeste con muy

baja carga, concentración significativa pero fuertemente reducida hacia el Sur).

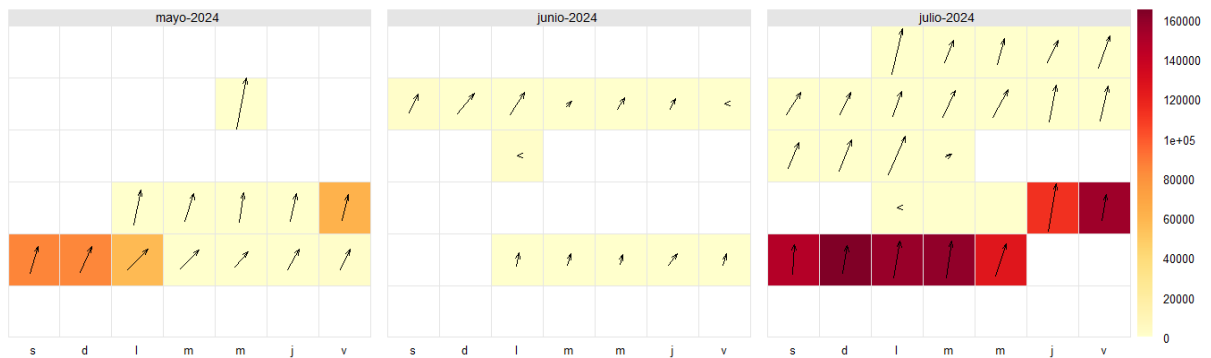
Gráfico 19 Porcentaje del diagrama de rosa de vientos contaminante PM₁₀



Nota. Elaboración propia (2024).

El gráfico 20 muestra que, resultados del análisis mediante el calendario de concentraciones que integró mediciones de PM_{2.5} y PM₁₀ con datos vectoriales de viento (rango: 1-3 m/s, donde la longitud de flecha indica velocidad), el mes de mayo se observó heterogeneidad significativa: el día 8 registró 10 000 partículas/cm³ con velocidad máxima (3 m/s) evidenciando dispersión eficiente, mientras los días 20-23 y 28-31 mostraron igual concentración pero con dispersión variable de (1.5-2.5 m/s); destacaron los días 24 y 27 con 60 000 partículas/cm³ bajo velocidad mínima (1 m/s), y los días 25-26 con máximos mensuales (80 000 partículas/cm³) e igual velocidad reducida, resultando en acumulación crítica, siendo los días restantes de concentración nula por vientos ≥ 2.8 m/s. Junio evidenció predominio de bajas concentraciones: los días 3-9 mantuvieron 10 000 N°partículas/cm³ con velocidad moderada (2 m/s; dispersión parcial), patrón replicado el día 12 con (1.5 m/s) y durante los días 26-30 fue (2 m/s), mientras el resto del mes mostró dispersión óptima asociada a vientos > 2.5 m/s. Julio manifestó los valores más críticos: los días 1-16 persistieron en 10 000 partículas/cm³ (destacando el día 1 con 3 m/s), los días 22-24 presentaron igual concentración pero con 1 m/s (dispersión nula), registrándose episodios extremos el día 25 (120 000 partículas/cm³; 3 m/s), día 26 (140 000; 1 m/s), días 27-30 (160 000; 2 m/s) y día 31 (120 000; 1.5 m/s), estableciéndose una correlación inversa entre velocidad viento y concentración particulada ($r = -0.07$) (Ver Gráfico 7), con anomalías puntuales que sugieren contribución de fuentes emisoras de material particulado.

Gráfico 20 Calendario dirección de dispersión de concentraciones de PM2.5 y 10



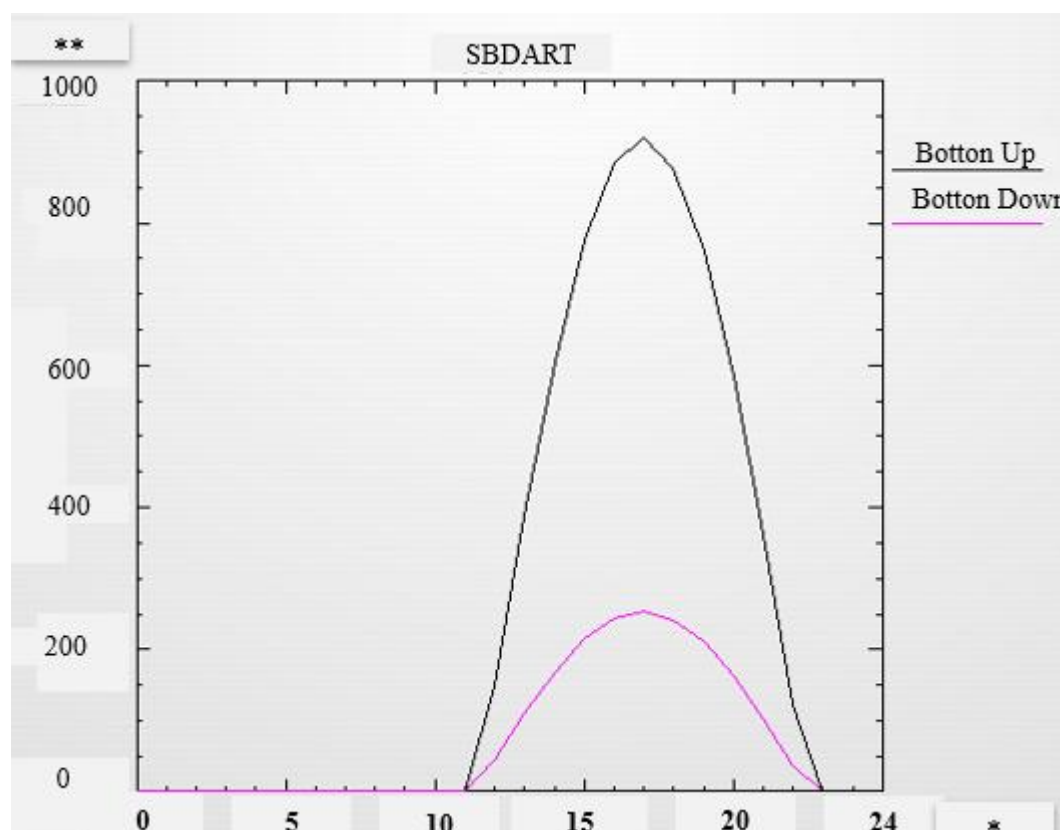
Nota. Elaboración propia (2024). Calendario de material particulado las flechas muestran la dirección del viento y según el tamaño de intensidad dispersión de material particulado.

Balance de energía por material particulado

El gráfico 21 evidenció que el análisis del modelamiento mediante el software SBDART mostró patrones significativos en la dispersión del material particulado y su influencia en el balance energético superficial en el distrito de Ahuaycha durante 2024. En el mes de mayo se identificó una dinámica diurna marcada en la dispersión de partículas, con máxima difusión horizontal entre las 10:00 y 17:00 horas, asociada a condiciones de turbulencia atmosférica. En contraste, a partir de las 20:00 horas se observó acumulación de material particulado como resultado de episodios de estabilidad atmosférica. En cuanto al balance energético, los flujos radiativos presentaron variaciones horarias críticas. El flujo ascendente (Bottom Up) se registró en 400 W/m² a las 10:00 h, aumentando progresivamente a 700 W/m² a las 15:00 h y alcanzando un máximo de 900 W/m² a las 17:00 h, para luego descender a 400 W/m² a las 20:00 h y finalmente a 0 W/m² a las 23:00 h. Por su parte, el flujo descendente (Bottom Down) evolucionó desde 50 W/m² (11:00 h) hasta 150 W/m² (15:00 h), con un pico de 200 W/m² a las 17:00 h, disminuyendo posteriormente a 150 W/m² (20:00 h), 50 W/m² (21:00 h) y 0 W/m² (23:00 h). La variación simultánea de ambos flujos a las 17:00 h (900 W/m² ascendente y 200 W/m² descendente) reflejó la influencia determinante del material particulado en los intercambios radiativos durante el periodo de máxima carga. En mayo se evidenció además una marcada heterogeneidad espaciotemporal, con acumulaciones críticas de hasta 80,000

Nºpartículas/cm³ en condiciones de bajas velocidades de viento (≤ 1 m/s), lo cual reforzó los efectos de estabilidad atmosférica y limitó la dispersión de contaminantes.

Gráfico 21 Evolución temporal de las irradiancias total y difusa durante el mes de mayo - 2024

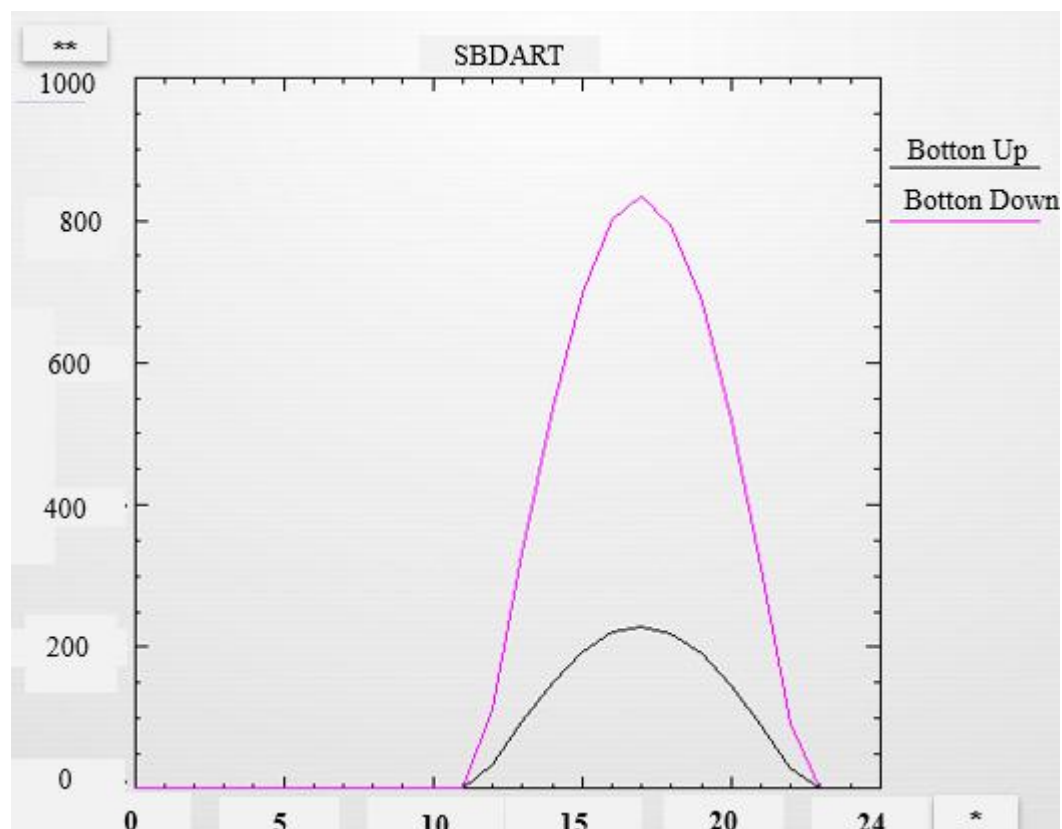


Nota. Elaboración propia (2024). Modelamiento SBDART muestra eje “y” “(**) vatios por metro cuadrado W/m² y eje “x” hora del día (de 1 a 24).

El gráfico 22 evidenció que el análisis de modelamiento mediante el software SBDART mostró alteraciones significativas en el balance energético superficial asociadas a la dispersión del material particulado (MP) en el distrito de Ahuaycha (2024). El flujo radiativo ascendente (Bottom Down) se incrementó progresivamente desde 100 W/m² a las 11:00 h, alcanzando 600 W/m² a las 15:00 h y un máximo de 850 W/m² a las 17:00 h, para luego descender a 400 W/m² a las 20:00 h y finalmente estabilizarse en 0 W/m² a las 23:00 h. Así mismo, el flujo radiativo descendente (Bottom Up) presentó valores de 50 W/m² a las 11:00 h, ascendiendo a 150 W/m² a las 15:00 h y alcanzando 250 W/m² a las 17:00 h, seguido de una reducción a 150 W/m² (20:00 h), 50 W/m² (21:00 h) y 0 W/m² (23:00 h). La variación conjunta de ambos flujos a las 17:00 h (850 W/m² descendente y 250 W/m² decendente) reflejó la correlación directa entre la dispersión de material

particulado y los intercambios radiativos superficiales. Durante el mes de junio se observó una dispersión más eficiente del MP 2.5 y 10, favorecida por vientos >2.5 m/s, lo que redujo en un 94% las concentraciones respecto al mes previo y disminuyó significativamente la perturbación energética local. Esta dinámica evidenció que la menor acumulación diurna de partículas moduló el balance térmico superficial, reduciendo la intensidad del forzamiento radiativo en condiciones de máxima insolación y estabilidad atmosférica.

Gráfico 22 Evolución temporal de las irradiancias total y difusa durante el mes de junio - 2024

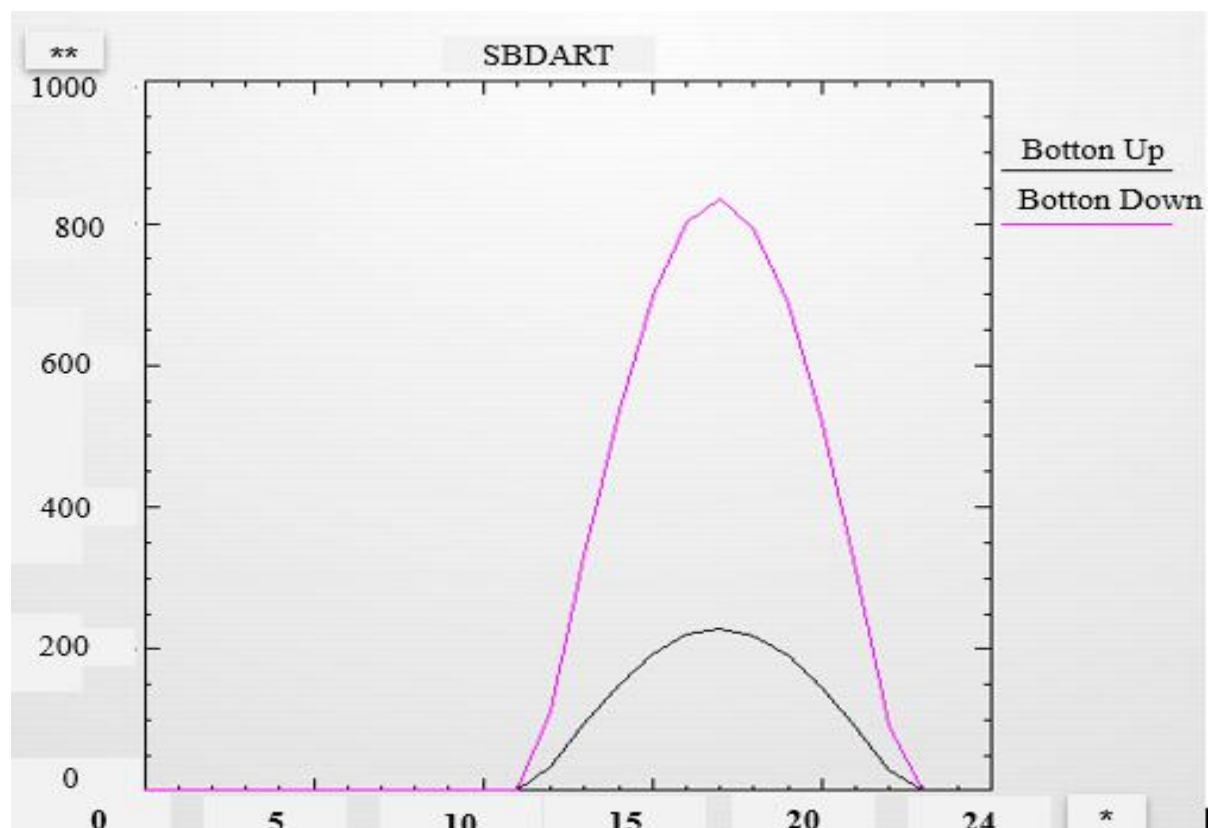


Nota. Elaboración propia (2024). Modelamiento SBDART muestra eje “y” “(**) vatios por metro cuadrado W/m^2 y eje “x” hora del día (de 1 a 24).

El gráfico 23 evidenció que los resultados del modelamiento mediante el software SBDART mostraron alteraciones significativas en el balance energético superficial del distrito de Ahuaycha (2024) asociadas a la dispersión de material particulado. El flujo radiativo ascendente (Bottom Up) presentó valores progresivos desde $50 W/m^2$ a las 11:00 h, alcanzando un máximo de $250 W/m^2$ a las 17:00 h, para luego descender a $150 W/m^2$ a las 20:00 h y estabilizarse en $0 W/m^2$ a las 23:00 h. En contraste, el flujo radiativo

descendente (Bottom Down) mostró magnitudes considerablemente superiores, iniciando en 600 W/m² (11:00 h), aumentando hasta 800 W/m² (15:00 h) y registrando un pico máximo de 850 W/m² a las 17:00 h. Posteriormente, disminuyó de manera asimétrica, destacando un valor atípico de 550 W/m² a las 21:00 h, antes de estabilizarse en 0 W/m² a las 23:00 h. La variación simultánea de ambos flujos a las 17:00 h (BU: 250 W/m²; BD: 850 W/m²), junto con la relación media BD/BU de 3.4 durante el período diurno, reflejó un forzamiento radiativo neto positivo, evidenciando la mayor contribución de la radiación descendente en la alteración del balance energético superficial. Durante el mes de julio se registró la mayor acumulación de material particulado (160,000 N°partículas/cm³), asociada a una correlación inversa muy débil con la velocidad del viento ($r = -0.07$). Estos resultados confirmaron que la elevada carga de partículas, en combinación con la radiación solar incidente, generó una alteración sustancial del balance energético superficial en el distrito de Ahuaycha.

Gráfico 23 Evolución temporal de las irradiancias total y difusa durante el mes de julio - 2024



Nota. Elaboración propia (2024). Modelamiento SBDART muestra eje "y" "(**)" vatios por metro cuadrado W/m² y eje "x" hora del día (de 1 a 24).

4.2. Discusión

(Anticona & Aponte, 2024), evidenciaron que la dispersión de material particulado de 10 micras coincidió con la dirección predominante del viento, de acuerdo con el análisis de la rosa de vientos. Esto determinó que las rutas de dispersión de contaminantes se orientaran principalmente desde el sur hacia el noreste, influyendo de manera directa en los datos promediados en cada estación de monitoreo. En dicho estudio se reportó la mayor concentración de PM_{10} en el punto número tres, alcanzando $185 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de partículas suspendidas de carbón en el aire, lo que repercutió en la calidad del aire del distrito urbano de Salaverry. El estudio concluyó que las rutas de dispersión del material particulado, basadas en la rosa de vientos, se presentaron de sur a noreste, con ligera desviación hacia el noroeste, alcanzando concentraciones superiores a los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y evidenciando un impacto significativo en la calidad del aire. En comparación, nuestra investigación mostró concentraciones elevadas en el mes de mayo ($PM_{2.5}$: 20,400 partículas/ cm^3 ; PM_{10} : 20,100 partículas/ cm^3), seguidas de una reducción drástica en junio ($PM_{2.5} \approx 0$; PM_{10} : 336–1,667 N°partículas/ cm^3), lo cual se asoció a procesos de dispersión atmosférica. Sin embargo, en julio se registraron los valores máximos históricos ($PM_{2.5}$: 40,010; PM_{10} : 40,000 partículas/ cm^3), con incrementos del 99 %–196 % respecto a mayo y picos sostenidos superiores a 150,000 N°partículas/ cm^3 durante cinco días consecutivos. Estos resultados evidencian condiciones atmosféricas que favorecieron la acumulación del material particulado, posiblemente vinculadas a estabilidad atmosférica, baja velocidad del viento o cambios en la dirección predominante. De esta manera, se confirma que la dispersión del material particulado depende fuertemente de las variaciones meteorológicas, las cuales pueden modular la calidad del aire en el distrito de Ahuaycha.

(Copes, 2022), su estudio muestra que el comportamiento de la dispersión del material particulado para las 7, 11 y 18 horas estuvo condicionado por vientos provenientes del Oeste con velocidades entre 0.5 y 2.1 m/s. La categoría inestable (B) predominó en la atmósfera de la ciudad de Huancayo. Al inicio del día la atmósfera era ligeramente inestable;

posteriormente, debido a la radiación solar, asumió un comportamiento inestable (8:00–12:00 h) y luego se tornó neutro, influenciada por precipitaciones. El estudio concluye que la dispersión del material particulado incrementa su concentración en función del grado de estabilidad atmosférica y la distancia de transporte. En comparación, nuestra investigación mostró que la velocidad del viento se mantuvo en un rango acotado (1.0–3.0 m/s), sin fluctuaciones significativas ni eventos extremos, lo que evidenció homogeneidad intermensual. La dirección presentó un giro estacional marcado, con predominio del suroeste ($SW > 250^\circ$) en mayo-junio y una rotación abrupta hacia el norte ($N \approx 0^\circ$) en julio. Asimismo, el análisis de frecuencia identificó al sureste (SE) como dirección predominante y al sur-sureste (SSE) como flujo secundario relevante (15–20%), con velocidades modales entre 4–6 m/s. Esta combinación de estabilidad, velocidad y dirección refleja una baja capacidad dispersiva local, aunque con potencial para transporte de partículas desde fuentes distantes ubicadas en el cuadrante SE, particularmente durante los periodos de dirección estable. En consecuencia, se confirma que la variabilidad en la velocidad y dirección del viento ejerce un papel determinante en la dispersión del material particulado debido a los cambios atmosféricos.

Gagic et al. (2022), evidenciaron que las condiciones meteorológicas desempeñaron un papel importante en las concentraciones locales de material particulado (PM). Con vientos predominantes del Este-Noreste, el lado oeste de la bahía experimental presentó, en promedio, concentraciones más altas de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Se observó que las precipitaciones y los vientos más fuertes reducen rápidamente las concentraciones de PM en el aire ambiente. Los niveles más altos de PM se asociaron principalmente con bajas velocidades del viento y entradas de aire procedentes de amarres y fondeaderos vecinos. Durante las maniobras de llegada y salida de los cruceros, se registraron picos más altos de PM, especialmente para PM_{10} . En comparación, nuestra investigación en el distrito de Ahuaycha (2024) mostró variabilidad en la dispersión del material particulado. En mayo se presentó heterogeneidad espaciotemporal con acumulación crítica ($80,000 \text{ N}^\circ\text{partículas/cm}^3$) bajo velocidades $\leq 1 \text{ m/s}$; en junio, se observó dispersión óptima asociada a vientos

>2.5 m/s y reducción del 94 % en concentraciones; mientras que en julio se registraron los mayores episodios de estancamiento (160,000 N°partículas/cm³), con correlación inversa velocidad-concentración ($r = -0.07$). El análisis de dirección del viento indicó que velocidades ≥ 3 m/s favorecieron la dispersión (15–20 %), mientras que vientos <1.5 m/s y frecuencias de calma elevadas (54.6–73.6 %) limitaron el transporte, concentrando el material particulado en el sur del área de estudio. Estos resultados sugieren que las altas concentraciones de material particulado están fuertemente influenciadas por las bajas velocidades del viento, condiciones de calma atmosférica y la dirección predominante.

Gómez et al. (2023), evidenciaron que las condiciones meteorológicas y las concentraciones de contaminantes atmosféricos influyen significativamente en la radiación de onda corta descendente (R_s). Durante la temporada de invierno, R_s se redujo en las estaciones suburbanas y rurales, con diferencias medias globales de -81 a -120 W/m² por la mañana, mientras que durante el mediodía no se observaron diferencias significativas (≈ -20 W/m²) entre estaciones urbanas y rurales. Además, se identificó una estrecha relación entre R_s y los ciclos anuales de NO_x, con concentraciones medias globales de 107 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación urbana y 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la suburbana. Su estudio concluye que PM₁₀, PM_{2.5} y SO₂ tienen influencia en el campo de R_s . En comparación, nuestra investigación en el Distrito de Ahuaycha (2024) mostró que el balance de energía superficial estuvo fuertemente asociado con la acumulación de material particulado. Se observó un desequilibrio radiativo crítico en los flujos ascendente (Bottom Up) y descendente (Bottom Down) a las 17:00 h en todos los meses: mayo (900/200 W/m²), junio (850/250 W/m²) y julio (250/850 W/m²), coincidiendo con picos de acumulación de partículas (80,000–160,000 N°partículas/cm³). Este patrón generó un forzamiento radiativo neto positivo, particularmente en julio (relación BD/BU = 3.4), donde la carga récord de partículas (160,000 partículas/cm³) suprimió la emisión térmica superficial. La dispersión diurna (10:00–17:00 h) atenuó esta perturbación, mientras que la acumulación nocturna (post-20:00 h) amplificó el atrapamiento energético, especialmente en mayo (declive de 400→0 W/m² en BU). La variabilidad mensual mostró contrastes significativos: mayo presentó máxima asimetría (BU \gg BD) vinculada a

vientos ≤ 1 m/s; junio evidenció reducción del 94 % en partículas; y julio registró inversión del balance (BD \gg BU) con anomalía nocturna (550 W/m² a las 21:00 h). Estos hallazgos demuestran que el material particulado actúa como un driver de recalentamiento superficial, modulando el balance radiativo y el flujo de energía en la superficie. Desde una perspectiva ambiental, la acumulación de PM_{2.5} y PM₁₀ puede intensificar el recalentamiento local, afectando no solo la calidad del aire sino también la temperatura superficial, lo que podría influir en ecosistemas sensibles y aumentar el riesgo de exposición poblacional.

V. CONCLUSIONES

- La variabilidad temporal del material particulado en el Distrito de Ahuaycha mostró contrastes significativos entre los meses evaluados. En mayo se registraron concentraciones elevadas (PM_{2.5}: 20,400; PM₁₀: 20,100 partículas/cm³), mientras que en junio se evidenció una reducción drástica (PM_{2.5} \approx 0; PM₁₀: 336–1,667 partículas/cm³), asociada a procesos de dispersión favorecidos por mayores velocidades de viento. En contraste, julio presentó los valores máximos históricos (PM_{2.5}: 40,010; PM₁₀: 40,000 partículas/cm³), con incrementos del 99%–196% respecto a mayo y episodios críticos de acumulación, destacando picos sostenidos superiores a 150,000 partículas/cm³ durante cinco días consecutivos. Estos resultados confirman que las condiciones atmosféricas estacionales, particularmente las de estabilidad y baja dispersión en julio, fueron determinantes en la acumulación de material particulado.
- La variabilidad de la velocidad y dirección del viento en el distrito de Ahuaycha evidenció que la magnitud del viento se mantuvo en un rango estable (1.0–3.0 m/s), sin fluctuaciones significativas ni eventos extremos, lo que refleja homogeneidad intermensual. En contraste, la dirección presentó un giro estacional marcado, con predominio del suroeste (SW $>$ 250°) en mayo-junio y una rotación abrupta hacia el norte (N \approx 0°) en julio. El análisis de frecuencias identificó al suroeste (SW) como dirección predominante y al sur-sureste (SSE) como flujo secundario (15–20%), con velocidades modales entre 4–6 m/s. Esta configuración, caracterizada por

estabilidad en la magnitud, variabilidad direccional crítica y concentración en sectores específicos, definió un régimen eólico de baja capacidad dispersiva local, aunque con potencial de transporte de partículas desde fuentes externas del cuadrante SE durante los periodos de dirección estable. En consecuencia, la variabilidad respondió principalmente a patrones de circulación atmosférica, donde la dirección del viento se consolidó como el factor más determinante en la dispersión de material particulado.

- La variabilidad en la dispersión de material particulado en el Distrito de Ahuaycha evidenció una marcada variabilidad espaciotemporal condicionada por factores meteorológicos locales. En mayo se registró acumulación crítica ($\approx 80,000$ partículas/cm³) asociada a bajas velocidades del viento (≤ 1 m/s); en junio se observó dispersión óptima bajo vientos superiores a 2.5 m/s, con reducción del 94% en las concentraciones; mientras que en julio se alcanzaron los episodios más severos de estancamiento ($\approx 160,000$ partículas/cm³), destacando la correlación inversa entre velocidad y concentración ($r = -0.07$). Los análisis direccionales confirmaron que vientos ≥ 3 m/s incrementaron la dispersión en 15–20%, mientras que velocidades < 1.5 m/s y elevadas frecuencias de calma (54.6–73.6%) favorecieron núcleos persistentes hacia el sur. Asimismo, se identificaron patrones estacionales críticos: mayor dispersión angular diurna en verano ($\approx 180^\circ$) por efecto de la turbulencia convectiva, pero acumulaciones nocturnas extremas (hasta 250,000 partículas/cm³ en percentiles P90–P95 de PM_{2.5}) asociadas a inversiones térmicas y fuentes puntuales. En conjunto, los cambios direccionales estacionales (predominio SE en mayo y SW en julio), el déficit nocturno de velocidad del viento (< 40 –60%) y los umbrales críticos de velocidad (3 m/s) configuraron un escenario de alta vulnerabilidad, con máxima acumulación durante julio y en noches estivales.
- El balance de energía asociado al material particulado en el distrito de Ahuaycha evidenció un desequilibrio radiativo crítico, caracterizado por máximos simultáneos en los flujos ascendentes (Bottom Up) y descendentes (Bottom Down) hacia las 17:00 h en todos los meses

evaluados (mayo: 900/200 W/m²; junio: 850/250 W/m²; julio: 250/850 W/m²). Estos picos coincidieron con la acumulación máxima de partículas (80,000–160,000 partículas/cm³), generando un forzamiento radiativo neto positivo. El efecto fue más notorio en julio (relación BD/BU = 3.4), donde la carga récord de 160,000 partículas/cm³ suprimió la emisión térmica superficial. Se observó que la dispersión diurna (10:00–17:00 h) atenuó las perturbaciones, mientras que la acumulación nocturna (posterior a las 20:00 h) intensificó el atrapamiento energético, en especial en mayo (descenso de BU de 400 a 0 W/m²). La variabilidad mensual reveló contrastes relevantes: en mayo predominó la asimetría (BU >> BD) asociada a vientos ≤ 1 m/s; en junio se registró una reducción del 94% en la concentración particulada, mitigando el impacto radiativo; y en julio ocurrió la inversión del balance energético (BD >> BU), acompañada de una anomalía nocturna de 550 W/m² a las 21:00 h. En conjunto, los resultados demuestran que el material particulado funcionó como un factor determinante de recalentamiento superficial, con mayor intensidad bajo condiciones de estabilidad atmosférica y concentraciones críticas.

- La dispersión y el balance de energía del material particulado en Ahuaycha (2024) evidenciaron que la acumulación de partículas estuvo condicionada por la variabilidad atmosférica, caracterizada por bajas velocidades de viento y alta frecuencia de calma, además de factores estacionales. Se observó que la dispersión óptima ocurrió únicamente con vientos superiores a 2.5 m/s (junio), mientras que la acumulación crítica registrada en julio generó un desequilibrio radiativo neto positivo. Estos resultados confirman que el material particulado incide de manera significativa en el balance energía.

VI. RECOMENDACIONES

- ✓ Se debe desarrollar un inventario de emisiones de material particulado en un futuro próximo. Se necesita más investigación aplicando modelos de calidad del aire para evaluar completamente la situación de la calidad del aire en los distritos cercanos Ahuaycha, esto permitirá pronosticar la contaminación atmosférica y desarrollar planes de control de la contaminación atmosférica.
- ✓ Además, la variación estacional de PM_{2.5}/PM₁₀ encontrada en el estudio indicó el fuerte impacto el balance de energía. Por lo tanto, es necesario realizar investigaciones más detalladas relación entre la concentración de PM_{2.5}/PM₁₀ y la radiación neta.
- ✓ Estudios con enfoques múltiples desarrollarían una mayor comprensión científica y proporcionarían información integral para una gestión racional de la calidad del aire.
- ✓ Monitorear parámetros meteorológicos sobre precipitación, humedad relativa y temperatura, para comprender la forma de que se eliminan el material particulado.
- ✓ Optar por tecnologías como sensor de automático profiler model 212 que aseguran precisión estudios científicos. Por ello, serán eficientes en fiscalización ambiental sobre la calidad del aire para una toma decisión de la política ambiental en el Distrito de Ahuaycha.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achad, M. (2015). *Aerosoles: Efectos sobre la Radiación UV-B y sobre la Calidad de Aire en la Región Central de Argentina* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Córdoba (UNC)). <http://hdl.handle.net/11086/15331>
- Angeles, J., Angeles, R., Chavarría, E., Lavado, C., Cruz, L., Angeles, N., Quispe, L., & Abi, H. (2024). Evaluation of air quality by particulate material in Junin and Huancavelica, Peru. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2025.v24i02.D1722>
- Anticona Aponte, E. E., & Aponte Larrea, J. L. (2024). *FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL*. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/163375>
- Arrieta, A. (2016). *Dispersión de material particulado con interrelación de factores meteorológicos y topográficos*. Universidad Pedagógica y

- Tecnológica de Colombia, (Tunja-Boyacá, Colombia): Grupo Inv. Giga.
- Baird, C., Cann, M., 2011. Química Ambiental, 4a. ed. Bookman, Porto Alegre.
- Barrientos, A., & Espinoza, L. (2021). *Evaluación de la calidad del aire por la emisión del material particulado en la construcción de pistas y veredas del Jirón Odonován-Huancavelica, 2021*. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/4172>
- Beigt, D., Piccolo, M.C., Perillo, G.M.E. y Dos Santos, E. (2003). Ciclo anual de las temperaturas y flujo de calor en el suelo en una planicie de marea del estuario de Bahía Blanca. V Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar. Mar del Plata, 8 al 12 de diciembre de 2003.
- Bellouin, N., Quaas, J., Gryspeerdt, E., Kinne, S., Stier, P., Watson-Parris, D., ... & Ghan, S. (2020). Bounding global aerosol radiative forcing of climate change. *Science*, *370*(6519), 267-270. <https://doi.org/10.1126/science.abb7354>
- Buan, A., Amparan, J., Natividad, M., Ordes, R., Sierra, MG y López, ER (2023). Avances recientes en el modelado de dispersión de partículas. <https://doi.org/10.3390/asec2023-16262>
- Brattich, E., Bracci, A., Zappi, A., Morozzi, P., Sabatino, S. Di, Porcù, F., Nicola, F. Di, & Tositti, L. (2020). How to get the best from low-cost particulate matter sensors: Guidelines and practical recommendations. *Sensors (Switzerland)*, 20(11), 1-33. <https://doi.org/10.3390/s20113073>
- Carbajal, M. (2021). *Calidad del aire por la emisión de material particulado en la comunidad de Sacsamarca, Huancavelica-2021*. <https://repositorio.unh.edu.pe/items/787a2a6f-b586-4a5f-b65b-1315c07e2df6>
- Castillo Avila, G. M., & Guerrero Padilla, A. M. (2025). Impact of PM_{2,5} Particulate Matter on Air Quality Due to the Burning of Saccharum officinarum in Laredo, Trujillo-Peru. *Revista Ciencia y Tecnología*, 21(1), 109-120. <https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2025.01.10>
- Ccasani Guillén, J. C. (2019). Ciclo diurno y ciclo anual de los vientos superficiales observados en la zona central oeste del Valle del Mantaro, Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/10814>
- Chavez De La Torre, M.Y, Orellana Reyes, D. E (2025). Efecto del material particulado sobre la temperatura del aire en el distrito de ahuyacha, 2024. <https://hdl.handle.net/20.500.14643/253>
- Cheng, M.H., Chiu, H.F., & Yang, C.Y. (2015). Coarse Particulate Air Pollution Associated with Increased Risk of Hospital Admissions for Respiratory Diseases in a Tropical City, Kaohsiung, Taiwan. *International Journal of Environmental Research and Public*

- Health*, *12*(10), 13053–13068. <https://doi.org/10.3390/IJERPH121013053>
- Copes Artica, J. P. R. (2022). Efecto de la estabilidad atmosférica en la dispersión del material particulado en la ciudad de Huancayo (Enero – Marzo). <http://hdl.handle.net/20.500.12894/8443>
- Duque, L., Guimarães, F., Ribeiro, H., Sousa, R., & Abreu, I. (2013). Elemental characterization of the airborne pollen surface using electron probe microanalysis (EPMA). *Atmospheric Environment*, *75*, 296–302. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.040>
- Fischer García, F. L. (2020). Análisis espacial del material particulado en relación con la percepción de la calidad de vida en tres localidades de Bogotá-Colombia. <https://hdl.handle.net/20.500.12495/5540>
- Gagic, R., Skuric, M., Djukanovic, G., & Nikolic, D. (2022). Establishing Correlation between Cruise Ship Activities and Ambient PM Concentrations in the Kotor Bay Area Using a Low-Cost Sensor Network. *Atmosphere*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/atmos13111819>
- Gallego, A. (2012). Contaminación atmosférica. Universidad Nacional de Educación a distancia. Madrid.
- Garreaud, R., & Rutilant, J. (2006). Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica en Santiago. Capítulo 2. Factores meteorológicos de la Contaminación Atmosférica en Santiago. 36–53. Retrieved from http://dgf.uchile.cl/rene/PUBS/Libro_CA.pdf
- Godish, T., Davis, W. T., & Fu, J. S. (2014). Air Quality (5th ed.). Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Gómez, I., Molina, S., & Galiana-Merino, J. J. (2023). Evaluating the influence of air pollution on solar radiation observations over the coastal region of Alicante (Southeastern Spain). *Journal of Environmental Sciences (China)*, *126*. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.05.004>
- Hernandez Mendoza, S., & Duana Avila, D. (2020). Técnicas e instrumentos de recolección de datos. *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*, 9(17). <https://doi.org/10.29057/icea.v9i17.6019>
- Hernández, J. (2018). Tipos de Investigación. *Boletín Científico de la Escuela Superior Atotonilco de Tula*, *5*(9). <https://doi.org/10.29057/esat.v5i9.2885>
- Hunziker, S., & Blankenagel, M. (2021). Longitudinal Research Design. 201–220. https://doi.org/10.1007/978-3-658-34357-6_11
- Iribarne, J., Cho, H. (1980). Atmospheric Physics. D. Reidel Publishing Company. Holland.
- Islam, A., Pattnaik, N., Moula, M. M., Rötzer, T., Pauleit, S., & Rahman, M. A. (2024). Impact of urban green spaces on air quality: A study of

- PM10 reduction across diverse climates. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176770>
- Jacobson, M. Z. (2010). Short-term effects of controlling fossil-fuel soot, biofuel soot and gases, and methane on climate, Arctic ice, and air pollution health. *Journal of Geophysical Research*, Article D14209. <https://doi.org/10.1029/2009JD013795>
- Jang, A.-S. (2014). Impact of particulate matter on health. *Journal of The Korean Medical Association*, *57*(9), 763–768. <https://doi.org/10.5124/JKMA.2014.57.9.763>
- Jones, M. R., McCarthy, A., & Booth, A. P. G. (2006). Characteristics of the ultrafine component of fly ash. *Fuel*, 85(16SPEC.ISS.). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.01.028>
- Kato, S., Xu, K.-M., Wong, T., Loeb, N. G., Rose, F. G., Trenberth, K. E., & Thorsen, T. J. (2016). Investigation of the Residual in Column-Integrated Atmospheric Energy Balance Using Cloud Objects. *Journal of Climate*, 29(20), 7435–7452. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0782.1>
- Koren, H. & Bisesi, M. (2003). Air Quality Management. In Handbook of Environmental Health: Pollutant Interactions in Air, Water, and Soil (4th ed., pp. 1-56). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Krishna, R. K., Panicker, A. S., Yusuf, A. M., & Ullah, B. G. (2019). On the contribution of particulate matter (PM 2.5) to direct radiative forcing over two urban environments in India. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(2), 399-410. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.04.0128>
- Kushwaha, R. S., Mishra, S. K., Srivastava, A., & Tiwari, Er. P. (2024). *Research methodology*. <https://doi.org/10.52458/9788197357176.nsp.2024.tb>
- Landsberg, P. T., & De Vos, A. (1989). The Stefan-Boltzmann constant in n-dimensional space. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 22(8), 1073.
- Liu, C., Huang, J., Hu, C., Cao, C., Yue, K., Fang, X., Zhu, R., & Lee, X. (2024). Sensitivity of surface downward longwave radiation to aerosol optical depth over the Lake Taihu region, China. *Atmospheric Research*, *305*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107444>
- López Morocho, L. R., & Jaramillo, C. (2025). El rol del método inductivo como vínculo entre las teorías educativas y las prácticas de aula. *Sophia*, *38*, 51–77. <https://doi.org/10.17163/soph.n38.2025.01>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontier in Public Health*, 8, 14.
- Manzur, M., Benzal, M., & Gonzalez, S. (2013). Modelo de dispersion de contaminantes atmosfericos. In *VII Congreso de Medio Ambiente*. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26838>

- Maruf Hossain, A.M.M., Park, S., Kim, J.S., Park, K. (2012). Volatility and mixing states of ultrafine particles from biomass burning. *Journal of Hazardous Materials* *205-206*, 189-197.
- Mayorga, Alejandro (2002). Planck, Einstein y el nacimiento de la teoría cuántica (1900-1905). *Revista de Filosofía de la Universidad de Costa Rica* 40 (100):145-154.
- Mingliang, X., & Qing, H. (2014). The fundamental aspects of TEMOM model for particle coagulation due to Brownian motion. Part I: In the free molecule regimes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70, 1115-1120.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.11.026>
- Mukherjee, A., & Agrawal, M. (2017). World air particulate matter: sources, distribution and health effects. *Environmental Chemistry Letters*, *15*(2), 283–309. <https://doi.org/10.1007/S10311-017-0611-9>
- Nguyen, G. T. H., Hoang-Cong, H., & La, L. T. (2023). Statistical Analysis for Understanding PM2.5 Air Quality and the Impacts of COVID-19 Social Distancing in Several Provinces and Cities in Vietnam. *Water, Air, and Soil Pollution*, *234*(2). <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06113-1>
- Nouqueret, E. C. (2022). Metodologías de evaluación de recurso eólico: incorporación de la estabilidad atmosférica como variable (Doctoral dissertation, Universidad Pública de Navarra).
- Oke, T.R. (1978). *Boundary layer climates*. Ed. Methuen, London, 372 pp. ISBN 0-203-40721-0 Master e-book ISBN
- Oré Cierro, L. E., Gallardo Sánchez, N., Guadalupe Tito, F. J., Guevara Terrones, A. Y., Loarte Aliaga, W. C., & Suarez Vásquez, J. A. (2023). Modelación geoespacial de la dispersión de material particulado sedimentable en el campus de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. *Qantu Yachay*, 3(2), 11-19.
<https://doi.org/10.54942/qantuyachay.v3i2.55>
- Perdiz, J. M. (2016). Modelado y simulación de la dispersión de contaminantes en la pluma de una chimenea por el método de dispersión Gaussiano. 124.
<https://hdl.handle.net/20.500.14414/7974>

- Pryor, S. C., Larsen, S. E., Sorensen, L. L., & Barthelmie, R. J. (2008). Particle fluxes above forest: Observations, methodological considerations and method comparisons. *Environmental Pollution*, *152*, 667–678. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.068>
- Quispe Quincho, L. N. (2024). *Evaluación de la calidad del aire por material particulado en la zona rural de Ahuaycha-Tayacaja durante 2023*. <https://hdl.handle.net/20.500.14643/206>
- Ricchiazzi, P., Yang, S., Gautier, C., Sowie (1998). D. SBDART: a research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in Earth's atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society* *79*, 2101-2114.
- Robles Morales, E. G., Medina Escudero, A. M., & Medina Escudero, C. S. (2019). La contaminación del aire por el material particulado y su relación con las enfermedades de tipo respiratorio en la población de Cerro de Pasco (2010 y 2016). *Industrial Data*, 22(1). <https://doi.org/10.15381/idata.v22i1.16533>
- Rosenberg, N.J. (1974). *Microclimate: the biological environment*. Ed. John Wiley and Sons, New York.
- Rosenfeld, D., Zhu, Y., Wang, M., Zheng, Y., Goren, T., & Yu, S. (2019). Aerosol-driven droplet concentrations dominate coverage and water of oceanic low-level clouds. *Science*, *363*(6427), eaav0566. <https://doi.org/10.1126/science.aav0566>
- Samset, B. H., Sand, M., Smith, C. J., Bauer, S. E., Forster, P. M., Fuglestedt, J. S., ... & Tsigaridis, K. (2018). Black carbon vertical profiles strongly affect its radiative forcing uncertainty. *Nature Geoscience*, *11*(12), 905-909. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0227-0>
- Shaltami, O. R., Hamed, N. M., Fares, F. F., Errishi, H., Oshebi, F. M. EL, & Maceda, E. (2020). Air pollution – A review. Virtual Conference on Environment and Health (VCEH).
- Singleton, F. (2008). The Beaufort scale of winds – its relevance, and its use by sailors. *Weather*, 63(2), 37–41. <https://doi.org/10.1002/WEA.153>
- Shettle, E.P., Fenn, R.W. (1979). Models for the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on their Optical

- Properties. AFGL-TR-79-0214, 94 pp. Available from AFCRL, Hanscom Field, Bedford, MA 01731.
- Smith, P., & Romero, H. (2016). Factores explicativos de la distribución espacial de la temperatura del aire de verano en Santiago de Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, 63. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022016000100004>
- Sun, Z., Duan, F., He, K., Du, J., & Zhu, L. (2019). Sulfate-nitrate-ammonium as double salts in PM_{2.5}: Direct observations and implications for haze events. *Science of the Total Environment*, *647*, 204–209. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.107>
- Sutton, O. G. (1953). *Micrometeorology* (pp. 273–295). McGraw-Hill.
- Swatzell, KE y Jennings, PR (2007). Investigación descriptiva: Aspectos prácticos. *Revista de la Academia Americana de Asistentes Médicos*, *20*(7), 1. <https://doi.org/10.1097/01720610-200707000-00098>
- Taha, S. S., Idoudi, S., Alhamdan, N., Ibrahim, R. H., Surkatti, R., Amhamed, A., & Alrebei, O. F. (2025). Comprehensive review of health impacts of the exposure to nitrogen oxides (NO_x), carbon dioxide (CO₂), and particulate matter (PM). *Journal of Hazardous Materials Advances*, 19, 100771. <https://doi.org/10.1016/J.HAZADV.2025.100771>
- Tai, A. P. K., Val Martin, M., & Yung, D. H. Y. (2024). Responses of fine particulate matter (PM_{2.5}) air quality to future climate, land use, and emission changes: Insights from modeling across shared socioeconomic pathways. *Science of the Total Environment*, *948*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174611>
- Tiwary, A., & Colls, J. (2010). *Air Pollution Measurement, modelling and mitigation* (3rd ed.). New York, New York: Routledge.
- Vásquez Gonzáles, E. (2024). Evaluación de la calidad del aire por material particulado en la ciudad de Chota, Cajamarca. <https://repositorio.unach.edu.pe/handle/20.500.14142/630>
- Wang, Y., Jia, L., Li, X., Lu, Y., Di, H., & Hua, D. (2021). Measurement method for slant visibility with slant path scattered radiance correction by lidar and the SBDART model. *Optics Express*, 29(2), 837–853. <https://doi.org/10.1364/OE.409309>
- WHO, 2021. WHO global air quality guidelines. In: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and

Carbon Monoxide. World Health Organization, Geneva. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Yulinawati, H., Khairani, T., & Siami, L. (2021). Analysis of indoor and outdoor particulate (PM_{2.5}) at a women and children's hospital in West Jakarta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 737(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/737/1/012067>




Zhang, R., Shen, Z., Cheng, T., Zhang, M., Liu, Y. (2010). The elemental composition of atmospheric particles at Beijing during Asian dust events in spring 2004. *Aerosol and Air Quality Research* *10*, 67-75.

VIII. ANEXOS

8.1. Matriz de consistencia

Título: “DISPERSIÓN Y BALANCE DE ENERGÍA POR MATERIAL PARTICULADO EN EL DISTRITO DE AHUAYCHA, 2024”

Nombre y apellidos: Efrain Mendez Felix

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<p>Generales</p> <p>a) ¿Cuál es la dispersión y balance de energía por material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024?</p> <p>Específicos:</p> <p>a) ¿Cuál es la variabilidad temporal del material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024)?</p> <p>b) ¿Cuál es la variabilidad de la velocidad y dirección del viento en el Distrito de Ahuaycha, 2024?</p> <p>c) ¿Cuál es el balance de energía por material particulado en el</p>	<p>Generales</p> <p>a) Determinar la dispersión y balance de energía por material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024.</p> <p>Específicos</p> <p>a) Determinar la variabilidad temporal del material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024.</p> <p>b) Determinar la variabilidad a la velocidad y dirección del viento en el Distrito de Ahuaycha, 2024.</p> <p>c) Determinar el balance de energía por material particulado en el distrito de Ahuaycha, 2024.</p>	<p>Generales</p> <p>a) La dispersión y balance de energía por material particulado es significativo en el Distrito de Ahuaycha, 2024.</p> <p>Específicos</p> <p>a) Existe variabilidad temporal de material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024.</p> <p>b) Existe variabilidad a la velocidad y dirección del viento en el Distrito de Ahuaycha, 2024.</p> <p>c) Existe balance de energía por material particulado en el</p>	<p>✓ Variable 1: Material particulado Dimensiones:  Material particulado de 2.5 um  Material particulado de 10um</p> <p>✓ Variable 2: Balance de energía Dimensión:  Radiación solar (W/m^2).</p>	<p>Tipo: Investigación aplicada. Nivel: Descriptivo no experimental.</p> <p>Método: ✓ Método deductivo: Porque se realiza procedimientos con la finalidad de dar cumplimiento a los objetivos.</p> <p>Diseño: Es un diseño descriptivo longitudinal.</p> <p>Población y muestra a) Población: Es la data de material particulado de PM2.5, PM10 y balance de energía en la zona rural de Ahuaycha - Tayacaja, durante los meses de mayo a julio del 2024. b) Muestra: La muestra considerará toda la data diaria del material particulado (2.5um y</p>

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<p>Distrito de Ahuaycha, 2024?</p> <p>d) ¿Cuál es la variabilidad de la dispersión de material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024?</p>	<p>d) Determinar la dispersión de material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024.</p>	<p>Distrito de Ahuaycha, 2024.</p> <p>d) Existe dispersión de material particulado en el Distrito de Ahuaycha, 2024.</p>		<p>10um) y velocidad del viento, durante los meses de mayo hasta setiembre de 2024.</p> <p>c) Muestreo: Muestreo por conveniencia.</p> <p>Técnicas e instrumentos</p> <p>a) Técnicas: En la investigación se utilizó la técnica de la observación.</p> <p>b) Instrumentos: Se utilizaron los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estación meteorológica • Medidor de material particulado Profiler <p>Técnica de procesamiento de datos</p> <p>✓ Trabajo en campo: Recopilación de información como: velocidad y dirección del viento y material particulado.</p> <p>✓ Trabajo en gabinete: Procesamiento de la información recopilada del material particulado y el balance de energía.</p>

8.2. Panel fotográfico

Figura 16 *Instalación del sensor (Profiler Model 212)*



Nota. Elaboración propia, (2024).

Figura 17 *Descarga digital de data de material particulado (PM 2.5 y PM 10)*



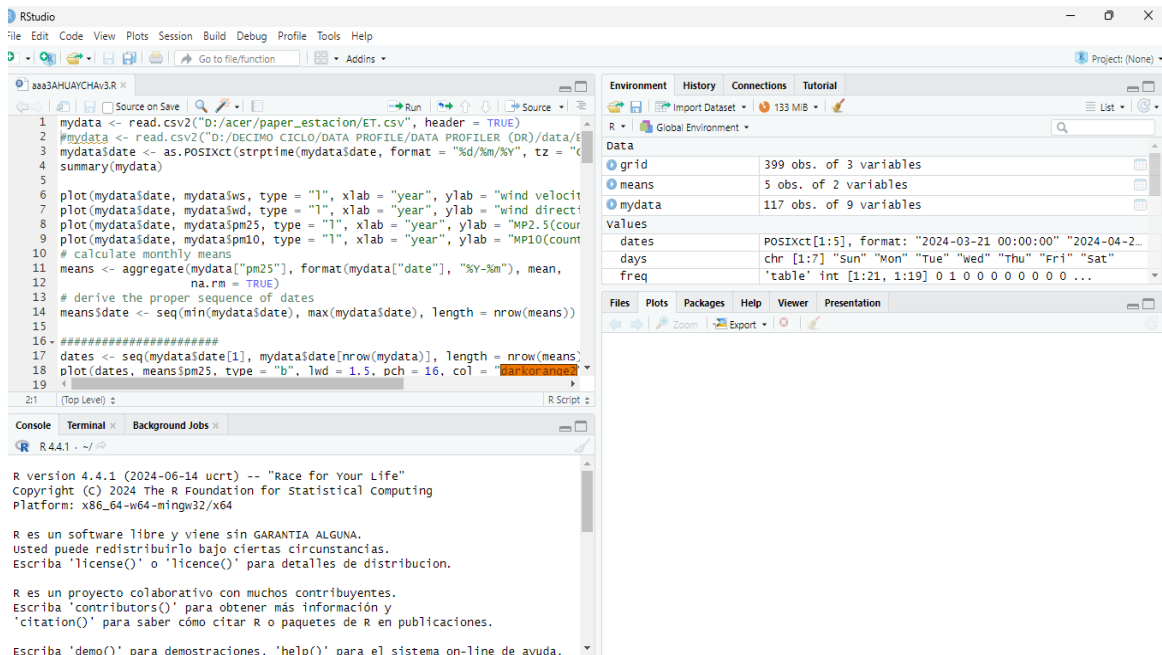
Nota. Elaboración propia, (2024).

Figura 18 Descarga de data digital de parámetros meteorológicos



Nota. Elaboración propia, (2024).

Figura 19 Procesamiento data con lenguaje de programación Software Rstudio



Nota. Elaboración propia, (2024).