

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**NIVEL DE CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (PM₁₀) EN EL
AIRE DE LA CIUDAD DE CAJAMARCA – 2024**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR EL BACHILLER
KEVIN STALIN ALVAREZ POLANCO

ASESOR
Ing. M. Cs. EDGAR DARWIN DÍAZ MORI

CAJAMARCA – PERÚ

2026

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
KEVIN STALIN ALVAREZ POLANCO
DNI N° 73036161
Escuela Profesional/Unidad UNC:
DE INGENIERÍA AMBIENTAL
2. Asesor:
ING° M. Cs. EDGAR DARWIN DÍAZ MORI
Facultad/Unidad UNC:
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
3. Grado Académico o título profesional:
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☐ Doctor
4. Tipo de investigación:
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
5. Título del trabajo de investigación:
**"NIVEL DE CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (PM₁₀) EN EL
AIRE DE LA CIUDAD DE CAJAMARCA - 2024"**
6. Fecha de evaluación: 12/02/2026
7. Software antiplagio: ☒ TURNITIN ☐ URKUND (ORIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 8 %
9. Código documento:
10. Resultado de la evaluación de Similitud:
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha de Emisión: 19/02/2026

*Firma y/o Sello
Emisor Constancia*



ING° M. Cs. EDGAR DARWIN DÍAZ MORI

DNI: 27041767

*En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"

Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Secretaría Académica

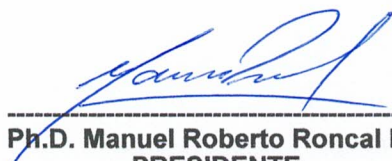


ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Celendín, a los doce días del mes de febrero del año dos mil veintiséis, se reunieron en el **aula 102** de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental - Sede Celendín, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 535-2025-FCA-UNC, de fecha 15 de setiembre del 2025**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la **TESIS** titulada: **"NIVEL DE CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (PM₁₀) EN EL AIRE DE LA CIUDAD DE CAJAMARCA - 2024"**, realizada por el Bachiller **KEVIN STALIN ALVAREZ POLANCO** para optar por el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**.

A las **QUINCE** horas con **CINCO** minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el presidente del Jurado anunció la **APROBACIÓN** por **UNANIMIDAD** con calificativo de **QUINCE (15)** por tanto, el Bachiller queda expedido para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**.

A las **DIECISÉIS** horas y **CINCO** minutos del mismo día, el presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.



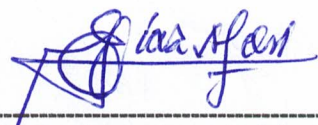
Ph.D. Manuel Roberto Roncal Rabanal
PRESIDENTE



Ing° M. Cs. Giovana Ernestina Chávez Horna
SECRETARIO



Ing. M. Cs. Adolfo Máximo López Aylas
VOCAL



Ing° M. Cs. Edgar Darwin Díaz Mori
ASESOR

COPYRIGHT © 2026 by

KEVIN STALIN ALVAREZ POLANCO

Todos los derechos reservados

DEDICATORIA

Dedico este trabajo académico a mi hijo Kaleb Benjamín Alvarez Ríos, cuya presencia fue una fuente constante de motivación en el desarrollo de esta investigación, su acompañamiento silencioso pero firme, me permitió mantener el enfoque y la disciplina necesaria para alcanzar los objetivos propuestos.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi reconocimiento a mi padre, Victor Manuel Alvarez Alvarado, a mi madre, Victoria Sofía Polanco Merlo, y a mi hermana Angélica Yudelza Vásquez Polanco por ser los cimientos de mi desarrollo personal y académico; su ejemplo de esfuerzo, responsabilidad y perseverancia ha sido esencial para alcanzar esta meta profesional. Agradezco también a mi pareja, Martha Esmeralda Ríos Saucedo, por su constante apoyo, comprensión y compañía en cada etapa de esta investigación. Asimismo, manifiesto mi especial gratitud al Ing. M. Cs. Edgar Darwin Díaz Mori, asesor de esta tesis, por su orientación técnica, rigurosidad metodológica y valioso acompañamiento durante todo el proceso investigativo.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT.....	xi
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	4
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Antecedentes de la Investigación	4
2.2. Bases Teóricas.....	9
2.2.1. Aire.....	9
2.2.2. Calidad del aire	10
2.2.3. Contaminación del aire.....	12
2.2.4. Partículas suspendidas	13
2.2.5. Clasificación del material particulado	15
2.2.6. Efectos del material particulado en la salud humana y el medio ambiente	17
2.2.7. Contaminación atmosférica con material particulado PM_{10}	19
2.2.8. Índices de calidad ambiental para aire - INCA.....	20
2.2.9. Equipos para monitoreo de calidad del aire – PM_{10}	22

2.3.	Definición de Términos Básicos	24
2.3.1.	<i>Contaminante atmosférico</i>	24
2.3.2.	<i>Material particulado</i>	24
2.3.3.	<i>PM₁₀</i>	25
2.3.4.	<i>Zona urbana</i>	25
CAPÍTULO III		26
MATERIALES Y MÉTODOS		26
3.1.	Localización de la Investigación.	26
3.2.	Materiales y Equipos	29
3.3.	Método de la Investigación	29
3.3.1.	<i>Plan de monitoreo</i>	29
3.3.2.	<i>Diseño del monitoreo</i>	30
3.3.3.	<i>Método de medición</i>	35
3.3.4.	<i>Procesamiento y análisis de datos</i>	36
CAPÍTULO IV		37
RESULTADOS		37
4.1.	Concentración del material particulado (PM ₁₀) durante los meses de septiembre a diciembre	37
4.2.	Índice de Calidad del Aire (INCA) Respecto a la Concentración del Material Particulado (PM ₁₀) en el Aire de la Ciudad de Cajamarca	50
CAPÍTULO V		53
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		53
5.1.	Conclusiones	53

5.2. Recomendaciones.....	54
CAPÍTULO VI.....	55
REFERENCIAS.....	55
CAPÍTULO VII	64
ANEXOS	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores del Índice de Calidad del Aire	22
Tabla 2 Coordenadas de los puntos de muestreo	27
Tabla 3 Frecuencia y duración del monitoreo de PM ₁₀	31
Tabla 4 Frecuencia y periodos de monitoreo	31
Tabla 5 Temperatura máxima, mínima y precipitación de la ciudad de Cajamarca en el periodo estudiado	32
Tabla 6 Concentración promedio diaria de PM ₁₀ en cinco estaciones de monitoreo.....	37
Tabla 7 Análisis de varianza (ANOVA) para la concentración de PM ₁₀ según estación de monitoreo	48
Tabla 8 Índice de calidad del aire INCA en las estaciones de muestreo	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Sensor de PM ₁₀	23
Figura 2 Ubicación de la investigación.....	28
Figura 3 Rosa de vientos de la ciudad de Cajamarca del periodo setiembre -diciembre del 2024	33
Figura 4 Instalación el equipo de medición en el lugar seleccionado	35
Figura 5 Concentración de PM ₁₀ (µg/m ³) en los puntos de muestreo	38
Figura 6 Concentración horaria de PM ₁₀ en la época de muestreo por punto	42
Figura 7 Mapa de calor de la distribución del PM10.....	46

RESUMEN

La contaminación atmosférica por material particulado (PM_{10}) representa una amenaza para la salud pública y la calidad del aire en ciudades con crecimiento urbano y vehicular como Cajamarca, donde la exposición prolongada a estas partículas se asocia con enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Frente a esta problemática, el estudio tuvo como objetivo determinar el nivel de concentración de PM_{10} en el aire de Cajamarca durante el 2024 y calcular el Índice Nacional de Calidad del Aire (INCA). Se utilizó el método de dispersión de luz con un equipo automático en cinco puntos de monitoreo: Plaza de Armas ($62.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Plazuela Bolognesi ($70.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Óvalo Musical ($102.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Parque Las Máscaras ($100.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Fundo Sierra Verde ($26.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Según el INCA, las estaciones Óvalo Musical y Parque Las Máscaras presentaron calidad del aire “moderada”, mientras que las demás se clasificaron como “buenas”. El análisis estadístico mediante ANOVA de una vía mostró diferencias significativas entre los puntos de monitoreo, identificando zonas críticas asociadas al tránsito vehicular, lo que evidencia la necesidad de implementar medidas de control localizadas para reducir la exposición de la población.

Palabras clave: material particulado PM_{10} , calidad del aire, índice nacional de calidad del aire (INCA), salud pública.

ABSTRACT

Atmospheric pollution by particulate matter (PM₁₀) represents a threat to public health and air quality in cities with urban and vehicular growth such as Cajamarca, where prolonged exposure to these particles is associated with respiratory and cardiovascular diseases. Faced with this problem, the study aimed to determine the concentration level of PM₁₀ in the air of Cajamarca during 2024 and calculate the National Air Quality Index (INCA). The light scattering method was used with automatic equipment at five monitoring points: Plaza de Armas (62.29 µg/m³), Plazuela Bolognesi (70.18 µg/m³), Óvalo Musical (102.60 µg/m³), Parque Las Máscaras (100.01 µg/m³), and Fundo Sierra Verde (26.06 µg/m³). According to INCA, the Óvalo Musical and Parque Las Máscaras stations showed "moderate" air quality, while the others were classified as "good." Statistical analysis using one-way ANOVA showed significant differences between monitoring points, identifying critical zones associated with vehicular traffic, which demonstrates the need to implement localized control measures to reduce population exposure.

Keywords: PM₁₀ particulate matter, air quality, National Air Quality Index (INCA), public health.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica por material particulado (PM₁₀) constituye una de las principales amenazas para la salud pública en entornos urbanos. Diversos estudios han establecido asociaciones significativas entre la exposición a PM₁₀ y una variedad de efectos adversos para la salud, incluyendo enfermedades respiratorias y cardiovasculares, así como un aumento en la mortalidad general (Anderson et al., 2011, p. 167).

Diversas investigaciones previas habían evidenciado que la exposición a material particulado (PM₁₀) se encontraba asociada a efectos adversos sobre la salud humana, especialmente en poblaciones vulnerables, lo que reforzó la preocupación por la calidad del aire en los entornos urbanos. Estudios difundidos en literatura científica especializada señalaron que incrementos en los niveles de PM₁₀ se relacionaban con un mayor impacto en la salud respiratoria, lo cual puso de manifiesto la importancia del monitoreo sistemático y el control de

este contaminante atmosférico como una medida clave para la protección de la salud pública en las ciudades (Weinmayr et al., 2009).

En este sentido, la contaminación atmosférica en las ciudades es una problemática grave que afecta a la salud humana, el medio ambiente y la calidad de vida en general, la contaminación por PM_{10} en Cajamarca, al igual que en otras ciudades, se refiere a la presencia de partículas suspendidas en el aire con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros, estas partículas, también conocidas como material particulado fino, pueden tener diversos orígenes, incluyendo emisiones vehiculares, actividades industriales, construcción, quema de residuos y actividades agrícolas (Arellano Gamarra, 2019, p.15). En el caso específico de la ciudad de Cajamarca, la contaminación por PM_{10} se debe a varios factores: emisiones vehiculares, actividades industriales, actividades de construcción, quema de residuos agrícolas, entre otros.

Para abordar la contaminación por PM_{10} , es crucial implementar medidas efectivas de control de emisiones a nivel local y regional, incluyendo la regulación de fuentes emisoras, la promoción de prácticas industriales y de transporte más limpias, la gestión adecuada de residuos, el fomento del uso de energías renovables y el fortalecimiento de la concientización y educación ambiental (Galarza Montero, 2018, p. 35). Además, la colaboración entre autoridades locales, regionales y nacionales, así como la participación activa de la comunidad, son esenciales para afrontar eficazmente este problema. Las políticas ambientales integrales y la cooperación tanto a nivel nacional como internacional resultan fundamentales para reducir los niveles de PM_{10} y mejorar la calidad del aire en las ciudades (Panduro Bartra, 2020, p.28).

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar investigaciones que permitan conocer el nivel de concentración de material particulado (PM_{10}) en el aire de la ciudad de Cajamarca

durante el año 2024, así, la investigación se formula a partir de la siguiente interrogante: ¿Cuál es el nivel de concentración de material particulado (PM_{10}) en el aire de la ciudad de Cajamarca - 2024?, en ese sentido, el objetivo general del estudio fue determinar el nivel de concentración de material particulado (PM_{10}) en el aire de la ciudad de Cajamarca – 2024. Para lograr este propósito, se plantean como objetivos específicos: determinar la concentración del material particulado (PM_{10}) durante los meses de julio a diciembre del año 2024, y determinar el Índice Nacional de Calidad del Aire (INCA) respecto a la concentración del PM_{10} en la ciudad de Cajamarca durante el mismo periodo.

Este estudio resulta de gran relevancia, ya que aporta evidencia científica actualizada sobre los niveles de concentración de material particulado (PM_{10}) en el aire de la ciudad de Cajamarca-2024.

CAPÍTULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Antecedentes de la Investigación

Gutiérrez Ataballo (2020) evaluó la calidad del aire en el centro urbano del cantón Saquisilí, provincia de Cotopaxi, durante el periodo 2019–2020, mediante el monitoreo de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$. Identificó puntos estratégicos de muestreo de acuerdo con la normativa ecuatoriana vigente y la Norma Internacional EPA 40. Empleó el monitor de atenuación beta modelo E-BAM bajo método automático durante 24 horas, con registros de datos en tiempo real cada 15 minutos, comparó los resultados con los límites establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A (TULSMA Libro VI Anexo 4): $100 \mu g/m^3$ para PM_{10} y $50 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$, las concentraciones se mantuvieron dentro de los valores permisibles, aunque en determinadas horas se detectaron niveles elevados, alcanzando $150 \mu g/m^3$ de PM_{10} a las 16:00 y $44 \mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$ a las 18:00. En el Barrio El Calvario se reportaron $50 \mu g/m^3$ y $56 \mu g/m^3$ de PM_{10} a las 13:00 y 17:00 respectivamente, y $36 \mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$ a las 21:00, propuso acciones de mitigación para reducir las concentraciones horarias críticas y preservar la calidad del aire en la zona (p. 10).

Zafra et al. (2019) realizaron un análisis temporal diario con modelos ARIMA para evaluar la influencia de la cobertura superficial en las concentraciones de PM_{10} en Bogotá, Colombia, utilizando datos de seis estaciones automáticas de monitoreo entre 2007 y 2012. Las áreas con cobertura vegetada mostraron una mayor persistencia del PM_{10} , con una duración de dos días, y registraron menores concentraciones diarias de PM_{10} con una reducción del 42.7% en comparación con zonas de cobertura impermeable, la condición de estabilidad atmosférica (EA) presentó un patrón horario constante: EA diurna entre ligeramente inestable e inestable con una frecuencia promedio del 46.1%, y EA nocturna estable con una frecuencia del 45.1%. En la superficie urbana no se observaron variaciones espaciales significativas en la condición de EA diurna y nocturna durante el periodo analizado. Las concentraciones horarias y diarias de PM_{10} estuvieron influenciadas principalmente por los ciclos de emisión de fuentes fijas y móviles, más que por la condición de EA. El análisis de series temporales mostró que al aumentar la cobertura vegetada (árboles y pastizales), el PM_{10} presenta mayor persistencia, reflejada en un incremento del término autorregresivo (AR) de los modelos ARIMA. Asimismo, se registró un aumento en el componente de promedios móviles (MA), lo que indica una mayor variabilidad en las concentraciones de PM_{10} en zonas urbanas con predominio de cobertura vegetada (p. 148).

Arrieta Fuentes (2016) analizó la dispersión de material particulado (PM_{10}) considerando factores meteorológicos y topográficos mediante modelación con el software AERMOD View, se evaluaron escenarios de exposición diaria y anual en dos zonas topográficas: una compleja en el municipio de Socha y una simple en Sogamoso, utilizó información meteorológica horaria satelital en formato, SAM. Se identificaron tres tipos de fuentes de emisión: fijas dispersas como predominantes, seguidas por móviles y en menor

proporción las puntuales, los resultados mostraron que la dirección y velocidad del viento dependen de la topografía; en la zona simple el viento fluye libremente según la dirección predominante de la rosa de vientos, mientras que en la zona compleja se genera un patrón turbulento, los focos de emisión en ambos casos corresponden a una escala local, con un radio crítico de arrastre y deposición de partículas de aproximadamente 200 metros (p. 43).

Barrantes Flores (2021) indicó que el Ministerio del Ambiente, en 2014, declaró a 13 ciudades como zonas de atención prioritaria para la gestión de la calidad del aire, incluyendo a la provincia de Huancayo, donde el material particulado (PM) representa el principal contaminante, las fuentes emisoras incluyen camiones, automóviles, polvo del suelo, carreteras y quema de pastizales, las consecuencias del PM afectan principalmente el sistema respiratorio, tanto en niños como en adultos, el estudio, de tipo aplicado descriptivo, tuvo como objetivo determinar la distribución del material particulado en Huancayo Metropolitano durante noviembre de 2020, la concentración de PM_{10} se midió con un dispositivo HI-VO y la de $PM_{2.5}$ con un equipo LOW-VOL, ambos calibrados por “Enviroequip SAC” y validados por la EPA. Se aplicó la norma técnica peruana NTP 900.030-2003, los promedios obtenidos fueron: PM_{10} con valores de 92.3, 48.5 y 89.5 $\mu g/m^3$; $PM_{2.5}$ con valores de 14.0, 7.0 y 22.3 $\mu g/m^3$, ubicándose por debajo de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aire, la dispersión de PM_{10} en la ciudad osciló entre 50.1467 y 92.0006 $\mu g/m^3$, mientras que el $PM_{2.5}$ presentó un rango de 7.19654 a 21.977 $\mu g/m^3$, influenciada por la cantidad y tipo de fuentes fijas y móviles en la zona (p. 6).

Robles et al. (2019) analizó la relación entre las concentraciones de material particulado (PM_{10}) generadas por el tajo abierto “Raúl Rojas” y los casos de infecciones respiratorias agudas (IRAS) en la población de Cerro de Pasco durante 2010 y 2016. Se

utilizaron datos de cuatro estaciones de monitoreo de calidad del aire y el número de atenciones hospitalarias registradas en época seca, el estudio fue de tipo exploratorio y explicativo, con un diseño no experimental. Se trabajó con una muestra de 10,029 personas seleccionadas mediante muestreo no probabilístico discrecional, la prueba estadística aplicada fue la de Student, con resultados de $p=0.041$ en 2010 y $p=0.00$ en 2016, ambos menores al umbral de 0.05 con un nivel de confianza del 95%, le concluyó que existe una relación significativa entre las emisiones de PM_{10} provenientes de la actividad minera y la incidencia de IRAS en la ciudad (p. 11).

Cahuantico Salas (2019) evaluó el nivel de contaminación del aire en los distritos de Huanchaq, San Sebastián y San Jerónimo durante la época de estío, en tres etapas: inicial, media y final, el estudio fue de tipo cuasi experimental, en cuanto al material particulado (PM_{10}), se registraron concentraciones de $57.32 \mu g/m^3$ en Huanchaq, $54.443 \mu g/m^3$ en San Sebastián y $95.027 \mu g/m^3$ en San Jerónimo, aunque estos valores no superan el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) del MINAM ($100 \mu g/m^3$), sí exceden el límite establecido por la OMS ($50 \mu g/m^3$). Para el monóxido de carbono (CO), las concentraciones fueron de $6201.555 \mu g/m^3$ en Huanchaq, $4379.806 \mu g/m^3$ en San Sebastián y $5095.975 \mu g/m^3$ en San Jerónimo, todas por debajo de los límites del MINAM ($10000 \mu g/m^3$) y de la OMS ($10285 \mu g/m^3$). En el caso del dióxido de azufre (SO_2), se registraron $2.705 \mu g/m^3$ en Huanchaq, $3.848 \mu g/m^3$ en San Sebastián y $2.612 \mu g/m^3$ en San Jerónimo, también por debajo de los límites del MINAM ($20 \mu g/m^3$) y la OMS ($18.753 \mu g/m^3$), la contaminación del aire se atribuye a diversas fuentes presentes en los distritos, destacando las ladrilleras en San Jerónimo y el parque automotor como las principales (p. 4).

Durand y Burga (2021) analizaron la variación temporal de las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la ciudad de Cajamarca, durante el periodo 2012–2018, utilizando una metodología de tipo descriptiva-explicativa, con un enfoque aplicativo y diseño no experimental, en relación con el PM_{10} , se reportaron los valores promedio más elevados en 2012 ($75.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2013 ($64.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que las concentraciones más bajas se registraron en 2014 ($43.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2015 ($47.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$), los datos muestran una tendencia general decreciente a lo largo de los años evaluados, de igual modo, el comportamiento del $PM_{2.5}$ evidenció una reducción progresiva, alcanzando los picos más altos en 2012 ($65.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2016 ($57.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$), y el valor más bajo en 2018 ($49.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$), las concentraciones de PM_{10} en el periodo de estudio se mantuvieron por debajo del límite establecido por el Estándar de Calidad Ambiental (ECA), mientras que los niveles de $PM_{2.5}$ superaron dicho umbral en todos los años, con excepción de 2018 (p. 8).

Camacho y Villegas (2017) evaluaron la relación entre las concentraciones de PM_{10} y el comportamiento del viento en Cajamarca entre 2012 y 2015, se aplicaron métodos estadísticos como la media para determinar el viento resultante, su dirección, velocidad promedio y persistencia, con el fin de identificar una dirección predominante, las concentraciones de PM_{10} se agruparon en intervalos anuales y globales utilizando la regla de Sturges; con estos datos se elaboraron tablas de frecuencia y rosas de viento mediante el software WRPLOP View Versión 7.0.0 para observar su relación con el viento, se determinó que la velocidad del viento se relaciona inversamente con la concentración de PM_{10} : a menor velocidad, mayor concentración, en contraste, la dispersión del material particulado guarda una relación directa con la velocidad del viento, ningún año presentó una dirección de viento predominante, al comparar los niveles de PM_{10} con el Estándar de Calidad Ambiental (ECA)

para 24 horas, solo el 29 de diciembre de 2013 superó el valor límite; las demás fechas evaluadas permanecieron dentro de los rangos permitidos (p. 9).

Suárez et al. (2017) caracterizaron la composición química del material particulado (MP) atmosférico recolectado en una estación ubicada en el centro urbano de Huancayo, las muestras se obtuvieron en agosto de 2007, y en enero, abril y mayo de 2008, utilizando un equipo de bajo volumen (PARTISOL FRM 2000) con filtros de 47 mm, se determinaron las concentraciones de partículas de hasta 10 μm (MP_{10}) y menores a 2.5 μm ($\text{MP}_{2.5}$), analizando su composición química mediante fluorescencia de rayos X (XRF) para 38 elementos, en el caso del $\text{MP}_{2.5}$, se identificaron también iones como nitrato (NO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}), así como especies carbonáceas: carbono orgánico (COrg) y carbono elemental (CE), los valores promedio de MP_{10} ($64,54 \pm 30,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $\text{MP}_{2.5}$ ($34,47 \pm 14,75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) superaron la normativa anual de calidad del aire peruano, siendo el $\text{MP}_{2.5}$ el más abundante en comparación con otras ciudades, se observó mayor concentración de MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$ durante el periodo seco, la composición química reveló que en el MP_{10} predominaron elementos geológicos (8%), metales (12%) y metaloides (7%); mientras que en el $\text{MP}_{2.5}$ destacaron no metales (4%), iones (11%) y especies carbonáceas (44%), el estudio confirma la problemática asociada al MP en Huancayo, señalando al $\text{MP}_{2.5}$ como el principal riesgo para la salud, con el transporte como fuente emisora relevante (p. 187).

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Aire

El aire es una mezcla de gases que constituye la atmósfera terrestre y que rodea la Tierra, está compuesto principalmente por nitrógeno (aproximadamente el 78%), oxígeno (alrededor del 21%), y pequeñas cantidades de otros gases como argón,

dióxido de carbono, neón y vapor de agua, además de estos componentes gaseosos, el aire también puede contener partículas suspendidas, polvo y otras sustancias, el oxígeno en el aire es esencial para la respiración de los seres vivos, incluidos los humanos, la atmósfera cumple funciones importantes, como regular la temperatura de la Tierra, filtrar la radiación solar peligrosa y proporcionar presión atmosférica necesaria para diversos procesos biológicos (Castro Utcani, 2019, p. 46).

Además de los componentes principales, la atmósfera contiene gases traza que, aunque presentes en concentraciones mínimas, tienen un impacto significativo en el medio ambiente. Gases como el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), los clorofluorocarbonos (CFC) y el ozono (O_3) son conocidos por su capacidad para absorber la radiación infrarroja emitida por la Tierra, contribuyendo al efecto invernadero y regulando la temperatura planetaria, el vapor de agua, aunque su concentración varía según la ubicación geográfica y las condiciones climáticas, también actúa como un importante gas de efecto invernadero y es fundamental para la formación de nubes y precipitaciones, la presencia y concentración de estos gases traza están influenciadas por factores naturales y actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles y la deforestación, lo que resalta la importancia de monitorear su evolución para comprender y mitigar los impactos del cambio climático (Schlesinger y Bernhardt, 2020, p. 52).

2.2.2. Calidad del aire

La calidad del aire se refiere a la cantidad y la variedad de contaminantes presentes en la atmósfera, estos contaminantes pueden tener efectos adversos en la salud humana, la fauna, la vegetación y el medio ambiente en general (Manisalidis et

al., 2020, p. 2), algunos de los contaminantes del aire comunes incluyen según

Sonwani y Saxena (2016, p. 111):

- Partículas suspendidas: pequeñas partículas sólidas o líquidas en el aire, que pueden incluir polvo, hollín, cenizas y gotas de líquidos.
- Óxidos de nitrógeno (NO_x): compuestos formados por nitrógeno y oxígeno, generados principalmente por procesos de combustión.
- Dióxido de azufre (SO₂): un gas incoloro con un olor penetrante, producido por la quema de combustibles fósiles que contienen azufre.
- Monóxido de carbono (CO): un gas incoloro e inodoro, producto de la combustión incompleta de carbono.
- Compuestos orgánicos volátiles (COV): Sustancias químicas orgánicas que pueden evaporarse fácilmente en forma de gas y contribuir a la formación de smog y otros problemas de calidad del aire.
- Ozono (O₃): se forma a través de reacciones químicas entre óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles en presencia de luz solar.

La monitorización de la calidad del aire es crucial para evaluar y controlar la exposición a estos contaminantes, el Índice de Calidad del Aire (ICA), proporcionan información sobre la salud del aire en una determinada área, clasificando los niveles de contaminación y ofreciendo recomendaciones para proteger la salud pública, las autoridades ambientales suelen establecer estándares para los niveles aceptables de contaminantes con el fin de proteger la salud humana y el medio ambiente (Brook et al., 2024, p. 3).

La vigilancia de la calidad del aire no solo permite evaluar el cumplimiento de los estándares establecidos, sino que también proporciona información esencial para estimar la exposición de la población a contaminantes atmosféricos y sus efectos en la salud pública. La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2025) destaca que muchas redes de monitoreo actuales no abordan completamente la exposición poblacional a contaminantes tóxicos, lo que limita la capacidad de implementar políticas efectivas de gestión ambiental y sanitaria (p. 1). Por ello, se recomienda adoptar estrategias integradas que consideren tanto los niveles de contaminación como la distribución espacial y temporal de la exposición humana, facilitando así evaluaciones más precisas del impacto en la salud y el diseño de intervenciones más eficaces (Breuer, 1999, p. 3).

2.2.3. Contaminación del aire

La contaminación del aire se refiere a la presencia de sustancias en la atmósfera que pueden tener efectos perjudiciales en la salud humana, animal, vegetal y en el medio ambiente en general, estas sustancias, conocidas como contaminantes atmosféricos, pueden ser de origen natural o antropogénico (proveniente de actividades humanas), algunos de los contaminantes del aire más comunes incluyen: partículas suspendidas, óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV) y Ozono (O₃), la contaminación del aire puede tener graves consecuencias para la salud, causando enfermedades respiratorias, cardiovasculares y otros problemas de salud, además, por la deposición puede afectar la calidad del agua y del suelo, dañar la vegetación, afectar a los ecosistemas y contribuir al cambio climático, las medidas para abordar la contaminación del aire incluyen la regulación de emisiones, la promoción de

tecnologías más limpias, la transición hacia fuentes de energía renovable, el fomento del transporte sostenible y la concienciación pública sobre prácticas amigables con el medio ambiente. (Prieto Zambrano, 2016, p. 86).

La contaminación del aire no solo afecta la salud humana, sino que también tiene consecuencias significativas para los ecosistemas, contaminantes como el dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) pueden reaccionar en la atmósfera formando lluvia ácida, la cual altera la acidez de los suelos y cuerpos de agua, afectando la biodiversidad y la salud de las plantas y animales, además, la exposición prolongada a estos contaminantes puede modificar los procesos biogeoquímicos esenciales, como el ciclo del nitrógeno, lo que impacta negativamente en la estructura y funcionalidad de los ecosistemas (Stevens et al., 2020, p. 1).

La contaminación del aire también tiene efectos perjudiciales sobre la fauna, especialmente en invertebrados beneficiosos como los polinizadores, estudios han demostrado que contaminantes como el ozono, los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre pueden reducir el rendimiento de estos invertebrados, afectando servicios ecosistémicos clave como la polinización y el control natural de plagas (Ryalls y otros, 2024, p. 5447)

2.2.4. Partículas suspendidas

Las partículas suspendidas, también conocidas como material particulado o PM por sus siglas en inglés (Particulate Matter), son pequeñas partículas sólidas o líquidas que se encuentran suspendidas en el aire. Estas partículas pueden ser de diferentes tamaños, desde unas pocas micras hasta 10 micrómetros (PM_{10}) o incluso menos de 2,5 micrómetros ($\text{PM}_{2,5}$) (Arciniégas Suárez, 2012, p. 195).

Según Koçak et al. (2007) las partículas suspendidas pueden tener un origen natural o antropogénico, las fuentes naturales de partículas suspendidas incluyen:

- Polvo mineral: proveniente de la erosión del suelo, la actividad volcánica y los incendios forestales.
- Sal marina: proveniente de la pulverización del agua del mar.
- Materia orgánica: proveniente del polen, las esporas de hongos y las bacterias.

Las fuentes antropogénicas de partículas suspendidas incluyen:

- Combustión de combustibles fósiles: en vehículos, centrales eléctricas e industrias.
- Quema de biomasa: en incendios forestales, agricultura y cocción de alimentos.
- Procesos industriales: como la fundición de metales, la producción de cemento y la fabricación de productos químicos.

La exposición a las partículas suspendidas, especialmente a las $PM_{2,5}$, puede tener graves consecuencias para la salud. Estas partículas pueden:

- Penetrar en las vías respiratorias profundas y los pulmones.
- Provocar irritación e inflamación del sistema respiratorio.
- Agravar enfermedades respiratorias como el asma y la bronquitis crónica.
- Aumentar el riesgo de enfermedades cardíacas, accidentes cerebrovasculares y cáncer (p. 3806).

Las personas más vulnerables a los efectos de las partículas suspendidas son los niños, los ancianos con enfermedades respiratorias y las mujeres embarazadas. (Ballesteros y Rotter, 2020, p. 46)

2.2.5. Clasificación del material particulado

Según Robles Morales (2020) el material particulado (o partículas suspendidas) se clasifica en función de su tamaño. Estas partículas varían en tamaño y composición, y su clasificación se realiza según su diámetro aerodinámico, es decir, el tamaño de la partícula que se tiene en cuenta al evaluar su comportamiento en el aire. Las clasificaciones comunes son PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 , que representan diferentes fracciones de tamaño de partículas.

- PM_{10} (Partículas en suspensión de 10 micrómetros): comprenden fracciones sólidas o líquidas que, al ser inhaladas, pueden depositarse en las vías respiratorias superiores, incluyendo la tráquea y los bronquios principales, y están compuestas por materiales como polvo, cenizas, hollín y metales pesados, cuya presencia en el aire ambiente se ha asociado con la exacerbación de enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Roemer y otros, 2000, p. 553).

Desde el punto de vista de su origen, el PM_{10} puede provenir tanto de fuentes naturales como antropogénicas. Entre las fuentes naturales se incluyen el polvo resuspendido del suelo, la erosión eólica y partículas de origen biológico, mientras que las fuentes antropogénicas comprenden principalmente el tránsito vehicular, la resuspensión de material particulado

en vías no pavimentadas, actividades de construcción, procesos industriales y la quema de residuos sólidos (*Álvarez & Suárez, 2021*).

En cuanto a su composición, el PM_{10} suele estar constituido por una mezcla heterogénea de partículas sólidas y líquidas, tales como silicatos, metales pesados, compuestos orgánicos, sulfatos y nitratos, cuya toxicidad depende de su origen y concentración en el aire ambiente. La exposición prolongada a concentraciones elevadas de PM_{10} ha sido asociada con un aumento en la incidencia de enfermedades respiratorias, agravamiento del asma, bronquitis crónica y efectos cardiovasculares, especialmente en poblaciones vulnerables como niños, adultos mayores y personas con enfermedades preexistentes (*Doria & Fagundo, 2016*)

- $PM_{2.5}$ (Partículas en suspensión de 2.5 micrómetros o menos): Incluye partículas más pequeñas con un diámetro aerodinámico de 2.5 micrómetros o menos, estas partículas son aún más pequeñas y pueden penetrar más profundamente en los pulmones, representando un riesgo mayor para la salud humana, fuentes comunes incluyen emisiones de vehículos, procesos industriales y combustión de biomasa (Sangkham et al., 2024, p. 2).
- PM_1 (Partículas en suspensión de 1 micrómetro o menos): Incluye partículas extremadamente pequeñas con un diámetro aerodinámico de 1 micrómetro o menos, estas partículas son aún más finas y pueden tener efectos más graves en la salud, fuentes incluyen procesos industriales, combustión de combustibles y emisiones vehiculares (Yaoyu et al., 2022, p. 15117).

La clasificación PM se basa en la capacidad de penetración de las partículas en el sistema respiratorio, las partículas más pequeñas pueden llegar a los pulmones más profundos y tienen un mayor potencial para causar daño a la salud, el monitoreo de estos tamaños de partículas es esencial para evaluar la calidad del aire y tomar medidas adecuadas para reducir la exposición y mitigar los impactos en la salud pública y el medio ambiente (Schraufnagel, 2020, p. 312).

2.2.6. Efectos del material particulado en la salud humana y el medio ambiente

El material particulado (MP) es considerado uno de los contaminantes atmosféricos más relevantes debido a su capacidad de permanecer en suspensión en el aire y a su interacción directa con los sistemas biológicos y ambientales. Su impacto depende principalmente del tamaño aerodinámico, composición química y tiempo de exposición, siendo las fracciones PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 las más estudiadas por sus implicancias sanitarias y ambientales (Cruz et al., 2019).

Desde el punto de vista de la salud humana, las partículas PM_{10} presentan la capacidad de ingresar al sistema respiratorio superior y a los bronquios, donde pueden generar procesos de irritación, inflamación y reducción de la función pulmonar. La deposición de estas partículas está asociada a un aumento de síntomas respiratorios y a la exacerbación de enfermedades preexistentes, especialmente en ambientes urbanos con alta carga contaminante (Schraufnagel et al., 2019).

La exposición prolongada al material particulado ha sido ampliamente relacionada con enfermedades respiratorias crónicas, tales como asma, bronquitis crónica y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC). Estudios epidemiológicos han demostrado que incrementos sostenidos en las concentraciones

de PM₁₀ se correlacionan con mayores tasas de hospitalización por afecciones respiratorias, particularmente en niños y adultos mayores (Gavira et al., 2011).

Asimismo, existe evidencia científica que vincula la exposición al material particulado con alteraciones cardiovasculares. Las partículas inhaladas pueden inducir respuestas inflamatorias sistémicas y estrés oxidativo, favoreciendo la disfunción endotelial, el aumento de la presión arterial y el riesgo de eventos cardiovasculares agudos como infartos y accidentes cerebrovasculares (Sandoval et al., 2019).

La fracción más fina del material particulado posee la capacidad de atravesar la barrera alveolo-capilar y alcanzar el torrente sanguíneo, lo que explica los efectos sistémicos observados en múltiples órganos. Esta característica incrementa el riesgo de mortalidad prematura, particularmente en poblaciones vulnerables expuestas de manera crónica a ambientes con mala calidad del aire (Flood et al., 2019).

De acuerdo con Sánchez y Aldaba (2022), la exposición continua al material particulado no solo afecta al sistema respiratorio y cardiovascular, sino que también genera procesos inflamatorios generalizados que pueden alterar el funcionamiento normal de diversos sistemas del organismo. Los autores señalan que estos efectos se intensifican en contextos urbanos donde las concentraciones de partículas superan los valores recomendados, incrementando la carga de enfermedad atribuible a la contaminación atmosférica (p. 40).

En cuanto a los efectos ambientales, el material particulado puede depositarse sobre la superficie de las plantas, interfiriendo en los procesos fisiológicos y reduciendo la eficiencia fotosintética. Esta deposición altera el intercambio gaseoso y

el crecimiento vegetal, afectando la productividad y estabilidad de los ecosistemas terrestres (Angeles et al., 2024).

Además, las partículas en suspensión pueden ser transportadas y depositadas en cuerpos de agua y suelos, modificando su composición físico-química. Este proceso puede generar impactos negativos sobre organismos acuáticos y terrestres, así como favorecer la acumulación de contaminantes asociados al material particulado en los ecosistemas (Velázquez et al., 2023).

Desde una perspectiva atmosférica, determinadas fracciones del material particulado influyen en el balance radiativo al absorber o dispersar la radiación solar. Este fenómeno contribuye a la reducción de la visibilidad atmosférica y puede alterar patrones climáticos locales y regionales, especialmente en zonas urbanas densamente pobladas (Angeles et al., 2021).

2.2.7. Contaminación atmosférica con material particulado PM_{10}

La contaminación atmosférica con material particulado PM_{10} se refiere a la presencia elevada de partículas en suspensión con un diámetro aerodinámico de 10 micrómetros o menos en la atmósfera, estas partículas, al ser inhaladas, pueden tener impactos significativos en la salud humana y el medio ambiente, aquí se describen algunos aspectos clave relacionados con la contaminación atmosférica con PM_{10} (Ballesteros y Rotter, 2020, p. 116).

La exposición prolongada a partículas en suspensión con un diámetro aerodinámico igual o inferior a 10 micrómetros (PM_{10}) ha sido asociada con un aumento en la mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares, estudios han demostrado que cada incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de PM_{10} en el

aire ambiente está vinculado a un aumento del 0,58% en la mortalidad respiratoria, además, la exposición a corto plazo a PM_{10} se ha relacionado con un aumento del 0,27% en la mortalidad cardiovascular y del 0,56% en la mortalidad respiratoria (Newell et al., 2017, p. 380).

Las partículas PM_{10} pueden ser transportadas por el viento durante largas distancias y depositarse en cuerpos de agua y suelos, lo que puede alterar el equilibrio de nutrientes en ecosistemas acuáticos y terrestres, este depósito puede acidificar lagos y ríos, dañar bosques sensibles y cultivos agrícolas, y afectar la biodiversidad de los ecosistemas (United States Environmental Protection Agency [EPA], 2024, p. 1).

Las principales fuentes de emisión de PM_{10} incluyen el tráfico vehicular, procesos industriales y la quema de combustibles, investigaciones han encontrado concentraciones significativamente más altas de PM_{10} en áreas industriales ($36,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en comparación con áreas de parques ($20,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$), lo que destaca la necesidad de intervenciones específicas en diferentes zonas urbanas para mitigar la exposición de la población (Islam et al., 2024, p. 2).

Las partículas PM_{10} pueden ser transportadas por el viento durante largas distancias y depositarse en cuerpos de agua y suelos, lo que puede alterar el equilibrio de nutrientes en ecosistemas acuáticos y terrestres, este depósito puede acidificar lagos y ríos, dañar bosques sensibles y cultivos agrícolas, y afectar la biodiversidad de los ecosistemas (EPA, 2024, p. 2).

2.2.8. Índices de calidad ambiental para aire - INCA

Según el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2016), el Índice Nacional de Calidad del Aire (INCA) es un indicador que permite evaluar el nivel de

contaminación atmosférica y su relación con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aire. El índice se expresa en una escala numérica continua, donde los valores comprendidos entre 0 y 100 corresponden al cumplimiento de los ECA, mientras que los valores superiores a 100 indican la superación de dichos estándares y, por tanto, un deterioro progresivo de la calidad del aire.

Para facilitar su interpretación, el INCA se clasifica en cuatro categorías de calidad del aire, cada una asociada a un rango de valores y a un código de color. La categoría Buena, representada por el color verde, corresponde a valores del INCA entre 0 y 50, e indica condiciones favorables para la salud. La categoría Moderada, identificada con el color amarillo, comprende valores entre 51 y 100, lo que señala una calidad del aire aceptable, aunque con posibles efectos leves en poblaciones sensibles.

Cuando el INCA supera el valor de 100, se considera que los Estándares de Calidad Ambiental han sido excedidos. En este rango, la categoría Mala, representada por el color anaranjado, abarca los valores comprendidos entre 101 y el Valor Umbral del Estado de Cuidado (VUEC) específico para cada contaminante. Finalmente, la categoría Muy Mala, identificada con el color rojo, corresponde a valores del INCA superiores al VUEC, situación que implica un riesgo significativo para la salud pública y la activación de los niveles de alerta sanitaria por parte de la autoridad competente (MINAM, 2016).

A partir de este valor corresponde la aplicación de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales por parte de la autoridad de Salud. La figura 1 muestra los valores del INCA, con las 4 calificaciones y los colores utilizados para cada caso.

$$\text{ÍNDICE } (PM_{10}) = [PM_{10}] * \frac{100}{150}$$

Tabla 1*Valores del Índice de Calidad del Aire*

Calificación	Valores del INCA	Colores
Buena	0-50	Verde
Moderada	51-100	Amarillo
Mala	101-VUEC*	Anaranjado
VUEC*	>VUEC*	Rojo

Nota: VUEC (valor umbral del estado de cuidado) (MINAM, 2016, p. 3).

2.2.9. Equipos para monitoreo de calidad del aire – PM_{10}

Los equipos de monitoreo de la calidad del aire que operan mediante sensores de dispersión de luz funcionan a partir de la emisión de un haz luminoso que incide sobre las partículas suspendidas en el aire. Al interactuar con las partículas, la luz es dispersada en distintas direcciones, y la intensidad de dicha dispersión guarda una relación directa con la concentración de material particulado presente en el ambiente. Este principio físico permite la detección y cuantificación de partículas en suspensión de manera continua, facilitando la evaluación de la concentración de material particulado en el aire durante los periodos de monitoreo (Tong et al., 2021, p. 1).

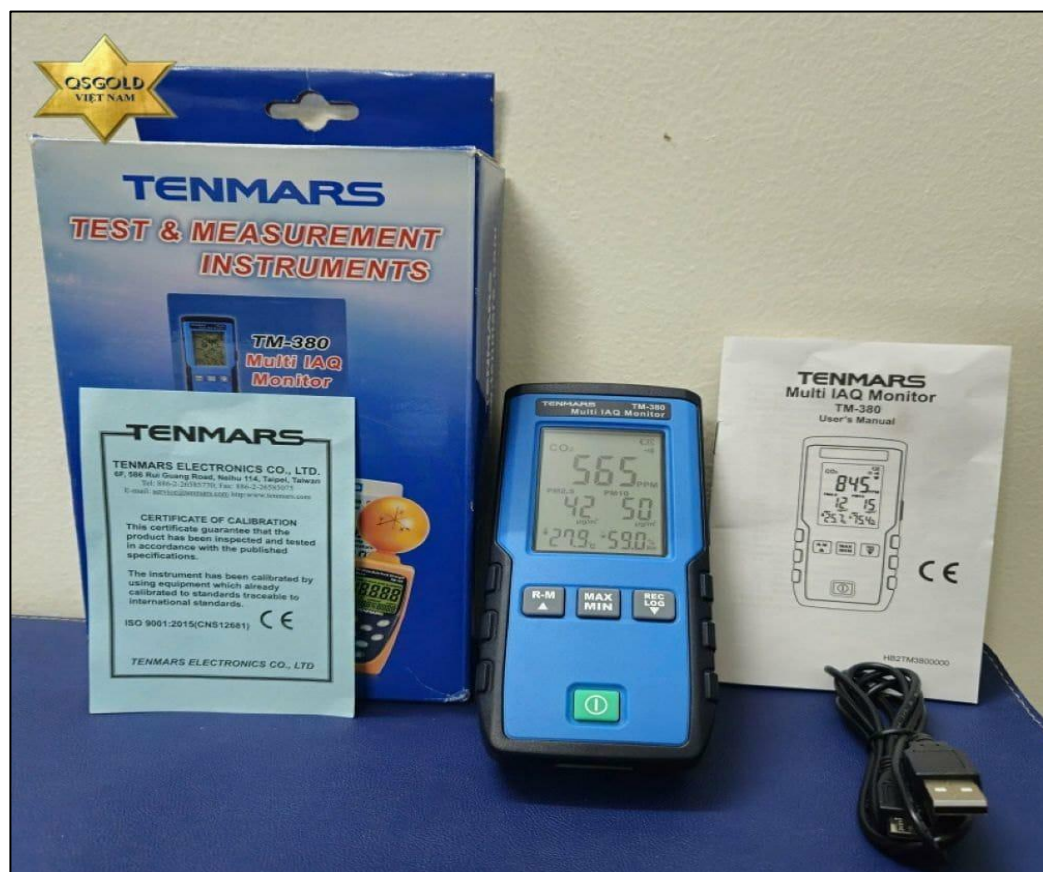
Monitor de partículas portátil: Este equipo se utiliza para la medición óptica de PM_{10} , es un equipo portátil que permite realizar mediciones en diferentes lugares (Molaie y Lino, 2021, p. 1).

Sensor de PM_{10} : Este equipo se utilizó para la medición en tiempo real de las concentraciones de material particulado menor o igual a 10 micras (PM_{10}). Se trata de un equipo de bajo costo, adecuado para estudios de monitoreo ambiental urbano, que permite obtener registros continuos de concentración y evaluar la variabilidad espacial

y temporal del contaminante, pudiendo ser instalado en redes de monitoreo de la calidad del aire (García y Rico, 2019, p. 4)

Figura 1

Sensor de PM_{10}



De acuerdo con Alvarado et al. (2011), la selección de equipos para el monitoreo de material particulado PM_{10} debe considerar el objetivo del monitoreo, el presupuesto disponible y los recursos humanos requeridos para su operación y mantenimiento. En función de estos criterios, pueden emplearse equipos gravimétricos o instrumentos de lectura directa, siendo estos últimos adecuados para evaluaciones continuas y estudios exploratorios de calidad del aire (p. 27).

En el contexto peruano, el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire, aprobado mediante el DS N.º 010-2019-MINAM, establece que la selección de los equipos de monitoreo debe garantizar la representatividad de las mediciones, la confiabilidad de los datos y la adecuación al tipo de contaminante evaluado. Asimismo, la norma señala que los instrumentos utilizados deben cumplir con procedimientos de operación y mantenimiento que aseguren la calidad de la información obtenida.

En concordancia con lo anterior, Seesaard et al. (2024) destacan la importancia de considerar la normativa vigente, así como la correcta calibración y mantenimiento de los equipos, a fin de asegurar la precisión y validez de los resultados del monitoreo. Estos criterios resultan consistentes con los lineamientos técnicos establecidos por la autoridad ambiental peruana para el monitoreo de la calidad del aire (p. 3).

2.3. Definición de Términos Básicos

2.3.1. Contaminante atmosférico

Cualquier sustancia o forma de energía que se encuentra en el aire en cantidades que pueden ser nocivas para la salud humana, el medio ambiente o los bienes materiales. (Sanhueza, et al., 2005, p.35).

2.3.2. Material particulado

El material particulado (MP) es una mezcla compleja de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire, estas partículas pueden variar en tamaño aerodinámico, forma y composición (Alvarez y Padilla, 2017, p. 27).

2.3.3. PM_{10}

PM_{10} se refiere a partículas con un diámetro de 10 micrómetros o menos. Es un tipo de contaminante del aire formado por pequeñas partículas suspendidas en el aire. Estas partículas pueden provenir de diversas fuentes, incluidos los gases de escape de los vehículos, los procesos industriales, las actividades de construcción y fuentes naturales como los incendios forestales y las tormentas de polvo. La preocupación con las PM_{10} es su potencial de causar problemas respiratorios y cardiovasculares cuando se inhalan, ya que las partículas pueden penetrar profundamente en los pulmones (Gómez Comba, 2017, p.41)

2.3.4. Zona urbana

Se refiere a un área densamente poblada con edificios, infraestructura y un enfoque en la industria y los servicios. Estas podrían incluir una alta densidad de población, una demografía diversa, sistemas de transporte complejos, atracciones culturales y desafíos como la contaminación y la congestión. (Canales Rodríguez et al., 2014, p.42)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización de la Investigación.

La investigación se llevó a cabo en la provincia de Cajamarca, ubicada al norte del Perú, a una altitud aproximada de 2 720 metros sobre el nivel del mar, sobre la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes. El área de estudio presentó condiciones térmicas templadas, con temperaturas máximas promedio que no superaron los 25 °C, temperaturas mínimas promedio cercanas a los 7 °C y un régimen de precipitación anual comprendido entre 300 mm y 700 mm (SENAMHI, 2025).

Para el desarrollo del estudio, se seleccionaron cinco puntos de muestreo distribuidos en distintas zonas del área urbana. La selección de estos puntos se realizó conforme a los criterios establecidos en el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire, específicamente en el inciso C.2.3, orientado a la prevención y evaluación de riesgos en la salud ambiental, priorizando el riesgo potencial para la salud de la población. Asimismo, se consideraron criterios técnicos complementarios como la intensidad del tránsito vehicular, la dirección predominante del viento y la presencia o ausencia de cobertura vegetal en el

entorno inmediato, lo que permitió obtener información representativa de las condiciones ambientales urbanas.

Los puntos de monitoreo fueron los siguientes:

- Punto 1 (P1): Plaza de Armas, en la intersección de los jirones Amalia Puga y Dos de Mayo.
- Punto 2 (P2): Plazuela Bolognesi.
- Punto 3 (P3): Óvalo Musical, intersección de la avenida Atahualpa con la Vía de Evitamiento Sur.
- Punto 4 (P4): Parque Las Máscaras, intersección de la avenida Hoyos Rubio con la Vía de Evitamiento Norte.
- Punto 5 (P5): Fundo Sierra Verde, en la zona de Otuzco.

Las coordenadas de cada punto fueron registradas en el sistema de referencia UTM (Universal Transverse Mercator) y se presentan en la Tabla 2, la distribución espacial de estos puntos dentro del área urbana de Cajamarca puede observarse en la Figura 2.

Tabla 2

Coordenadas de los puntos de muestreo

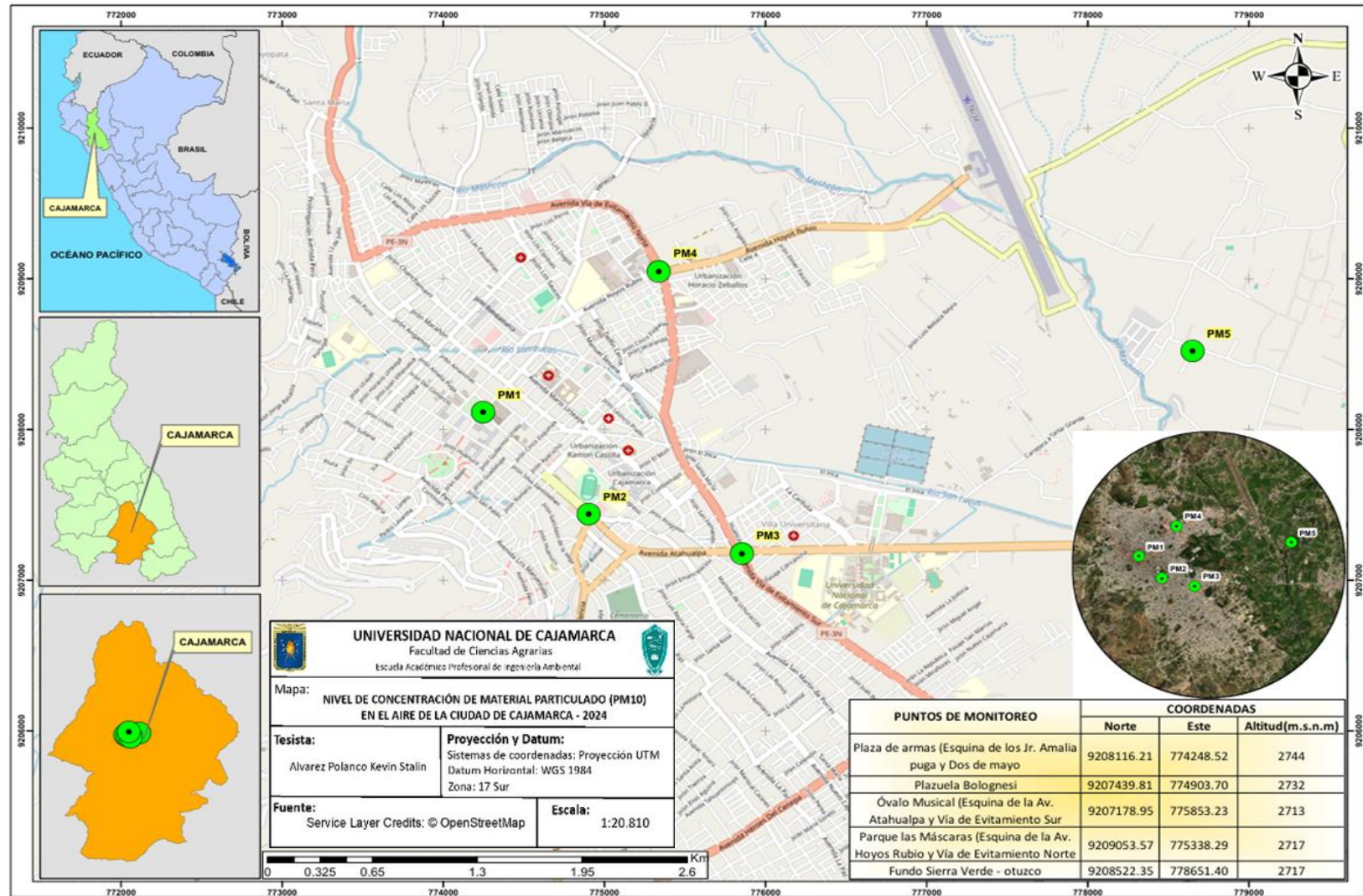
Puntos de monitoreo	Coordenadas		
	Norte	Este	Altitud
Punto 1 (P1)	9208116.21	774248.52	2744 m
Punto 2 (P2)	9207439.81	774903.70	2732 m
Punto 3 (P3)	9207178.95	775853.23	2713 m
Punto 4 (P4)	9209053.57	775338.29	2717 m
Punto 5 (P5)	9208522.35	778651.40	2717 m

Nota: La ubicación de los puntos de monitoreo se definió conforme al Protocolo

Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire, inciso C.2.3.

Figura 2

Ubicación de la investigación



3.2. Materiales y Equipos

Equipos

- Cámara digital Canon EOS 2000D.
- Pilas y cargadores eléctricos.
- GPS Map 76CSx
- Contador de partículas TENMARS Multi IAQ Monitor TM-380
- Laptop HP pavillon p2 MYL12345678

Materiales

- Protección ocular – lentes Google.
- Guantes quirúrgicos.
- Protección de cuerpo completo – Tyvek.
- Movilidad.
- Formato para registro de datos de campo.
- Plumón indeleble.
- Plano Topográfico.
- Imagen satelital.
- Trípode.
- Conos de seguridad.

3.3. Método de la Investigación

3.3.1. Plan de monitoreo

Se desarrolló conforme al Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire (DS N.º 010-2019-MINAM), el cual establece los criterios y lineamientos

técnicos para el monitoreo ambiental. La evaluación estuvo orientada a la medición del material particulado menor o igual a 10 micras (PM_{10}), por tratarse de un contaminante con efectos significativos sobre la salud pública.

Se planificó el desarrollo de los monitoreos durante el periodo comprendido entre los meses de julio a diciembre de 2024, con el propósito de caracterizar los niveles de contaminación atmosférica bajo las condiciones ambientales predominantes, considerando jornadas de medición no consecutivas para asegurar la representatividad de los registros obtenidos.

3.3.2. Diseño del monitoreo

Parámetro monitoreado. El contaminante seleccionado fue PM_{10} , siguiendo los lineamientos del protocolo, que permite elegir uno o más contaminantes en función del objetivo del estudio, la elección se basó en su capacidad de penetración respiratoria, su prevalencia en zonas urbanas y su relación directa con las fuentes móviles y fijas de emisión.

Ubicación de puntos de monitoreo. Se establecieron cinco puntos de muestreo, georreferenciados y codificados como P1, P2, P3, P4 y P5 como se muestra en la figura 3, la selección se realizó considerando:

- Áreas de alta densidad poblacional.
- Proximidad a avenidas con tránsito vehicular elevado.
- Cercanía a fuentes estacionarias de emisión.
- Condiciones representativas del entorno urbano.

Cada sitio fue evaluado previamente para asegurar condiciones adecuadas de instalación del equipo, como accesibilidad, seguridad, y ausencia de obstáculos que interfieran con la captación de muestras.

Frecuencia y duración. En cada punto de monitoreo se ejecutaron dos campañas en fechas no consecutivas por temporada (12 repeticiones en total). Cada jornada de muestreo tuvo una duración de 18 horas continuas, iniciando a las 4:00 a. m. y finalizando a las 10:00 p. m.

Tabla 3

Frecuencia y duración del monitoreo de PM_{10}

Característica	Descripción
Periodo de monitoreo	Septiembre – diciembre
Número de puntos	5
Número de campañas por punto	2
Total de mediciones	12
Duración por jornada	18 horas continuas
Horario de monitoreo	4:00 a. m. – 10:00 p. m.
Tipo de fechas	No consecutivas

Tabla 4

Frecuencia y periodos de monitoreo

Tipo de tecnología	Tipo de monitoreo	Periodo a promediar (en base al ECA)	Mínima suficiencia de información válida requerida	Frecuencia mínima por muestra o registro
Automática	Continuo	1 hora	> 75% (45 minutos)	Continua
		8 horas	> 75% (6 horas)	Continua
		24 horas	> 75% (18 horas)	Continua *
		Mensual	> 75% (23 días)	Continua
		Anual	> 75% (9 meses)	Continua

Fuente: (MINAM, 2019, p.15).

Nota: *Frecuencia utilizada en el presente trabajo de investigación

Durante cada jornada, se instaló el equipo de medición en el lugar seleccionado, respetando los criterios establecidos en el protocolo:

- Altura del cabezal de muestreo: entre 1.5 y 4 metros sobre el nivel del suelo.
- Separación horizontal mínima de obstáculos: 2.5 veces la diferencia de altura entre el obstáculo y el equipo.
- Distancia mínima respecto a fuentes de emisión directa: 20 metros.
- Asegurar flujo libre de aire en al menos tres cuadrantes.

Previo al inicio del monitoreo, se verificó el estado operativo del equipo, se calibró según las instrucciones del fabricante, y se registraron las condiciones climáticas. Al finalizar cada jornada, se retiró el equipo y se almacenaron los datos registrados.

En la tabla 5 se presenta los datos meteorológicos del área de estudio durante el periodo de setiembre a diciembre, basada en los registros del SENAMHI.

Tabla 5

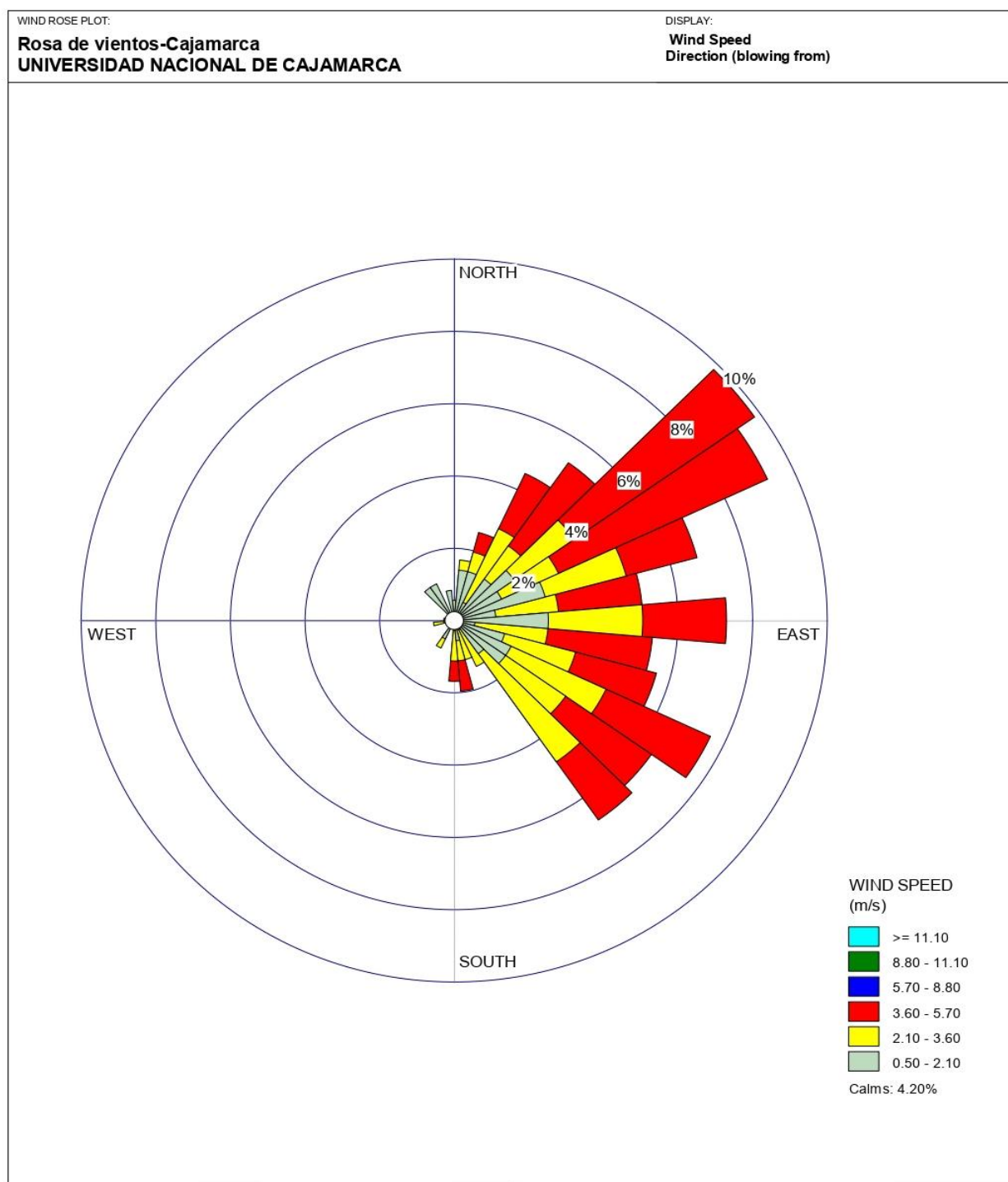
Temperatura máxima, mínima y precipitación de la ciudad de Cajamarca en el periodo estudiado

Fecha	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C	Precipitación (mm/día)
Septiembre	18	6.5	0.96
Octubre	18.6	6.8	1.82
Noviembre	18.2	7	2.20
Diciembre	17	7.2	2.52

Nota: Datos meteorológicos obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI (2024).

Figura 3

Rosa de vientos de la ciudad de Cajamarca del periodo setiembre -diciembre del 2024



El análisis de la rosa de vientos (figura3) para la ciudad de Cajamarca
(Estación UNC Cajamarca) evidencia un régimen de circulación atmosférica con

predominio marcado del cuadrante Este–Sureste (E–SE), alcanzando frecuencias máximas cercanas al 10 % por sector direccional. La velocidad media registrada fue de 2.79 m/s, con predominancia de los intervalos 2.10–3.60 m/s y 3.60–5.70 m/s, lo que caracteriza un régimen de vientos débil a moderado, típico de sistemas interandinos condicionados por topografía compleja. El bajo porcentaje de calmas (4.20 %) indica que la atmósfera presentó circulación activa durante la mayor parte del periodo evaluado, favoreciendo procesos de dispersión horizontal. La concentración direccional hacia el E–SE sugiere un patrón de transporte preferencial de masas de aire hacia el cuadrante occidental de la ciudad, probablemente asociado a circulaciones locales montaña–valle y gradientes térmicos regionales.

En cuanto a las variables meteorológicas complementarias (tabla 5), los registros de temperatura y precipitación proporcionados por SENAMHI (2024) muestran máximas entre 17 y 18.6 °C y mínimas entre 6.5 y 7.2 °C, reflejando la estabilidad térmica característica del clima templado frío de montaña propio de Cajamarca (~2750 m s.n.m.). Se observa además un incremento progresivo de la precipitación media diaria desde 0.96 mm en septiembre hasta 2.52 mm en diciembre, indicando la transición hacia la temporada húmeda. Este aumento pluviométrico tiene implicancias atmosféricas relevantes, como mayor humedad relativa, incremento de nubosidad y fortalecimiento de procesos de remoción húmeda (scavenging), lo cual puede influir en la dinámica de dispersión y deposición de contaminantes atmosféricos. En conjunto, las condiciones observadas describen un sistema atmosférico relativamente estable, con circulación predominante definida y transición estacional hacia condiciones más húmedas.

3.3.3. Método de medición

Técnica empleada. Se utilizó un equipo automático basado en el método equivalente por dispersión de luz, aprobado por el protocolo nacional como técnica válida para la medición de PM_{10} , esta tecnología permite la recolección de datos en tiempo real, facilitando el análisis continuo de concentraciones horarias (Cárdenas et al., 2005).

Principio de funcionamiento. El equipo emplea un haz de luz que se proyecta sobre el flujo de aire que contiene partículas, la luz dispersada por las partículas es captada por sensores ópticos, cuya señal es procesada electrónicamente para obtener valores de concentración, expresados en microgramos por metro cúbico ($\mu g/m^3$). Durante la operación en campo, se realizó el registro en hoja de campo, Fecha y hora de inicio y fin del monitoreo, observaciones sobre fuentes próximas, movimiento vehicular y otros factores incidentes.

Figura 4

Instalación el equipo de medición en el lugar seleccionado



3.3.4. Procesamiento y análisis de datos

Los datos obtenidos de las cinco estaciones de monitoreo fueron sistematizados en hojas de cálculo y sometidos a procesamiento estadístico. Se aplicó un análisis descriptivo que incluyó frecuencias, medias, valores máximos y mínimos, diferenciados por punto de monitoreo y temporada (seca y de lluvias).

Posteriormente, los resultados fueron contrastados con los límites establecidos en los ECAs para aire, según el Decreto Supremo N.º 003-2017-MINAM, así como con los rangos definidos por el Índice Nacional de Calidad del Aire (INCA), a fin de evaluar el cumplimiento normativo y la condición ambiental del área de estudio.

Asimismo, se aplicó un análisis de varianza de dos vías (ANOVA de dos factores) para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de PM_{10} entre los distintos puntos de monitoreo, entre las temporadas evaluadas, y para identificar posibles interacciones entre estos dos factores.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Concentración del material particulado (PM₁₀) durante los meses de septiembre a diciembre

La Tabla 6 muestra las concentraciones promedio diarias de PM₁₀ en cinco estaciones de monitoreo durante el periodo septiembre–diciembre, a partir de mediciones de 18 horas continuas, con tres monitoreos por estación cada mes (ver Anexo 1).

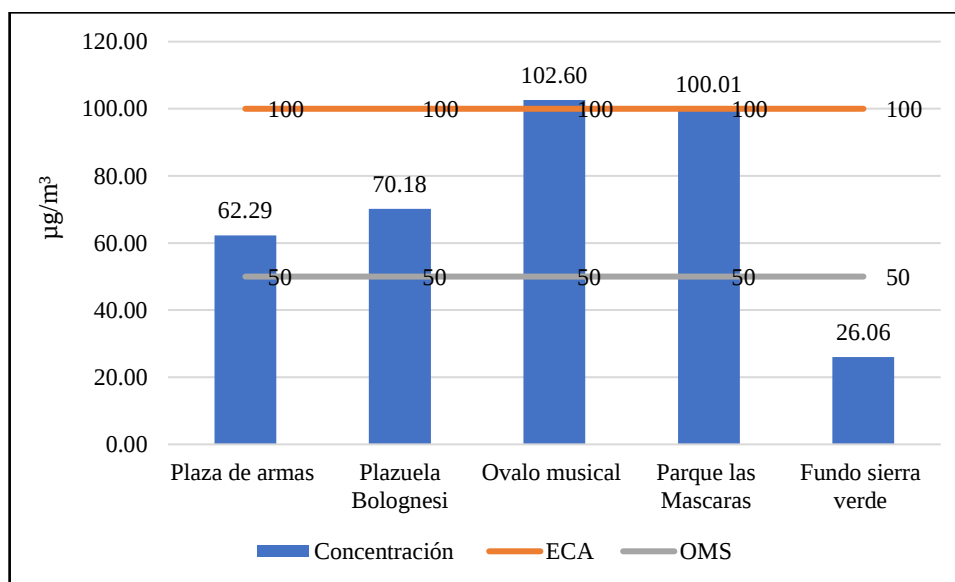
Tabla 6

Concentración promedio diaria de PM₁₀ en cinco estaciones de monitoreo

Fecha	Plaza de armas	Plazuela Bolognesi	Ovalo musical	Parque las Mascaras	Fundo sierra verde
Septiembre	66.22	71.27	106.22	104.05	28.77
	64.44	72.88	109.94	105.5	27.5
	64.55	76.72	110.05	103.61	25.33
Octubre	62.94	71.77	105.33	103.94	25.94
	63.94	75.11	99.33	98.88	28
	54.83	75.72	106.44	101.16	28.33
Noviembre	67.5	73.94	100.5	101.38	27.94
	64	69.61	103	99.72	28.94
	65.83	70.61	104.88	100.83	28.05
Diciembre	58.94	65.61	92.05	91.44	22.99
	57.66	61.05	101.38	97	21.44
	56.66	57.88	92.05	92.61	19.5
Promedio	62.29	70.18	102.60	100.01	26.06

Figura 5

Concentración de PM_{10} ($\mu g/m^3$) en los puntos de muestreo



La Figura 5 muestra los resultados correspondientes a la concentración promedio de material particulado PM_{10} en los puntos de monitoreo seleccionados en la ciudad de Cajamarca durante el periodo muestreado en el año 2024. Los resultados evidencian una variación espacial significativa entre los sitios evaluados, la cual se encuentra estrechamente relacionada con la intensidad del tránsito vehicular, el tipo de infraestructura vial, la densidad de actividades urbanas y las características del entorno inmediato de cada punto de monitoreo. Esta variabilidad espacial también se encuentra modulada por las condiciones meteorológicas predominantes durante el periodo de evaluación, particularmente por el régimen de vientos y la transición progresiva hacia condiciones más húmedas, factores que influyen directamente en los procesos de dispersión, transporte y deposición del material particulado.

El Óvalo Musical registró la mayor concentración promedio de PM_{10} durante el periodo muestreado, con un valor de $102.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, superando el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) establecido por el MINAM ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$). De manera similar, el Parque Las Máscaras presentó una concentración promedio de $100.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$, situándose prácticamente en el límite del ECA. Estos valores elevados pueden atribuirse a la elevada carga vehicular que caracteriza a estas zonas, las cuales funcionan como ejes de circulación y puntos de confluencia del tránsito urbano. Aunque las vías en estos sectores están constituidas mayoritariamente por pistas de concreto, la circulación constante de vehículos genera procesos de resuspensión de partículas finas acumuladas en la superficie vial, producto del desgaste de neumáticos, fricción con la calzada y deposición previa de sedimentos urbanos. Bajo un régimen de vientos predominante del cuadrante Este–Sureste y velocidades medias cercanas a 2.79 m/s (figura 3), estas partículas pueden mantenerse en suspensión y ser redistribuidas dentro del entorno urbano, favoreciendo la persistencia de concentraciones elevadas durante el periodo evaluado.

En el caso de la Plazuela Bolognesi y la Plaza de Armas, las concentraciones promedio de PM_{10} registradas durante el periodo muestreado fueron de $70.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $62.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Si bien estos valores no superan el ECA nacional, sí exceden el valor guía recomendado por la Organización Mundial de la Salud ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), lo que evidencia que incluso en zonas céntricas con infraestructura urbana consolidada y pistas de concreto, la calidad del aire puede verse comprometida por la alta afluencia vehicular y peatonal. En estos sectores, además de las emisiones locales, el transporte horizontal asociado al patrón direccional del viento puede contribuir a la acumulación temporal de partículas provenientes de áreas con mayor intensidad vehicular. Esta situación resulta

relevante desde el punto de vista de la salud pública, ya que la exposición crónica a concentraciones de PM_{10} por encima de los valores recomendados puede incrementarse en periodos de estabilidad atmosférica relativa, frecuentes en entornos interandinos durante determinadas horas del día.

Por otro lado, el Fundo Sierra Verde presentó la menor concentración promedio de PM_{10} durante todo el periodo muestreado, con un valor de $26.06 \mu g/m^3$, ubicándose ampliamente por debajo tanto del ECA nacional como del valor guía de la OMS. Este comportamiento se explica por la menor densidad vehicular, la limitada actividad urbana y la mayor presencia de áreas abiertas y cobertura vegetal, condiciones que favorecen la deposición de partículas y reducen los procesos de generación y resuspensión de material particulado en el ambiente. A ello se suma el incremento progresivo de la precipitación registrado entre septiembre y diciembre (0.96 a 2.52 mm/día), el cual contribuye a la remoción húmeda de partículas atmosféricas y limita su permanencia en suspensión, especialmente en sectores con menor presión antrópica.

Los resultados obtenidos guardan concordancia con lo reportado por Gutiérrez Ataballo (2020), quien identificó concentraciones de PM_{10} entre 36 y $150 \mu g/m^3$ en zonas urbanas caracterizadas por tránsito intenso, obras públicas y vías con alta carga de sedimentos. Aunque en Cajamarca las pistas son predominantemente de concreto, la acumulación de polvo urbano y residuos finos sobre la superficie vial, sumada al flujo constante de vehículos y a condiciones de viento que favorecen la resuspensión y el transporte, puede generar niveles de PM_{10} comparables a los descritos por el autor, especialmente en intersecciones viales y zonas de alta congestión como el Óvalo Musical y el Parque Las Máscaras.

De igual manera, Zafra et al. (2019) señalaron que la presencia de áreas verdes y espacios abiertos contribuye a la reducción de la concentración de material particulado, al actuar como superficies de captura y deposición de partículas. Este planteamiento permite explicar los bajos valores observados en el Fundo Sierra Verde, donde predominan áreas con vegetación natural y menor intervención antrópica, en contraste con los sectores céntricos de la ciudad, donde la cobertura vegetal es limitada y la dinámica urbana favorece la acumulación de contaminantes atmosféricos.

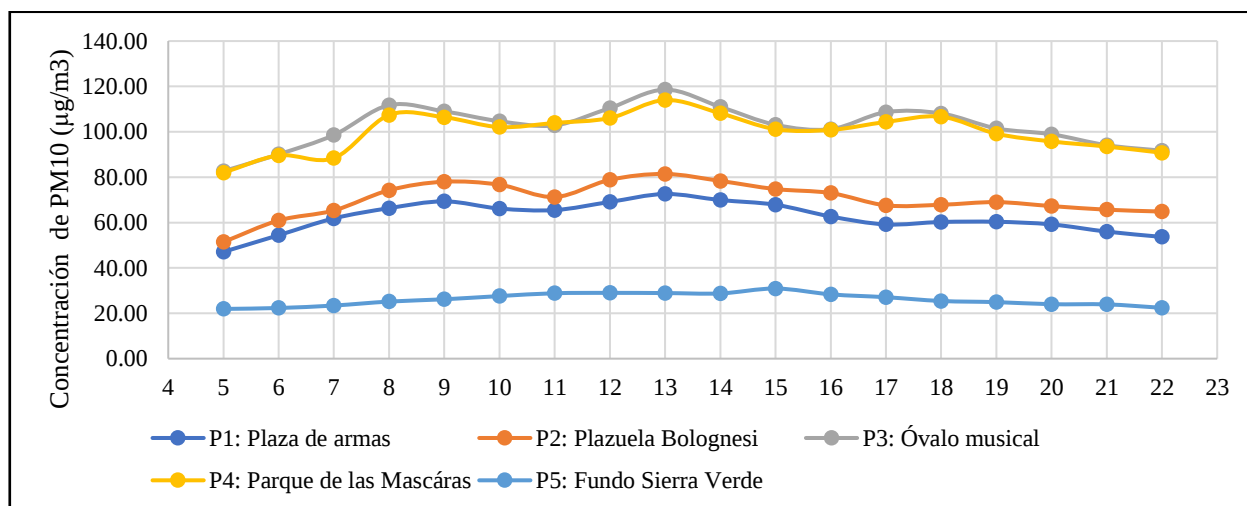
Asimismo, Barrantes Flores (2021) reportó concentraciones de PM_{10} de hasta $92 \mu g/m^3$ en zonas urbanas de la ciudad de Huancayo, asociadas principalmente al tránsito vehicular y a la intensidad de las actividades urbanas, resultados que resultan comparables con los valores registrados en la Plazuela Bolognesi y la Plaza de Armas de Cajamarca durante el periodo muestreado. Esto refuerza la evidencia de que el tránsito vehicular constituye una de las principales fuentes de emisión de material particulado en ciudades intermedias del país, independientemente del tipo de pavimento predominante, siendo su impacto modulable por las condiciones atmosféricas locales.

Finalmente, Cahuantico Salas (2019) evidenció que en distritos urbanos la combinación de transporte vehicular, actividades comerciales y emisiones domésticas puede generar incrementos significativos en las concentraciones de PM_{10} , mientras que Arrieta Fuentes (2016) reportó valores entre 22.97 y $55.62 \mu g/m^3$ en zonas con menor intensidad urbana, asociados principalmente al tránsito de vehículos pesados y al manejo de materiales. La similitud de estos rangos con los valores obtenidos en el Fundo Sierra Verde refuerza la conclusión de que una menor intervención humana, junto con características naturales del entorno y condiciones meteorológicas que favorecen la deposición y remoción de partículas,

permite mantener concentraciones reducidas de PM_{10} durante el periodo muestreado, en comparación con las zonas de mayor actividad urbana de la ciudad de Cajamarca.

Figura 6

Concentración horaria de PM_{10} en la época de muestreo por punto



La Figura 6 muestra el análisis de la concentración horaria promedio de material particulado PM_{10} durante el periodo muestreado en la ciudad de Cajamarca, evidenciando un comportamiento claramente influenciado por la dinámica de las actividades humanas a lo largo del día y por las condiciones atmosféricas propias del entorno urbano interandino. Desde las primeras horas de la mañana, específicamente a partir de las 5:00 h, se observa el inicio de un incremento progresivo de las concentraciones en todos los puntos de monitoreo, siendo más notorio en aquellos ubicados en zonas de mayor tránsito vehicular, como el Óvalo Musical (P3) y el Parque de las Máscaras (P4). Este incremento matutino coincide con condiciones típicas de estabilidad atmosférica parcial y menor altura de la capa límite en horas tempranas, lo que reduce la dispersión vertical y favorece la acumulación inicial de contaminantes.

Entre las 6:00 h y 8:00 h, las concentraciones de PM_{10} aumentan de manera sostenida, coincidiendo con el inicio de la jornada laboral y el incremento del flujo

vehicular. En este intervalo horario, el punto P3 pasó de $90.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 6:00 h a $111.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 8:00 h, mientras que el punto P4 alcanzó valores similares, incrementándose de $89.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $107.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este comportamiento coincide con lo reportado por Zafra et al. (2019), quienes señalan que las concentraciones de PM_{10} tienden a incrementarse desde las primeras horas de la mañana, alcanzando picos durante las horas de mayor congestión vehicular, debido a la intensificación del tránsito y a los procesos de resuspensión de partículas sobre la superficie vial. Bajo un régimen de vientos predominante del cuadrante Este–Sureste y velocidades medias del orden de 2–3 m/s, la turbulencia mecánica inducida por el tránsito puede favorecer la resuspensión y el transporte horizontal de partículas dentro del valle urbano, contribuyendo al incremento sostenido observado en estos puntos.

El periodo comprendido entre las 9:00 h y 13:00 h concentra los valores más elevados de PM_{10} en el estudio realizado, configurándose como el intervalo de mayor exposición potencial. En este rango horario, el Óvalo Musical (P3) alcanzó su máximo promedio horario a las 13:00 h con $118.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$, superando el Estándar de Calidad Ambiental del MINAM, mientras que el Parque de las Máscaras (P4) registró $114.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la misma hora. Estos valores elevados reflejan la persistencia de emisiones asociadas al tránsito vehicular continuo, la circulación a baja velocidad y la resuspensión de partículas finas sobre pistas de concreto, donde el desgaste de neumáticos y la acumulación de sedimentos urbanos contribuyen significativamente a la carga de PM_{10} en el aire. Además, aunque durante el mediodía la capa límite atmosférica tiende a incrementarse por calentamiento superficial, la continuidad de las emisiones y el patrón direccional del viento pueden mantener niveles elevados en sectores ubicados a sotavento respecto de las principales vías de circulación.

En contraste, los puntos ubicados en zonas de menor intensidad vehicular, como la Plaza de Armas (P1) y la Plazuela Bolognesi (P2), presentaron concentraciones moderadas durante este mismo intervalo, con valores máximos de $72.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $81.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, a las 13:00 h. Si bien estos valores no superan el ECA nacional, sí exceden el valor guía recomendado por la Organización Mundial de la Salud, lo que indica que incluso en áreas céntricas con infraestructura urbana consolidada, la exposición al material particulado puede representar un riesgo para la salud, especialmente durante las horas de mayor actividad urbana. En estos sectores, las concentraciones observadas pueden explicarse por la combinación de emisiones locales y aporte advectivo desde zonas con mayor carga vehicular, condicionado por la dirección predominante del flujo atmosférico dentro del valle.

El comportamiento observado durante las horas centrales del día guarda relación con lo señalado por Gutiérrez Ataballo (2020), quien reportó concentraciones elevadas de PM_{10} en horarios laborales clave, asociadas al incremento del parque automotor y a la actividad urbana intensa. De manera similar, Camacho y Villegas (2017) explican que la baja velocidad del viento y la alta densidad de actividades humanas en zonas urbanas generan condiciones propicias para la acumulación de material particulado, lo que contribuye a la persistencia de concentraciones elevadas durante varias horas consecutivas del día, especialmente cuando la dispersión horizontal no es suficientemente eficiente para diluir las emisiones generadas de forma continua.

A partir de las 14:00 h, en todos los puntos de monitoreo se observa una disminución gradual de las concentraciones horarias de PM_{10} , tendencia que se mantiene de forma sostenida hasta las 22:00 h. En el punto P3, las concentraciones descendieron de $118.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 13:00 h a $91.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 22:00 h, mientras que en el punto P4 la reducción

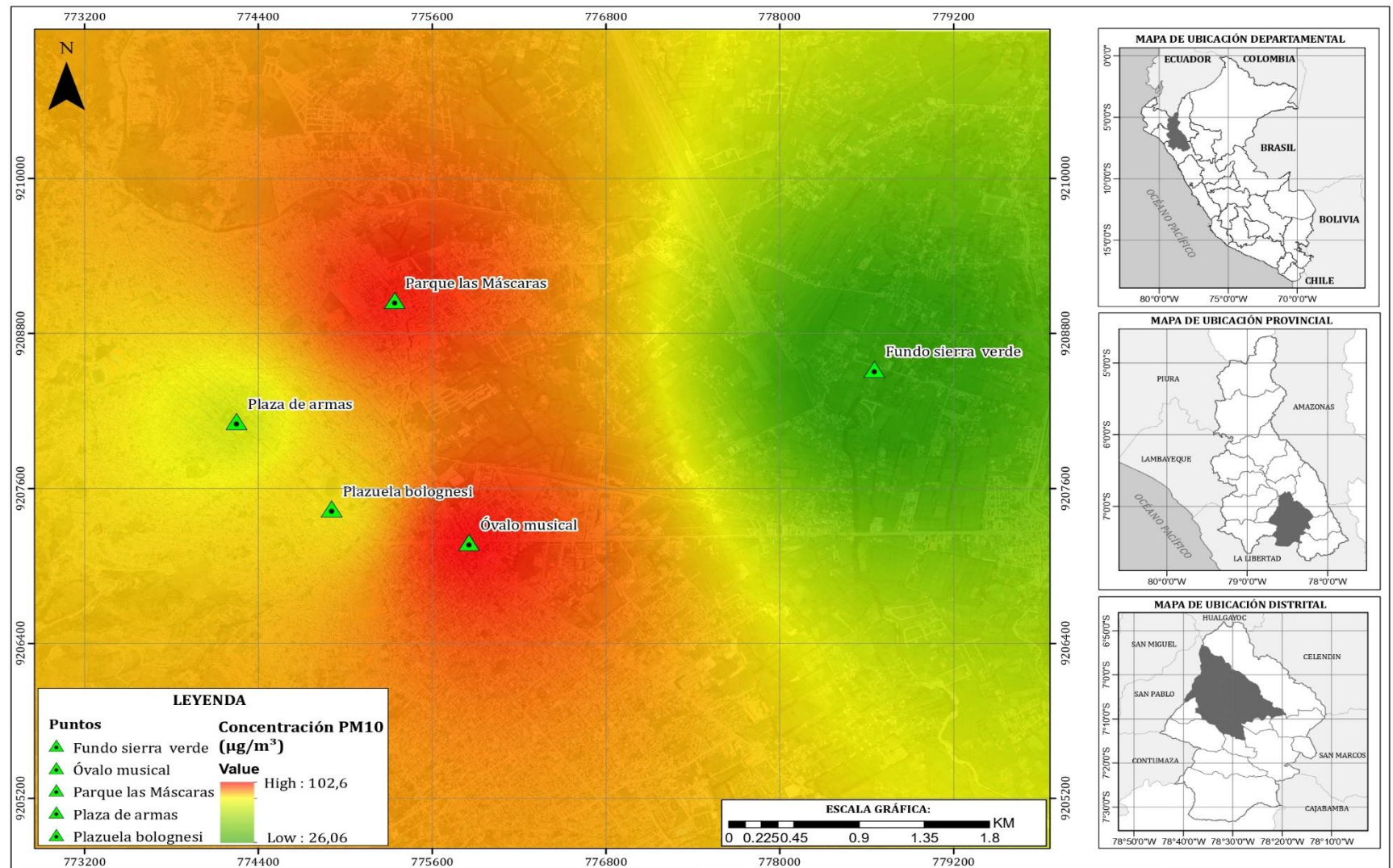
fue de $114.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $90.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mismo intervalo. Esta disminución progresiva puede explicarse por la reducción del flujo vehicular en horas vespertinas y nocturnas, así como por cambios en las condiciones meteorológicas que favorecen la dispersión de contaminantes, incluyendo una menor intensidad de actividades emisoras y variaciones en la dinámica local del viento que contribuyen a la dilución de las concentraciones acumuladas durante el periodo de mayor actividad.

El punto P5 (Fundo Sierra Verde) presentó durante todo el periodo muestreado las concentraciones horarias más bajas, con valores que oscilaron entre $21.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 5:00 h y $30.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 15:00 h, manteniéndose ampliamente por debajo del ECA y del valor guía de la OMS. Este comportamiento responde a la baja densidad vehicular, la ausencia de fuentes emisoras significativas y la presencia de áreas abiertas y cobertura vegetal, factores que favorecen la deposición y dispersión del material particulado, tal como lo señalan Zafra et al. (2019) y Arrieta Fuentes (2016) en estudios realizados en entornos con características similares. Asimismo, la menor presión antrópica, combinada con procesos de ventilación natural y eventual remoción por precipitación durante el periodo de transición hacia la temporada húmeda, contribuye a mantener concentraciones reducidas en este sector.

Asimismo, Suárez et al. (2017) reportaron concentraciones promedio de PM_{10} de $64.54 \pm 30.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en zonas urbanas de Huancayo, con picos horarios asociados a áreas de intenso tránsito, resultados que son comparables con los valores registrados en los puntos P3 y P4 del presente estudio. Esta similitud refuerza la evidencia de que el tránsito vehicular constituye la principal fuente de generación de PM_{10} en ciudades intermedias, independientemente del tipo de pavimento, dado que incluso las pistas de concreto pueden actuar como superficies de resuspensión de partículas finas acumuladas.

Figura 7

Mapa de calor de la distribución del PM₁₀



La Figura 7 correspondiente al mapa de calor de concentración promedio de PM_{10} en la ciudad de Cajamarca evidencia un patrón espacial claramente diferenciado, con un gradiente definido de mayores concentraciones en el sector centro-sur hacia valores progresivamente menores en dirección este. La distribución cromática con tonalidades rojas y anaranjadas concentradas principalmente en torno al Óvalo Musical y el Parque Las Máscaras, indica la presencia de núcleos de acumulación de material particulado asociados a zonas de alta dinámica vehicular y convergencia vial. Estos puntos funcionan como focos emisores dominantes dentro de la estructura urbana, generando isoconcentraciones elevadas que se expanden hacia áreas adyacentes bajo la influencia de las condiciones meteorológicas locales.

El Óvalo Musical se configura como el principal hotspot de contaminación, con valores que superan los $100 \mu g/m^3$, formando un núcleo de máxima intensidad que se dispersa radialmente. De manera similar, el entorno del Parque Las Máscaras presenta un segundo núcleo de alta concentración, aunque con menor extensión espacial. La proximidad de estos puntos a ejes viales estructurantes y a zonas de alta densidad urbana favorece procesos continuos de emisión primaria (escape vehicular, desgaste de frenos y neumáticos) y secundaria (resuspensión de polvo sedimentado), lo que explica la persistencia de concentraciones elevadas en estos sectores.

En contraste, el mapa muestra una transición gradual hacia tonalidades amarillas y verdes conforme se avanza hacia el sector este, donde se ubica el Fundo Sierra Verde. Este gradiente espacial sugiere un efecto de dispersión y dilución atmosférica coherente con la dirección predominante de los vientos registrada en la rosa de vientos (Figura 3), la cual indica flujos dominantes que favorecen el transporte de contaminantes desde el núcleo

urbano hacia zonas periféricas. Sin embargo, pese a la posible advección de partículas, las concentraciones en el Fundo Sierra Verde permanecen bajas ($\approx 26 \mu\text{g}/\text{m}^3$), lo que evidencia la influencia de factores atenuantes como menor densidad de fuentes emisoras, mayor cobertura vegetal y presencia de espacios abiertos que actúan como sumideros de partículas mediante deposición seca.

La Plaza de Armas y la Plazuela Bolognesi muestran concentraciones intermedias, evidenciando su condición de zonas receptoras influenciadas por emisiones locales y por el transporte desde los focos principales. Este patrón refleja una dispersión anisotrópica condicionada por la morfología urbana, la velocidad y dirección del viento, y la topografía del valle de Cajamarca, factores que regulan la acumulación o dispersión del PM_{10} .

Desde una perspectiva técnico-ambiental, el mapa de calor confirma la relación directa entre la intensidad vehicular y la concentración de PM_{10} , así como la influencia conjunta de las fuentes antrópicas y las variables meteorológicas en su distribución espacial. La presencia de máximos localizados y un gradiente definido evidencia zonas críticas de exposición que requieren una gestión focalizada del tránsito, control de emisiones y fortalecimiento de áreas verdes para mejorar la dispersión y captura de contaminantes.

Tabla 7

Análisis de varianza (ANOVA) para la concentración de PM_{10} según estación de monitoreo

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	47141.5006	4	11785.3752	504.450287	1.2538E-42	2.53968863
Dentro de los grupos	1284.95443	55	23.3628079			
Total	48426.455	59				

Coefficiente de variabilidad: 7%

La Tabla 7 presenta los resultados del análisis de varianza de una vía (ANOVA) realizado con la finalidad de evaluar la existencia de diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de material particulado PM_{10} entre los distintos puntos de monitoreo evaluados durante el periodo muestreado. Este análisis permitió determinar si la localización espacial de los puntos de medición influye de manera significativa en los niveles registrados de PM_{10} , considerando que todos los datos corresponden a un mismo periodo de evaluación.

Los resultados evidencian que el valor de F calculado (504.45) es ampliamente superior al valor crítico de F (2.54), con una probabilidad asociada extremadamente baja ($p = 1.25 \times 10^{-42}$). Este resultado confirma la existencia de diferencias altamente significativas entre las concentraciones promedio de PM_{10} registradas en los distintos puntos de monitoreo, lo que demuestra que la ubicación geográfica y las características del entorno urbano desempeñan un papel determinante en la variabilidad espacial del contaminante.

La elevada magnitud del estadístico F refleja una marcada heterogeneidad entre los grupos analizados, atribuible principalmente a factores como la intensidad del tránsito vehicular, la cercanía a fuentes móviles y fijas de emisión, el uso del suelo y las condiciones físicas del entorno inmediato de cada punto de monitoreo. En este sentido, los puntos ubicados en zonas de alto flujo vehicular presentan concentraciones significativamente mayores en comparación con aquellos situados en áreas con menor intervención antrópica, lo que coincide con lo observado en el análisis descriptivo de los resultados.

Por otro lado, la suma de cuadrados entre grupos (47 141.50) representa la mayor proporción de la variabilidad total, en contraste con la suma de cuadrados dentro de los grupos (1 284.95), lo que indica que la mayor parte de la variación de las concentraciones de

PM₁₀ se explica por las diferencias entre los puntos de monitoreo y no por la variabilidad interna de los datos en cada punto. Este comportamiento refuerza la validez del diseño del muestreo y la adecuada selección de los sitios de medición.

El coeficiente de variación (CV) obtenido fue de 7 %, lo cual indica una baja dispersión de los datos respecto a la media general. Este valor sugiere que las concentraciones de PM₁₀ presentan una variabilidad relativamente reducida dentro de cada punto de monitoreo, lo que confirma que la media aritmética es representativa del conjunto de datos analizados y que las mediciones realizadas son consistentes y confiables.

4.2. Índice de Calidad del Aire (INCA) Respecto a la Concentración del Material

Particulado (PM₁₀) en el Aire de la Ciudad de Cajamarca

Tabla 8

Índice de calidad del aire INCA en las estaciones de muestreo

Estación de muestreo	Periodo de muestreo		
	PM ₁₀ (µg/m ³)	INCA = PM ₁₀ × 100 / 150	Categoría INCA
Plaza de Armas	62.82	41.52	Buena
Plazuela Bolognesi	73.91	46.78	Buena
Óvalo Musical	106.22	68.39	Moderada
Parque Las Máscaras	102.86	66.67	Moderada
Fundo Sierra Verde	27.31	17.37	Buena

La Tabla 7 presenta los resultados del Índice Nacional de Calidad del Aire (INCA) para PM₁₀ correspondientes al periodo de muestreo, evidenciando un comportamiento diferenciado entre las estaciones evaluadas. Los puntos ubicados en zonas de mayor actividad urbana, como el Óvalo Musical y el Parque Las Máscaras, registraron valores de

INCA de 68.39 y 66.67, respectivamente, clasificándose dentro de la categoría “Moderada”, lo que indica una mayor exposición de la población a concentraciones elevadas de PM_{10} . En contraste, las estaciones Plaza de Armas, Plazuela Bolognesi y Fundo Sierra Verde presentaron valores de INCA de 41.52, 46.78 y 17.37, ubicándose en la categoría “Buena”, lo que refleja condiciones de calidad del aire más favorables en estos sectores.

Las diferencias observadas entre estaciones se encuentran estrechamente asociadas a factores urbanos como la intensidad del tránsito vehicular, la densidad de actividades comerciales y la resuspensión de polvo generada por el tránsito sobre superficies rígidas de concreto, condiciones que favorecen la permanencia del material particulado en el aire. Estos resultados son consistentes con los patrones horarios previamente analizados, donde se identificaron concentraciones máximas de PM_{10} durante las horas de mayor actividad vehicular, particularmente alrededor del mediodía, lo que refuerza la relación directa entre las fuentes antrópicas y la degradación de la calidad del aire en zonas céntricas.

Si bien los valores de INCA registrados no superan los límites establecidos por la normativa nacional, la clasificación “Moderada” alcanzada en estaciones como el Óvalo Musical y el Parque Las Máscaras implica una exposición continua que puede representar un riesgo potencial para grupos poblacionales sensibles. En este sentido, Robles et al. (2019) señalan que existe una relación significativa entre concentraciones elevadas de PM_{10} y la incidencia de afecciones respiratorias, lo que otorga sustento científico a la relevancia de los resultados obtenidos.

La persistencia de valores de INCA superiores a 65 en determinadas zonas urbanas sugiere la presencia de una carga crónica de partículas en suspensión, asociada a la limitada dispersión atmosférica y a las características morfológicas del entorno urbano, las cuales

dificultan la ventilación natural. Este comportamiento ha sido reportado por Zafra et al. (2019), quienes evidenciaron que los sectores urbanos con alta densidad vehicular tienden a mantener concentraciones elevadas y sostenidas de PM_{10} , aun cuando no se superan los estándares normativos, contribuyendo a una calidad del aire menos favorable para la población expuesta.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Las mayores concentraciones promedio de PM_{10} se registraron en el Óvalo Musical ($102.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el Parque Las Máscaras ($100.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$), valores que superan o alcanzan el Estándar de Calidad Ambiental (ECA = $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$). La Plazuela Bolognesi ($70.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y la Plaza de Armas ($62.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$) presentaron concentraciones inferiores al ECA, pero superiores al valor guía de la OMS ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). El Fundo Sierra Verde ($26.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$) registró la menor concentración, manteniéndose muy por debajo de los límites normativos.
- En la evaluación del Índice Nacional de Calidad del Aire (INCA) en función de la concentración de PM_{10} , se determinó que las estaciones Plaza de Armas (INCA = 41.52), Plazuela Bolognesi (INCA = 46.78) y Fundo Sierra Verde (INCA = 17.37) presentaron una calidad del aire clasificada como Buena. En contraste, las estaciones Óvalo Musical (INCA = 68.39) y Parque Las Máscaras (INCA = 66.67) alcanzaron la

categoría Moderada, lo que evidencia una mayor carga de material particulado en estos sectores urbanos.

5.2. Recomendaciones

- Realizar monitoreos de PM_{10} en distintos periodos del año para evaluar la variabilidad de las concentraciones según las condiciones meteorológicas.
- Ejecutar monitoreos continuos durante todo el día, enfocándose en los horarios de mayor tránsito vehicular para identificar picos de concentración y orientar estrategias de reducción de exposición.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS

- Alvarado, R. R., Montiel, J. P., & Deluque, J. (2011). *Análisis comparativo de las mediciones de material particulado $PM^{sub} 10^{/}$* Comparative analysis of $PM^{sub} 10^{/}$ particulate matter. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia; Medellín*(58), 27-35.
https://www.proquest.com/docview/1612426611?utm_source=chatgpt.com&sourcetype=Scholarly%20Journals
- Álvarez, D., & Suárez, L. (2021). *Aporte cuantitativo de las fuentes de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en sitios urbanos del valle del Mantaro, Perú*. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(4). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992020000400875
- Anderson, J. O., Thundiyil, J. G., & Stolbach, A. (2011). *Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health*. *J Med Toxicol*, 8(2), 166–175. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3550231/>
- Angeles, J. M., Chavarría, E. Y., Huamani, L. L., Angeles, R., Lavado, C., & Cusiche, M. L. (2024). *Efecto del material particulado y humedad de suelo en Huancayo y*

Pampas/Perú. ALFA. Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias, 8(24), 1001 - 1012.

https://www.researchgate.net/publication/387206034_Efecto_del_material_particulado_y_humedad_de_suelo_en_Huancayo_y_PampasPeru/fulltext/6763ff0b2adc9f12e212592c/Efecto-del-material-particulado-y-humedad-de-suelo-en-Huancayo-y-Pampas-Peru.pdf?origin=scient

Angeles, R. J., Angeles, J., & Angeles, N. (2021). *Forzamiento radiativo directo debido a los aerosoles atmosféricos en Perú utilizando técnicas de sensoramiento remoto. TAYACAJA , 4(2), 159-163.*

Araujo Pulido, G. T. (2010). *Importancia del agua para el buen funcionamiento de nuestro organismo. Cuidando tu salud, 22.*
https://www.insp.mx/images/stories/INSP/Docs/cts/210131_cts2.pdf

Arciniégas Suárez, C. A. (2012). *Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10. Revista Luna Azul(34), 195-213.*
<https://www.redalyc.org/pdf/3217/321727348012.pdf>

Arrieta Fuentes, A. J. (2016). *Dispersión de material particulado (pm10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, 16(2), 43-54.*
https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/5445/4515

AyT. (s.f.). Sensor de partículas portátil (PM 2.5 / PM 10). <https://www.ayt.cl/catalogo-de-productos/monitores-de-material-particulado/continuos/monitores-ambientes-industriales-y-no-normativos/sensor-de-particulas-portatil-pm-2-5-pm-10/>

- Barrantes Flores, M. Á. (2021). Dispersión de material particulado (PM10 y PM2.5) en Huancayo Metropolitano, región Junín, 2020. *[Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/70050>
- Bertrán, C., Fernández, A., Fernández, E., Hernández, E., Panza, V., & Banús, M. d. (abril de 2010). *H2O Elixir de vida*. Elementalwatson "la" revista(1), 9. <http://www.elementalwatson.com.ar/Revista%201%20N%201b.pdf>
- Breuer, D. (1999). *Monitoring ambient air quality for health impact assessment*. WHO regional publications. European series(85).
- Brook, R. D., Rajagopalan, S., & Al-Kindi, S. (2024). *Public Health Relevance of US EPA Air Quality Index Activity Recommendations*. JAMA Netw Open, 7(4). <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11002695/>
- Cahuantico Salas, R. H. (2019). Evaluación de contaminantes atmosféricos CO, SO2, PM10, PM2.5 de la zona urbana del Cusco 2017. *[Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa]*. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/26aa5769-0abc-47ea-9f8d-cf5146b1de81/content>
- Camacho, M., & Villegas, J. E. (2017). Análisis de la relación entre el comportamiento del viento y la concentración de material particulado pm10 del año 2012 al 2015 en la atmósfera de la ciudad de Cajamarca. *[Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]*. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/10669>

- Cárdenas, M. A., Aguilar, R., Ramos, Y. D., Rodríguez, J. S., & Ruiz, S. (2025). *Implementación de un dispositivo IoT para la evaluación de la calidad del aire en interiores de autobuses*. Pistas Educativas , 149.
- Cruz, R., Domínguez, A., Estrada, L., Martínez, D., Witrago, M., & Violante, A. (2019). *Lo que debemos de saber sobre las partículas atmosféricas PM10*. XXVII Verano De la Ciencia , 16.
- Doria, C., & Fagundo, J. (2016). *Caracterización química de material particulado PM10 en la atmósfera de La Guajira, Colombia*. Revista Colombiana de Química, 45(2), 19-29.
<https://www.redalyc.org/journal/3090/309048472003/html/>
- Durand, J. A., & Burga, V. B. (2021). Evaluación del comportamiento de la concentración de PM10 y PM2.5 y su comparación con los estándares de calidad ambiental en la ciudad de Cajamarca en el período 2012 – 2018. [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/29205>
- Flood, J. A., Méndez, M. Á., & Pérez, E. J. (2019). *Sistema inmune respiratorio y consecuencias de contaminación aérea por materia particulada*. Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social, 57(3), 170-180.
<https://www.redalyc.org/journal/4577/457762231009/html/>
- García, G., & Rico, K. G. (2019). *Sensores de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire*. La ciencia no cesa, 13(27).
<https://epistemus.unison.mx/index.php/epistemus/article/view/108>
- Gavira, C., Benavides, P., & Tangarife, C. (2011). *Contaminación por material particulado (PM2,5 y PM10) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009)*.

Revista Facultad Nacional de Salud Pública, 29(3).

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-386X2011000300004

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*. Sci Total Environ. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39393695/>

Koçak, M., Mihalopoulos, N., & Kubilay, N. (2007). *Contributions of natural sources to high PM10 and PM2.5 events in the eastern Mediterranean*. Atmospheric Environment, 41(18), 3806-3818. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231007000714>

Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). *Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review*. Front Public Health, 8(14). <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7044178/>

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2016). Índice de Calidad del Aire. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/RM-N%C2%B0-181-2016-MINAM.pdf>

Molaie, S., & Lino, P. (2021). *Review of the Newly Developed, Mobile Optical Sensors for Real-Time Measurement of the Atmospheric Particulate Matter Concentration*. Micromachines, 12(4), 416. <https://www.mdpi.com/2072-666X/12/4/416>

Newell, K., Kartsonaki, C., Lam, K. B., & Kurmi, O. P. (2017). *Cardiorespiratory health effects of particulate ambient air pollution exposure in low-income and middle-income countries: a systematic review and meta-analysis*. The Lancet Planetary Health, 1(9),

368-380. <https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196%2817%2930166-3/fulltext>

- Obeid Manjarres, K. R., & Ramírez Castro, A. J. (2018). Diseño de una trampa de grasas en la planta de tratamiento de aguas residuales e una planta planficadora ubicada en el departamento del Atlántico. [tesis de grado, Universidad de san Buenaventura]. *Repositorio Institucional, Catagena, Colombia*.
http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/6224/1/Dise%C3%B1o%20de%20trampa%20de%20grasas_Katherine%20Obeid%20M_2018.pdf
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2025). *Exposure & health impacts of air pollution*.
<https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-energy-and-health/health-impacts/exposure-air-pollution>
- Parker. (2024). Monitor de partículas portátil - iCount LaserCM | #LCM202022.
<https://ph.parker.com/us/es/icount-lasercm-portable-particle-counter/lcm202022>
- Robles, E. G., Medina, A. M., & Medina, 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://www.redalyc.org/journal/816/81661270010/html/>
- Roemer, W., Hoek, G., Brunekreef, B., Clench-Aas, J., Forsberg, F., Pekkanen, F., & Schutz, F. (2000). *PM10 elemental composition and acute respiratory health effects in European children (PEACE project)*. *Pollution Effects on Asthmatic Children in Europe*. *Eur Respir J.*, 15(3), 553-559. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10759452/>

- Ryalls, J. M., Bishop, J., Mofikoya, A. O., Bromfield, L. M., Nakagawa, S., & Girling, R. D. (2024). *Air pollution disproportionately impairs beneficial invertebrates: a meta-analysis*. *Nat Commun.*, 15(1), 5447. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38992007/>
- Sandoval, B., Reyes, T., & Oyarzún, M. (2019). *Mecanismos de los efectos nocivos para la salud de la contaminación atmosférica proveniente de incendios forestales*. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 35(1).
https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-73482019000100049
- Sangkham, S., Phairuang, W., Sherchan, S. P., Pansakun, N., Munkong, N., Sarndhong, K., . . . Sakunkoo, P. (2024). *An update on adverse health effects from exposure to PM2.5*. *Environmental Advances*, 18.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666765724001212>
- Schlesinger, W. H., & Bernhardt, E. S. (2020). *The Atmosphere*. *Biogeochemistry*, 51–97.
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7426726/>
- Schraufnagel, D. E. (2020). *The health effects of ultrafine particles*. *Exp Mol Med.*, 52(3), 311–317. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7156741/>
- Seesaard, T., Kamjornkittikoon, K., & Wongchoosuk, C. (2024). *A comprehensive review on advancements in sensors for air pollution applications*. *Science of The Total Environment*, 951(175696).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969724058522>
- Sonwani, S., & Saxena, P. (2016). *Identifying the Sources of Primary Air Pollutants and Environmental Health: A Review*. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, 6(2), 111-130.

https://www.researchgate.net/publication/355174250_Identifying_the_Sources_of_Primary_Air_Pollutants_and_Environmental_Health_A_Review

Stevens, C. J., Bell, J. N., Brimblecombe, P., Clark, C. M., Dise, N. B., Fowler, D., . . .

Wolseley, P. A. (2020). *The impact of air pollution on terrestrial managed and natural vegetation*. Phil. Trans. R. Soc.(378).

<https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rsta.2019.0317>

Suarez, L., Alvarez, D., Bendezu, Y., & Pomalaya, J. (2017). *Caracterización química del material particulado atmosférico del centro urbano de Huancayo, Perú*. Rev. Soc. Quím., 83(2), 187-199. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2017000200005&script=sci_abstract

Tong, Y., Mei-de, X., Zi-han, Y., & Tian-qing, Z. (2021). *Design of air quality monitoring system based on light scattering sensor*. Earth and Environmental Science, 647. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/647/1/012196/pdf>

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2024). *Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM)*. Last updated. <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>

Weinmayr, G., Romeo, E., De Sario, M., Weiland, S. K., & Forastiere, F. (2009). *Short-Term Effects of PM10 and NO2 on Respiratory Health among Children with Asthma or Asthma-like Symptoms: A Systematic Review and Meta-Analysis*. Environmental Health Perspectives, 118(4), 449 - 457. <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.0900844>

Yaoyu, H., Mengqiu, W., Yutong, L., & Xiangtong, L. (2022). *Influence of PM1 exposure on total and cause-specific respiratory diseases: a systematic review and meta-analysis*.

Environ Sci Pollut Res Int., 10, 15117-15126.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34628607/>

Zafra, C., Alarcón, J., & Echeverry, L. (2019). *Análisis de series de tiempo para concentraciones de PM10: influencia de la cobertura superficial urbana*. Scientia Et Technica, 24(1), 146-153. <https://www.redalyc.org/journal/849/84959429015/html/>

CAPÍTULO VII

ANEXOS

Anexo 1. Tablas de resultados por puntos de muestreo

TABLAS DE MONITOREO DE PM₁₀

Tabla 1. Monitoreo de PM₁₀ en la estación Plaza de Armas

Ubicación: Plaza de Armas
Coordenadas: Norte: 9208116.21 | Este: 774248.52
Altitud: 2744 m.s.n.m.

Hora	02/09	09/09	16/09	01/10	07/10	14/10	04/11	11/11	18/11	02/12	09/12	16/12
5:00 a.m.	50	47	52	45	49	45	52	47	52	40	44	42
6:00 a.m.	59	56	54	54	58	48	61	56	58	53	51	45
7:00 a.m.	65	68	68	60	64	51	67	62	67	59	59	52
8:00 a.m.	70	69	71	65	69	52	74	67	69	64	68	58
9:00 a.m.	74	72	70	71	72	55	77	71	75	66	65	64
10:00 a.m.	71	70	67	69	67	50	73	68	70	66	60	63
11:00 a.m.	67	66	65	67	65	59	70	64	69	63	66	65
12:00 p.m.	74	70	72	68	70	60	71	71	73	68	68	64
1:00 p.m.	78	75	75	73	74	62	77	76	77	71	65	68
2:00 p.m.	75	72	70	71	73	58	78	72	73	69	63	65
3:00 p.m.	70	71	77	67	66	55	73	70	72	66	60	67
4:00 p.m.	67	64	66	63	62	50	69	68	64	63	56	60
5:00 p.m.	60	61	61	63	60	54	61	61	62	55	52	60
6:00 p.m.	65	62	60	60	61	62	64	63	63	54	54	55
7:00 p.m.	68	66	61	62	65	59	68	66	60	52	50	47
8:00 p.m.	66	60	62	60	63	57	63	61	62	51	54	51
9:00 p.m.	58	55	59	59	59	54	60	57	59	50	53	49
10:00 p.m.	55	56	52	56	54	56	57	52	60	51	50	45

Nota: Concentraciones de PM₁₀ expresadas en µg/m³

Tabla 2. Monitoreo de PM₁₀ en la estación Fundo Sierra Verde**Ubicación:** Fundo Sierra Verde**Coordenadas:** Norte: 9208522.35 | Este: 778651.40**Altitud:** 2717 m.s.n.m.

Hora	06/09	13/09	20/09	05/10	11/10	18/10	08/11	15/11	22/11	06/12	13/12	20/12
5:00 a.m.	25	20	17	22	24	25	24	26	22	22	20	16
6:00 a.m.	22	25	21	24	24	27	23	25	25	20	18	14
7:00 a.m.	27	24	25	21	22	22	28	29	24	18	20	21
8:00 a.m.	31	29	29	25	26	28	24	31	24	20	20	15
9:00 a.m.	30	22	26	28	29	25	27	30	28	28	25	16
10:00 a.m.	34	29	22	24	32	29	35	31	29	27	15	24
11:00 a.m.	28	32	23	26	30	31	34	34	32	30	28	18
12:00 p.m.	29	30	25	30	30	34	36	36	34	21	21	22
1:00 p.m.	30	36	29	23	27	32	35	35	31	15	26	28
2:00 p.m.	32	31	28	21	32	36	30	32	30	28	25	20
3:00 p.m.	35	30	34	32	35	32	34	30	34	31	28	16
4:00 p.m.	31	32	30	30	29	29	29	30	28	25	22	25
5:00 p.m.	28	28	35	28	28	29	24	29	27	22	25	22
6:00 p.m.	24	24	28	29	30	27	27	24	29	24	21	18
7:00 p.m.	29	29	22	28	27	28	24	25	28	20	18	21
8:00 p.m.	28	27	21	24	25	25	22	28	28	20	20	20
9:00 p.m.	30	22	21	27	28	27	25	22	27	22	18	18
10:00 p.m.	25	25	20	25	26	24	22	24	25	20	16	17

Nota: Concentraciones de PM₁₀ expresadas en µg/m³

Tabla 3. Monitoreo de PM₁₀ en la estación Plazuela Bolognesi**Ubicación:** Plazuela Bolognesi**Coordenadas:** Norte: 9207439.81 | Este: 774903.70**Altitud:** 2732 m.s.n.m.

Hora	03/09	10/09	17/09	02/10	08/10	15/10	05/11	12/11	19/11	03/12	10/12	17/12
5:00 a.m.	52	50	60	55	59	55	52	48	49	46	47	44
6:00 a.m.	55	63	69	65	68	68	65	60	61	59	53	45
7:00 a.m.	71	65	75	70	74	69	68	61	63	60	55	53
8:00 a.m.	76	77	80	74	79	82	80	72	75	72	63	61
9:00 a.m.	80	81	84	79	82	86	83	74	79	73	69	66
10:00 a.m.	78	79	81	78	80	84	81	77	78	75	66	63
11:00 a.m.	73	74	77	72	76	79	76	70	72	68	60	58
12:00 p.m.	81	82	84	79	83	85	80	77	80	76	70	69
1:00 p.m.	84	86	88	82	84	86	84	80	82	78	72	71
2:00 p.m.	82	80	85	80	80	83	78	78	77	71	74	72
3:00 p.m.	76	78	80	76	78	78	77	72	75	73	66	68
4:00 p.m.	73	75	78	73	75	80	79	70	76	70	62	65
5:00 p.m.	66	69	70	66	69	74	71	69	66	65	64	62
6:00 p.m.	64	70	75	69	73	76	72	67	68	60	60	60
7:00 p.m.	68	74	77	70	76	72	75	69	70	62	56	59
8:00 p.m.	70	72	75	71	72	71	70	71	65	58	58	54
9:00 p.m.	65	70	73	68	70	69	69	70	69	60	53	52
10:00 p.m.	69	67	70	65	74	66	71	68	66	55	51	56

Nota: Concentraciones de PM₁₀ expresadas en µg/m³

Tabla 4. Monitoreo de PM₁₀ en la estación Parque las Máscaras**Ubicación:** Parque las Máscaras**Coordenadas:** Norte: 9209053.57 | Este: 775338.29**Altitud:** 2717 m.s.n.m.

Hora	05/09	12/09	19/09	04/10	10/10	17/10	07/11	14/11	21/11	05/12	12/12	19/12
5:00 a.m.	80	85	80	87	80	85	85	80	86	79	80	77
6:00 a.m.	95	94	84	92	92	92	92	88	96	80	88	82
7:00 a.m.	96	100	97	95	98	100	97	95	98	89	96	90
8:00 a.m.	118	120	118	112	105	110	109	104	103	92	102	96
9:00 a.m.	120	118	112	114	104	112	101	110	100	94	100	92
10:00 a.m.	100	116	117	105	96	104	98	100	109	91	98	91
11:00 a.m.	111	120	102	100	109	110	96	95	111	90	104	99
12:00 p.m.	115	122	110	104	103	103	99	109	114	92	100	102
1:00 p.m.	122	124	116	119	110	119	109	116	120	98	110	105
2:00 p.m.	98	118	114	117	104	111	112	110	114	95	105	100
3:00 p.m.	100	110	100	108	99	103	105	105	95	90	103	96
4:00 p.m.	98	115	108	100	100	98	103	100	97	96	97	98
5:00 p.m.	105	118	112	110	97	94	116	108	100	100	100	92
6:00 p.m.	118	120	115	114	101	103	112	106	106	97	98	90
7:00 p.m.	110	110	100	106	98	95	104	97	92	92	92	94
8:00 p.m.	99	106	98	103	95	98	96	92	90	90	89	93
9:00 p.m.	94	96	92	95	97	93	97	90	93	93	94	88
10:00 p.m.	94	97	90	90	92	91	94	90	91	88	90	82

Nota: Concentraciones de PM₁₀ expresadas en µg/m³

Tabla 5. Monitoreo de PM₁₀ en la estación Óvalo Musical**Ubicación:** Óvalo Musical**Coordenadas:** Norte: 9207178.95 | Este: 775853.23**Altitud:** 2713 m.s.n.m.

Hora	04/09	11/09	18/09	03/10	09/10	16/10	06/11	13/11	20/11	04/12	11/12	18/12
5:00 a.m.	81	79	88	85	79	84	87	84	87	77	82	79
6:00 a.m.	94	82	95	90	90	95	92	90	95	82	90	86
7:00 a.m.	98	101	107	98	100	102	98	97	101	88	98	95
8:00 a.m.	120	125	124	120	108	110	110	106	118	96	105	99
9:00 a.m.	124	114	120	114	102	112	104	110	114	94	104	96
10:00 a.m.	112	121	116	107	99	108	100	103	108	90	100	92
11:00 a.m.	98	108	121	102	110	112	97	100	102	92	102	90
12:00 p.m.	115	120	124	110	108	119	102	109	110	100	114	95
1:00 p.m.	128	130	128	122	119	122	115	120	119	104	118	98
2:00 p.m.	112	123	114	119	106	115	107	115	111	101	113	96
3:00 p.m.	96	118	104	104	97	103	100	111	103	99	110	92
4:00 p.m.	109	121	100	100	100	99	98	100	100	95	102	90
5:00 p.m.	122	115	121	117	100	112	109	112	112	90	100	94
6:00 p.m.	104	116	125	119	104	117	105	104	115	92	101	95
7:00 p.m.	112	106	102	107	101	110	99	100	102	90	99	90
8:00 p.m.	100	111	100	95	93	105	100	102	98	91	100	92
9:00 p.m.	92	97	95	99	90	96	94	95	98	88	95	90
10:00 p.m.	95	92	97	88	82	95	92	96	95	88	92	88

Nota: Concentraciones de PM₁₀ expresadas en µg/m³

Anexo 2. Certificado de calibración del instrumento.



Anexo 3. Panel Fotográfico.

Equipo de monitoreo día (Lugar Óvalo musical)



Equipo de monitoro Noche (lugar Parque las Mascaras)



Monitoreo (Fundo Sierra Verde)



Punto de monitoreo (Plaza de Armas)



Punto de monitoreo Óvalo Musical



Punto de monitoreo Plazuela Bolognesi



Punto de monitoreo Fundo Sierra Verde



Punto de monitoreo Parque de las Mascaras



