

**UNIVERSIDAD NACIONAL INTERCULTURAL DE LA
SELVA CENTRAL JUAN SANTOS ATAHUALPA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**
Aporte de fuentes de emisión del material particulado fino (PM_{2.5}) y
carbón negro (CN) en la ciudad de Chanchamayo, 2024

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental

AUTORAS

Rosa Karen Arroyo Isuiza
Milene Omara Asto Crocco

ASESOR

Dr. Daniel Martín Álvarez Tolentino

Chanchamayo, Perú

2024




16% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)
- ▶ Trabajos entregados

Fuentes principales

- 16%  Fuentes de Internet
- 7%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darnos la fortaleza, sabiduría y ser la guía que nos encaminó para concluir esta etapa de nuestra vida

Al Dr. Daniel Álvarez Tolentino, nuestro asesor de tesis, por su orientación, esfuerzo, paciencia, compromiso, enseñanza que fueron esenciales para nuestra vida como investigadoras.

A nuestros jurados, Dr. Alex Rubén Huamán De La Cruz, Mg. Mayvi Deysi Uscuchagua Cornelio y Mg. Vilma Luisa Aguilar Huaroc, por sus críticas constructivas, valiosas asesorías y sugerencias que nos permitieron mejorar y presentar un trabajo de calidad.

A nuestros padres, por su ejemplo de perseverancia, apoyo incondicional, comprensión, amor infinito, y siempre creer en nosotras.

A la Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos y escuela de Ingeniería Ambiental, por otorgarnos los recursos y herramientas necesarias para el desarrollo de esta investigación.

DEDICATORIA

A mi madre Zonia, cuyo amor, sacrificio y apoyo incondicional me han permitido llegar hasta aquí. A mi pequeña Bimba, por su compañía en las largas noches de trabajo. Y a todos aquellos que, me han apoyado, motivado y creído en mí, incluso en los momentos más difíciles.

ROSA ARROYO

A mis padres, Evelyn y Walter, a mi hermana Alexia, que gracias a ustedes me impulsaron a seguir adelante; y a mi querida Maya, por su compañía de tantas noches desveladas y lealtad.

MILENE ASTO

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo cuantificar los aportes de las fuentes emisoras del material particulado fino ($PM_{2.5}$) y del carbono negro (CN) en la ciudad de Chanchamayo durante el año 2024. Asimismo, se identificaron los meses de mayor concentración, se analizaron trayectorias de masas de aire a 500 m de altura y se evaluó el aporte regional del $PM_{2.5}$.

Los resultados revelaron una variabilidad temporal significativa en ambos contaminantes. Para el CN, se observaron picos horarios a las 06:00 y 18:00 horas, con un máximo de $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 15 de junio. En términos diarios, el valor más alto fue de $14.407 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (26 de junio), mientras que semanalmente los martes a las 18:00 h presentaron los mayores promedios ($2.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Mensualmente, setiembre destacó por registrar la concentración más elevada ($1.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$), lo cual se atribuye a condiciones meteorológicas desfavorables, como poca precipitación y altas temperaturas, que favorecen la acumulación de contaminantes e inducen inversión térmica, especialmente en zonas tropicales. En octubre, se documentó una disminución moderada ($1.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$), evidenciando una reducción respecto a setiembre.

En cuanto al $PM_{2.5}$, setiembre presentó los valores más altos ($>100 \mu\text{g}/\text{m}^3$), influenciados por actividades como la quema de residuos agrícolas. En contraste, durante el periodo lluvioso (febrero-junio), los niveles se mantuvieron por debajo de los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ debido al efecto de lavado atmosférico. Estos hallazgos reflejan la influencia combinada de fuentes locales, regionales y factores meteorológicos sobre la calidad del aire en Chanchamayo.

Palabras Claves: Carbono negro, $PM_{2.5}$, HYSPLIT, trayectorias y aportes.

ABSTRACT

The objective of this research was to quantify the contributions of fine particulate matter (PM_{2.5}) and black carbon (BC) emitting sources in the city of Chanchamayo during the year 2024. Likewise, the months of highest concentration were identified, air mass trajectories at 500 m altitude were analyzed, and the regional contribution of PM_{2.5} was evaluated.

The results revealed significant temporal variability for both pollutants. For BC, hourly peaks were observed at 06:00 and 18:00 h, with a maximum of 27 µg/m³ on June 15. In daily terms, the highest value was 14.407 µg/m³ (June 26), while weekly, Tuesdays at 18:00 h presented the highest averages (2.30 µg/m³). On a monthly basis, September had the highest concentration (1.25 µg/m³), which is attributed to unfavorable meteorological conditions, such as low precipitation and high temperatures, which favor the accumulation of pollutants and induce thermal inversion, especially in tropical areas. In October, a moderate decrease (1.01 µg/m³) was documented, showing a reduction with respect to September.

As for PM_{2.5}, September presented the highest values (>100 µg/m³), influenced by activities such as the burning of agricultural residues. In contrast, during the rainy period (February-June), levels remained below 10 µg/m³ due to the atmospheric washout effect. These findings reflect the combined influence of local and regional sources and meteorological factors on air quality in Chanchamayo.

Keywords: Black carbon, PM_{2.5}, HYSPLIT, trajectories and aprot.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO I	14
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1. Fundamentación del problema.....	14
1.2. Formulación del problema.....	15
1.2.1. Problema general	15
1.2.2. Problemas específicos.....	15
1.3. Objetivos.....	16
1.3.1. Objetivo general.....	16
1.3.2. Objetivos específicos	16
1.4. Definición y operacionalización de variables.....	16
1.5. Hipótesis	17
1.5.1. Hipótesis general.....	17
1.5.2. Hipótesis específicas.....	17
1.6. Justificación.....	17
CAPÍTULO II	18
MARCO TEÓRICO.....	18
2.1. Antecedentes.....	18
2.1.1. Internacionales	18
2.1.2. Nacionales.....	19
2.1.3. Regionales.....	20
2.2. Bases teóricas	20
2.2.1. Atmósfera.....	20

2.2.2. Calidad del aire	21
2.2.3. Contaminación atmosférica	22
2.2.4. Fuentes de emisión.....	22
2.2.5. Tipos de contaminantes atmosféricos	23
2.2.6. Modelo HYSPLIT.....	25
2.2.7. Transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos	26
2.2.8. Efectos en la salud	27
2.2.9. Normativa	28
CAPÍTULO III.....	29
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	29
3.1. Ámbito de estudio.....	29
3.2. Tipo, nivel y diseño de investigación	33
3.2.1. Tipo.....	33
3.2.2. Nivel.....	33
3.2.3. Diseño	33
3.3. Población y muestra.....	33
3.3.1. Población.....	33
3.3.2. Muestra	33
3.4. Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	34
3.4.1. Procedimientos.....	34
3.4.2. Técnicas e instrumentos.....	41
CAPÍTULO IV.....	43
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	43
4.1. Determinación de la concentración del PM _{2.5}	43
4.2. Determinación de la concentración del CN	46
4.2.1. Variación horaria de la concentración del CN	46
4.2.2. Variación semanal de la concentración del CN	48
4.2.3. Variación mensual de la concentración del CN	50

4.3. Retro trayectorias de las masas de aire aplicando el modelo HYSPLIT	54
4.3.1. Análisis del origen y trayectorias de las masas de aire hacia la zona de estudio	54
4.3.2. Análisis de clúster según las direcciones predominantes de las masas de aire (N, S, E y O)	57
4.4. Trayectoria de las masas de aire y su relación con el CN	60
4.5. Aporte de fuente emisoras en la ciudad Chanchamayo	66
4.6. Prueba de hipótesis	67
4.6.1. Determinación del aporte región del CN en la ciudad de Chanchamayo, 2024 .	67
4.6.2. Determinación de la concentración mensual del PM _{2.5} en los meses de febrero a octubre, 2024	69
4.6.3. Determinar el mes con mayor concentración del CN en los meses de febrero a octubre, 2024	70
CONCLUSIONES	73
RECOMENDACIONES.....	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
ANEXOS	88
ANEXOS	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura vertical de la atmósfera	21
Figura 2. Transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos	26
Figura 3. Efectos del material particulado en el sistema respiratorio	28
Figura 4. Mapa de ubicación del punto de monitoreo.....	29
Figura 5. Mapa de ubicación geográfica del punto de monitoreo.....	30
Figura 6. Precipitación mensual desde febrero a octubre en la región Junín, 2024	32
Figura 7 Mapa del punto de monitoreo	32
Figura 8. Etapas de la investigación.....	34
Figura 9. Proceso metodológico de la etapa de campo	35
Figura 10. Sensor óptico PurpleAir PA-II.....	36
Figura 11. ObservAir DST.....	37
Figura 12. Procedimiento para la configuración del modelo HYSPLIT.....	38
Figura 13. Selección del modelo de trayectoria.....	38
Figura 14. Selección del número de lugares de inicio y tipo de trayectoria	39
Figura 15. Selección de meteorología y coordenadas.....	39
Figura 16. Selección del correspondiente archivo	40
Figura 17. Selección de la dirección de trayectoria y movimiento vertical	40
Figura 18. Mapa de trayectorias de las masas de aire	41
Figura 19. Comportamiento promedio de la concentración del PM _{2.5} en una escala de tiempo (días) desde febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.	44
Figura 20. Diagrama de caja y bigote de las medias mensuales de la concentración del PM _{2.5} , desde febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.	46
Figura 21. Comportamiento promedio de la concentración del CN en una escala de tiempo (diurno) desde febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.	47
Figura 22. Comportamiento promedio de la concentración del CN en una escala de tiempo (días) desde febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.	48
Figura 23. Comportamiento promedio de la concentración del CN en una escala de tiempo (horas) en los días de la semana desde febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.....	49

Figura 24. Comportamiento promedio de la concentración del CN en una escala de tiempo (días laborables y no laborables) desde febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.....	49
Figura 25. Comportamiento promedio de la concentración del CN en una escala de tiempo (mensual) desde febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.	50
Figura 26. Diagrama de caja y bigote de las medias mensuales de la concentración del CN, durante febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.	52
Figura 27. Fotografía registrada en setiembre, captando el aspecto humareda en la ciudad de Chanchamayo	53
Figura 28 Rosa de viento de julio, agosto y setiembre, teniendo como punto de origen la ciudad de Chanchamayo, 2024.	54
Figura 29. Trayectoria de las masas de aire a 500 m de altura, teniendo como punto de origen la ciudad de Chanchamayo, 2024. (A) Julio, (B) Agosto y (C) Setiembre.....	56
Figura 30. Clúster de las trayectorias de las masas de aire a 500 m de altura, en julio, agosto y setiembre, teniendo como punto de origen la ciudad de Chanchamayo, 2024.	59
Figura 31. Zonas con mayor contribución de CN a 500 m de nivel de altura, en julio, agosto y setiembre, teniendo como punto de origen la ciudad de Chanchamayo, 2024.	62
Figura 32. Presentación de las zonas con mayor significancia, en julio, agosto y setiembre, teniendo como punto de origen en la ciudad Chanchamayo, 2024.....	65
Figura 33. Distribución de la velocidad del viento en los cuatros zonas	66
Figura 34. Aporte de fuentes emisoras desde febrero a octubre en la ciudad Chanchamayo, 2024.....	67
Figura 37. Densa humareda en el cielo de la ciudad de Chanchamayo, en el 2024	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables.....	16
Tabla 2. Fuentes de emisión de PM _{2.5} y cantidades	22
Tabla 3. Estándares de Calidad Ambiental del aire.....	28
Tabla 4. Número mínimo de estaciones de monitoreo de calidad del aire	34
Tabla 5. Estadística descriptiva para la concentración promedio del PM _{2.5} desde febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.....	45
Tabla 6. Estadística descriptiva para la concentración promedio del CN durante febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.....	51
Tabla 7. Porcentaje del clúster de las trayectorias de las masas de aire a 500 m de altura, en los meses de julio, agosto y setiembre, teniendo como punto de origen la ciudad de Chanchamayo, 2024.	57
Tabla 8. Influencia de dirección del viento en las zonas de los departamentos	60
Tabla 9. Aporte de las fuentes emisoras por zonas a partir de la frecuencia de direcciones de viento teniendo como punto de origen la ciudad de Chanchamayo, 2024.....	64
Tabla 10. Prueba de Shapiro-Wilk (normalidad) para las direcciones de viento (NE, E, SE, S, SW, W, NW y N) desde febrero a octubre del 2024	68
Tabla 11. Porcentaje de la dirección de viento (E, N, NE y NW) teniendo como punto de origen la ciudad de Chanchamayo, 2024.....	68
Tabla 12. Prueba de Anderson Darling (normalidad) y Kruskal-Wallis para las concentraciones de PM _{2.5} desde febrero a octubre del 2024.....	70
Tabla 13. Prueba de Anderson Darling (normalidad) y Kruskal-Wallis para las concentraciones del CN desde febrero a octubre del 2024.....	71

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la contaminación atmosférica se define como una amenaza invisible, debido al incremento alarmante de sustancias nocivas en el aire, por lo que son emitidos por distintas causas ya sea antropogénicas y naturales (Moretti *et al.* 2023). Asimismo, Leal (2019), manifiesta que el aumento de las actividades antropogénicas es uno de los principales factores en contribuir los niveles de concentraciones contaminantes (gases y material particulado). La repercusión de esta problemática trasciende gravemente los límites ambientales, afectando de forma negativa al medio ambiente y a la salud de la población (Romero *et al.* 2006).

Los contaminantes atmosféricos, se sujeta a la distribución y ubicación de las fuentes emisoras, y tienden a desplazarse de un lugar a otro, logrando obtener un carácter local o planetario (Mora *et al.* 2021). Por tanto, la polución del aire puede llevarse a cabo a distintas escalas como rural, regional y mundial, por otra parte, los contaminantes que abundan en su mayoría son el óxido de nitrógeno (NO_x), partículas en suspensión (PM_{2.5} y PM₁₀), ozono troposférico (O₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂) y compuestos orgánicos volátiles (COVs) (Gutiérrez *et al.* 2019).

Las emisiones de las partículas suspendidas se vinculan a las condiciones climáticas, por tanto, en las zonas tropicales reflejan altos niveles de concentraciones (Martínez, 2011). Además, las regiones con crecimiento urbano influyen en el incremento de las fuentes emisoras producto de la alta demanda de actividades humanas (Llanque, 2004). El PM_{2.5} está compuesto por diminutas partículas suspendidas en el aire, caracterizado por su alta toxicidad en la salud humana, afectando específicamente al sistema respiratorio y cardiovascular (Gaviria *et al.* 2011).

El CN se destaca por la formación de la combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa, y gran parte de sus partículas se encuentran en los rangos de partículas finas, cuyo diámetro aerodinámico es menor o igual a 2.5 μm (Gatari y Boman, 2003). La absorbancia del CN contribuye significativamente al calentamiento global, alterando las condiciones climáticas (temperatura, precipitación y entre otros). Con el paso del tiempo los niveles de concentración del CN han aumentado potencialmente en varias regiones del mundo (Shu *et al.* 2023).

La trayectoria de las masas de aire tiene influencia en la distribución del CN, debido a que los volúmenes de aire tienen como función transportar partículas a grandes distancias de la superficie terrestre, del mismo modo, las condiciones meteorológicas intervienen en la dispersión de los contaminantes atmosféricos. Cabe señalar que, las masas de aire se constituyen en distintas

regiones (Li *et al.* 2016). Además, a base del análisis de las trayectorias permite determinar las fuentes emisoras predominantes, a través de los modelos de simulación (HYSPLIT) y datos satelitales (Balde y Vega, 2019).

Según el reporte de la Asociación Automotriz del Perú (AAP), Perú se ubica como uno de los principales países latinos con mayor índice de concentración del PM_{2.5}, por ende, la exposición de estas partículas suscitó problemas severos, así pues, desde los últimos años, la dispersión de los contaminantes acarrió eventos negativos (AAP, 2022).

En los últimos años, en la ciudad de Huancayo se han registrado altos niveles de concentraciones del material particulado, por lo cual que supera los límites tolerables, establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental de Aire, y como consecuencia altera severamente a la calidad del aire (Suarez *et al.* 2017).

Cabe recalcar que hasta la fecha no existen investigaciones o estudios acerca de la evaluación de la calidad del aire en la ciudad de Chanchamayo. Por lo tanto, el presente trabajo de investigación tiene como finalidad determinar los aportes de las fuentes emisoras del PM_{2.5} y CN, tomando en cuenta los niveles de concentraciones de estos contaminantes.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Fundamentación del problema

La atmósfera ha cambiado a lo largo de los años, sin embargo; en los últimos siglos ha llegado a un nivel vertiginoso. Hechos históricos contribuyeron a la contaminación del aire, tales como: el dominio del fuego por los homínidos, la alteración de la estructura vegetal al ser usado como combustible, la revolución industrial, el uso del carbón como fuente de energía, los contaminantes tóxicos generados por las fábricas, entre otros (Boldo, 2016).

Los tipos de contaminantes atmosféricos varían de acuerdo a las fuentes de emisión. Entre los más comunes, se encuentran las partículas en suspensión, óxido de azufre (SO_x) y de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV), metales pesados (mercurio, plomo, cadmio, arsénico y níquel), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y amoniaco (Vargas, 2005).

En la zona urbana, los contaminantes atmosféricos en su mayoría proceden de fuentes de emisión móvil (parque automotor) y fija de combustión (industrias y/o eliminación de residuos) (Ballester, 2005). Realizar estudios en zona urbana, lo convierte en un tema de gran importancia para la conservación del medio ambiente y el bienestar público.

El PM se clasifica de acuerdo con diversos criterios, como: granulometría (partículas ultrafinas PM_1 , finas $\text{PM}_{2.5}$ y gruesas PM_{10}), tiempo de suspensión en el aire, mecanismo de formación (primarias y secundarias), composición (depende de la fuente de emisión) y origen (natural o antropogénico), esto indica que, su variabilidad proviene de diferentes fuentes de emisión (Xarxa, 2001).

Según Zafra *et al.* (2024) menciona que el CN, se encuentra dentro de las partículas finas y ultrafinas, cuyo origen se da durante la combustión. Su tamaño es similar a la longitud de onda emitida por el sol, por lo que presenta propiedades de absorción y dispersión de la luz, logrando afectar al clima. Entre los más estudiados, se encuentra el forzamiento radiativo, efectos del oscurecimiento de superficies y cambios en los patrones de precipitación (Díaz, 2012).

Alvarado *et al.* (2022) recalcan que las fuentes móviles contribuyen a gran magnitud a la emisión del CN, generando impactos negativos en el medio ambiente, por lo tanto, plantearon estrategias para reducir los niveles de emisión del CN en Costa Rica, el cual consideraron 122 estaciones para monitorear. En la metodología utilizaron el software Copert 5.2, en el que

determinaron según las categorías el total de las concentraciones emitidas. Por consiguiente, obtuvieron 471.9 toneladas (Tn) de emisión del CN generados por las fuentes móviles. Por lo tanto, tomaron como alternativa de solución el uso de vehículos eléctricos, empleando el combustible el diésel bajo en azufre y biodiésel.

En los últimos años, se incrementaron las enfermedades respiratorias y muertes prematuras en el mundo, siendo la principal causa la contaminación atmosférica (Castro *et al.* 2021). Alrededor de 6,4 millones de muertes al año, se deben a la exposición de las partículas finas. Tener control sobre estos contaminantes y sus fuentes, permite mejorar la calidad del aire y a mitigar el cambio climático. Esto requiere inversiones físicas y reformas normativas (Pan American Health Organization [PAHO], 2023)

En la ciudad de Huancayo se registró altos niveles de $PM_{2.5}$ superando los límites máximos permisibles (LMP), lo cual son emitidos principalmente por la actividad de construcción, por ende, resulta ser potencialmente perjudicial y nocivo para las personas, animales y plantas (Ventosilla, 2016).

En la ciudad de Chanchamayo presenta progresión económica a causa de los mecanismos comerciales. Por consiguiente, debido al crecimiento poblacional y demás actividades, se incrementaron los niveles de contaminación en la atmósfera, por lo que conlleva una repercusión de forma negativa en el medio ambiente y a la salud humana (Juliño *et al.* 2021).

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuáles son los aportes de las fuentes de emisión del $PM_{2.5}$ y CN en la ciudad de Chanchamayo, 2024?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el mes con mayor concentración del $PM_{2.5}$ en la ciudad de Chanchamayo, 2024?
- ¿Cuál es el mes con mayor concentración del CN en la ciudad de Chanchamayo, 2024?
- ¿Cuál es la retro trayectoria a una altura de 500 m. en los meses con altas concentraciones de CN en la ciudad de Chanchamayo, 2024?
- ¿Cuál es el aporte de la región fuente del contaminante en la ciudad de Chanchamayo, 2024?

1.3. Objetivos

1.3.1. *Objetivo general*

Cuantificar los aportes de las fuentes emisoras del PM_{2.5} y CN en la ciudad de Chanchamayo, 2024.

1.3.2. *Objetivos específicos*

- Determinar el mes con mayor concentración del PM_{2.5} en la ciudad de Chanchamayo, 2024.
- Determinar el mes con mayor concentración del CN en la ciudad de Chanchamayo, 2024.
- Determinar las trayectorias a una altura de 500 m en los meses con altas concentraciones del CN.
- Determinar el aporte de la región de contaminante en la ciudad de Chanchamayo, 2024.

1.4. Definición y operacionalización de variables

Tabla 1.

Operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores	Unidad de Medida
Material Particulado (PM _{2.5})	Es aquella mezcla heterogénea de partículas sólidas y líquidas dispersas en el aire. Pueden incluir sustancias químicas orgánicas y metales. Según tamaño por diámetro, pueden ser: finas y gruesas (Colman <i>et al.</i> 2018).	Concentración	PM _{2.5}	μg/m ³
		Fuentes	Regional	%
Carbono negro (CN)	Las altas emisiones del CN perturban a la calidad del aire, el cual son obtenidas por la combustión incompleta (Díaz, 2012).	Concentración	CN	μg/m ³
		Periodo	Secas	semanas
			Lluviosas	semanas

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

Las concentraciones de PM_{2.5} y CN en la ciudad de Chanchamayo están significativamente influenciadas por dos fuentes principales de emisión: quema de bioma y transporte vehicular.

1.5.2. Hipótesis específicas

- La concentración del PM_{2.5} en setiembre es significativamente mayor que en meses.
- La concentración del CN en setiembre es significativamente mayor que en meses.
- La concentración en la región fuente del Noreste (NE) es mayor que las demás regiones.

1.6. Justificación

La determinación del análisis cuantitativo del aporte de las concentraciones de PM_{2.5} y CN permitirá conllevar la optimización del desarrollo de estrategias en el control de emisiones de las distintas fuentes a fin de minimizar la insalubridad del aire. Por lo tanto, en base a la investigación se logrará identificar las fuentes emisoras se facilitará las proporciones específicas en la ciudad de Chanchamayo, lo cual atraerá múltiples beneficios significativos en el mejoramiento de la calidad del aire y a su vez en la protección de la salud humana.

Por otro lado, el aumento de la densidad poblacional y desarrollo económico (parque automotor, restaurantes e industrias), se incrementaron las emisiones de PM_{2.5} y CN, por lo cual tienen un gran impacto negativo en la salud de la población. Por ello, es fundamental comprender los procesos de los contaminantes para promover programas, políticas y estrategias con relación a la calidad atmosférica.

La presente investigación, aportará información detallada en alusión a las fuentes emisoras con el fin de establecer propuestas de mejora en la gestión de la calidad del aire, por lo que economizará en el presupuesto público, reduciendo los casos de hospitalizaciones, disminuyendo el riesgo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares en las personas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

Mena *et al.* (2024) en su investigación analizaron la polución atmosférica del material particulado (PM), por el cual enfatizaron el evento suscitado de la erupción del Volcán Cumbre Vieja en La Habana. Para ello, recopilaron los datos clasificándose por cada diez y consideraron 3 tipos de alturas (500 m, 1 000 m y 1 500 m) para la medida desde el nivel del suelo. En la metodología aplicaron el modelo Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLIT), imágenes satelitales y los datos del modelo Sistema de Pronóstico Global (GFS). En los resultados se registraron valores de 1 mg/m^3 , con una dirección de Este-Oeste y presentan una trayectoria que superan los 1 500 m de altura. Por tanto, el evento ocurrido no afecto de forma significativa a la ciudad de La Habana.

Serna *et al.* (2020) caracterizaron las concentraciones de material particulado fino ($\text{PM}_{2.5}$) y carbono negro (BC) en distintos microambientes urbanos de Manizales, Colombia. Utilizaron equipos portátiles en zonas residenciales, institucionales, comerciales e industriales. Demostrando que, las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ superiores a $60 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ corresponden a zonas de tráfico intenso, mientras que los niveles de BC alcanzaron hasta $6 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ en áreas con alta carga vehicular. Estos valores superaron los límites recomendados por la OMS, evidenciando la influencia de las fuentes móviles en la calidad del aire urbano.

Ramírez (2014) utilizó el modelo HYSPLIT para identificar los orígenes de las masas de aire en cuatro ciudades colombianas: Bogotá, Cartagena de Indias, Pasto y Leticia, durante el año 2012. El estudio clasificó las trayectorias en seis categorías: Caribe (Cb), Atlántico Este (AE), Continental (Ct), Pacífico (P), Centroamérica (CA) y Regional (R). Los resultados revelaron que en Bogotá predominó el origen continental (Ct) con un 77%, seguido por AE con 19 %. En Cartagena, las masas de aire provinieron principalmente del Caribe (Cb) en un 45 % y del continente (Ct) en un 36 %. Pasto presentó una influencia mayor del Pacífico (P) con un 72 %, mientras que Leticia estuvo dominada casi exclusivamente por masas de aire continentales (Ct) en un 99 %. Estos hallazgos indican, una influencia significativa del transporte de masas de aire en la

calidad del aire urbano, especialmente por el ingreso de material particulado desde regiones aledañas, como el polvo africano o emisiones de incendios forestales.

Maura *et al.* (2010) en su trabajo de investigación tienen como objetivo cuantificar las concentraciones del PM_{2.5} y BC en distintas estaciones (seca y húmeda) estudiadas en seis ciudades (Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Curitiba, Porto Alegre, Recife y São Paulo) de Brasil a fin de establecer normativas que regulan la calidad del aire. Para la metodología se empleó la gravimetría y reflectancia óptica. Por lo cual, en las urbes estudiadas como San Pablo, Río de Janeiro, Belo Horizonte, Puerto Alegre, Curitiba y Recife obtuvieron como resultado 28.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 17.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 14.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 13.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 14.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ del PM_{2.5}, y para la concentración del BC adquirieron 10.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 3.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 4.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 3.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 4.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 1.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cabe destacar, que los factores climatológicos predominan de forma significativa en las emisiones del PM_{2.5} y BC, por ende, en la estación seca adquirieron las máximas concentraciones.

2.1.2. Nacionales

Quispe (2022) analizó el comportamiento del PM_{2.5}, con la finalidad de evaluar el grado de riesgo en la salud de la población. Para ello, se empleó el sistema de PurpleAir II SD, en el que se monitoreo 138 puntos en las ciudades de Chilca, Huancayo y Tambo. Además, a través de la técnica planteada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, se determinó el Índice de Peligro (IP), en donde se excedió los límites de las concentraciones del PM_{2.5}, mientras que, el PM₁₀ no superó el nivel de concentración. Por tanto, el exceso de los niveles del PM_{2.5} representa una amenaza a los agentes más sensibles.

Camayo y Canturin (2021) analizaron la concentración del PM_{2.5} y su influencia con la humedad en la ciudad de Huancayo, de los cuales monitorearon en tres distintas áreas como la Universidad Nacional del Centro del Perú (UNCP), Municipalidad de Chilca (MDCH) y Municipalidad de Huancayo (MPH), en el que utilizaron sensores de PurpleAir. Por tanto, en los resultados de PM_{2.5} obtuvieron 97.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la UNCP; en la MDCH detectaron 118.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, finalmente, en la MPH emitieron 113.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Con relación a la influencia de la humedad en los puntos de muestreos no existe variabilidad en las concentraciones de PM_{2.5}.

Zegarra y Milton (2019) en su estudio tienen como finalidad, identificar las fuentes emisoras del CN y analizar las trayectorias de las masas de aire a través del HYSPLIT en la región de Arequipa. Para ello, mediante el MiniVol Ecotech 1 100 se midió las concentraciones del PM_{2.5} y consecutivamente calcularon las concentraciones del CN aplicando la metodología óptica de

absorción de luz. Por ende, para la concentración de $PM_{2.5}$ obtuvieron como mínimo $4.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y máximo $85.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para el CN alcanzaron como mínimo $0.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y máximo $2.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, a través del modelo de HYSPLIT identificaron las procedencias de las trayectorias de las masas de aire, de las cuales son Océano Pacífico, Amazonia de Brasil y Sur de Chile.

2.1.3. Regionales

Suarez *et al.* (2017) realizaron un estudio sobre el comportamiento del carbono negro (CN) en la atmósfera del Observatorio Geofísico de Huancayo (OGH), ubicado a 3 315 m s. n. m. en los Andes centrales del Perú. Para ello, utilizaron un etalómetro de 7 longitudes de onda durante un período de cinco meses (enero a mayo de 2011), registrando concentraciones horarias de CN. Los resultados mostraron un promedio diario de $1.6 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con máximos de hasta $4.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en horas pico, asociado principalmente a transporte regional de emisiones urbanas y agrícolas. Se identificaron patrones diurnos marcados, con mayor concentración durante las mañanas y las tardes, asociado a inversiones térmicas y actividad antrópica.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Atmósfera

La atmósfera es una capa gaseosa que rodea la Tierra, que está conformada principalmente por nitrógeno (N) con un 78 %, y oxígeno (O) con un 21 %. Se clasifica en diversas capas relacionadas a la latitud y características de temperatura (Ángles *et al.* 2021)

De acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2022) hace mención que la atmósfera es un sistema complejo y dinámico, debido a la incidencia de distintos factores como las actividades antropogénicas y variabilidad a diferentes escalas temporal y espacial.

2.2.1.1. Estructura

Cueva (2019) menciona que la estructura está comprendida por cinco capas concéntricas, de las cuales varían sus características térmicas según la latitud, y estas son:

a) Tropósfera

Es la capa más adyacente a la Tierra, se caracteriza por tener una altitud de 8 a 15 km. Mayormente, en la troposfera acontece fenómenos meteorológicos (Camilloni y Vera, 2003).

b) *Estratosfera*

La altitud es de 15 hasta 50 km, se destaca por absorber la radiación ultravioleta (UV) e incrementa la temperatura por causa de la presencia de la capa de ozono (Camilloni y Vera, 2003).

c) *Mesosfera*

La altitud abarca hasta los 85 km y desciende la temperatura, considerándose una de las capas más fría de la atmósfera (Camilloni y Vera, 2003).

d) *Termosfera*

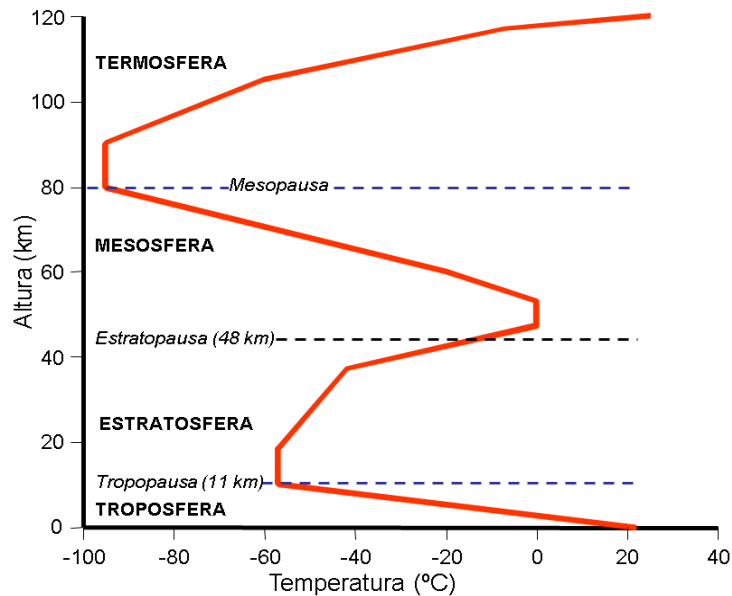
La altitud alcanza hasta los 600 km, e incrementa potencialmente la temperatura a causa de la absorción de la radiación solar (Cueva, 2019).

e) *Exosfera*

Es la capa más distante, alcanzando una altitud hasta 10 000 km. Una de sus características principales es que las sustancias contaminantes logran dispersarse hacia el exterior (Camilloni y Vera, 2003).

Figura 1.

Estructura vertical de la atmósfera



Fuente: ITE (2017)

2.2.2. Calidad del aire

La Constitución Política del Perú establece que toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente sano y equilibrado para el desarrollo de su vida. Por ello, es fundamental contar con

buena calidad del aire, que se regulariza a través de instrumentos de gestión ambiental como los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), planes de acción, Límites Máximos Permisibles (LMP), los cuales son aprobados por el Ministerio del Ambiente (MINAM), entre otros. Una gran fuente de contaminación es el incremento del parque automotor, vehículos antiguos y mala organización de rutas conlleva dicha situación. Sobrepasar los ECA, representa disminuir la calidad del aire y, por ende, la calidad de vida de la población (MINAM, 2017).

2.2.3. Contaminación atmosférica

La Organización Mundial de la Salud [OMS] (2018) menciona que, la polución es la alteración en la calidad del aire, debido a la existencia de sustancias nocivas que afectan a los agentes receptores. Por ende, la contaminación hace referencia a la combinación de partículas (gases, vapores, entre otros). Los contaminantes atmosféricos provienen de las industrias como comercios, residencias y automóviles.

2.2.4. Fuentes de emisión

El material particulado al igual que los gases contaminantes, tiene origen natural y antropogénico. La concentración de estos contaminantes, siguen permaneciendo en la atmósfera debido a los equilibrios cíclicos. Con el desarrollo industrial este equilibrio se fue alterando, ocasionando los problemas ambientales que conocemos (Angulo, 2009).

2.2.4.1. Tipos de fuentes de emisión

En la Tabla 2, abarca los tipos de fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos, con sus respectivas cantidades emitidas.

Tabla 2.

Fuentes de emisión de PM_{2.5} y cantidades

Gas emitido	Antropogénica	Cantidad	Natural	Cantidad
SO ₂	Combustión de carbón, petróleo, etc.	146	Erupciones volcánicas	6 – 12
H ₂ S	Procesos químicos, tratamiento de aguas negras	3	Volcanes, acción biológica en pantanos y humedales	30 - 100
CO	Transporte	300	Incendios	>3 000
NO _x	Combustibles	50	Acción bacteriana	60 - 270

NH ₃	Tratamiento de suelos	4	Descomposición biológica	100 - 200
N ₂ O	Fertilizantes nitrogenados	>17	Acción biológica en suelos	100 - 450
HC	Combustión, escapes, procesos químicos	88	Procesos biológicos: CH ₄	300 – 1 600
			Terpenos	200
CO ₂	Combustión	1.5 10 ⁴	Descomposición biológica, liberación de océanos	1.5 10 ⁵

Fuente: Poblano (2018)

2.2.5. Tipos de contaminantes atmosféricos

El PM_{2.5} y CN son denominados como unos de los contaminantes más dañino para la salud humana y el ambiente.

2.2.5.1. Gases

Son generados por fuentes naturales o antropogénicas, contribuye al cambio climático debido a su capacidad de capturar el calor en la atmósfera. Se encuentra constituido por los siguientes contaminantes, O₃, NO₂ y SO₂ (OMS, 2004).

a) Ozono (O₃)

Aránguez *et al.* (1999) mencionan que, la capa de estratosfera, el O₃ se comporta como un manto protector que absorbe una gran parte de la radiación ultravioleta (UV).

El O₃ se denomina un contaminante secundario, en el que aporta a la polución atmosférica. Asimismo, el O₃ a nivel del suelo se considera un gas contaminante, debido a la interacción de la luz solar con los óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV_s) (Donzelli y Suarez, 2024).

El aumento del O₃ troposférico se relaciona directamente a las emisiones de concentraciones de otros gases contaminantes, y por defecto perturban las condiciones climáticas. Por otro lado, en la actualidad los niveles de concentración del O₃ provienen en gran medida de las fuentes móviles (Solaz, 2001).

b) Dióxido de nitrógeno (NO₂)

Es considerado como un gas intensamente reactivo, por lo cual alude a un contaminante nocivo, en donde se origina a causa de la combustión de combustibles

fósiles, asimismo, repercute desfavorablemente al medio ambiente y desarrolla problemas adversos en la salud (Benites y Pacsi, 2023).

Matus (2021) enfatiza en su trabajo de investigación que a raíz del aumento de las emisiones contaminantes como el “óxido de nitrógeno” y su consecuente transporte y dispersión a largas distancias, provocan un problema serio en distintas partes de la Tierra.

Las emisiones del gas NO₂ en la atmósfera desencadenan efectos adversos en la naturaleza, generando el smog fotoquímico y lluvia ácida (Peñaloza, 2016).

2.2.5.2. Material particulado (PM)

Es toda aquella mezcla heterogénea de partículas sólidas y líquidas dispersas en el aire. Pueden incluir sustancias químicas orgánicas y metales. Según tamaño por diámetro, pueden ser: finas y gruesas (Colman *et al.* 2018).

a) Composición química

La composición química del material particulado cambia, de acuerdo con las fuentes de emisión y procesos fisicoquímicos que experimenta, en un determinado espacio y tiempo. Entre los principales compuestos, destacan: carbono orgánico, carbono elemental, amonio, nitratos, sulfatos, iones solubles en agua, aerosol marino, elementos traza, material geológico y partículas biológicas (Núñez, 2019).

b) Procesos fisicoquímicos

Según Colman *et al.* (2018) indica que el comportamiento del PM en la atmósfera se establece por diversos procesos fisicoquímicos, de los cuales son los siguientes:

- Emisión primaria
Consiste en la liberación directa a la atmósfera desde fuentes como vehículos, procesos industriales, quemados de biomasa y entre otras actividades relacionadas a la combustión incompleta.
- Formación secundaria
Son las reacciones químicas en la atmósfera entre los gases precursores (SO₂, NH₃, NO_x y COVs), que constituyen la formación de nuevas partículas.
- Condensación y coagulación

Las partículas tienden a agruparse (coagular) o contribuyen al crecimiento debido a la interacción de vapores o gases condensables, por lo que modifica su propiedades y tamaño.

- Transporte atmosférico

El movimiento de las partículas se distribuye a través del viento, por lo cual se produce el transporte local, regional y transfronterizo.

- Dispersión atmosférica

Las partículas tienden a diluirse en la atmósfera debido a diversos factores (turbulencia, gradientes térmicos, etc.), de tal forma que afecta directamente en su concentración de un punto específico.

2.2.5.3. Carbono negro

La Comisión para la Cooperación Ambiental [CCA] (2015) indica que el CN se considera como carbono elemental u hollín y forma parte de los componentes de las partículas finas PM_{2.5}. Presenta carbono, por lo que su origen se debe a la combustión incompleta de materiales orgánicos, como: la madera y combustibles fósiles. Posee capacidad de retención y transformación de la luz a calor, por lo que lo convierte en el segundo actor principal del calentamiento climático.

a) Etalómetro

También conocido como aethalometer, que permite el control continuo y en tiempo real de CN in situ. Este equipo funciona con el método de transmisión óptica, que mide las pérdidas de señales en siete longitudes de onda (370, 470, 520, 590, 660, 880 y 950 nm), obteniendo datos por minuto a través de un script en Python (Marincovich *et al.* 2021).

2.2.6. Modelo HYSPLIT

HYPLIT (Híbrido de Trayectoria Integrada Lagrangiana de Una Sola Partícula) es una herramienta que desarrolla cálculos para determinar las concentraciones contaminantes en la atmosfera, asimismo, identifica el origen de las masas de aire a largas distancias, considerando distintos factores meteorológicos (viento, turbulencia y entre otros) (Mena *et al.* 2024).

Cabe destacar, que el modelo sirve para estimar la trayectoria regresiva o progresiva de las masas de aire, deduciendo la afectación de algún evento en la calidad del aire (Sistema Regional de Visualización y Monitoreo [SERVIR], 2009).

Para la ejecución del modelo HYSPLIT, se toma en consideración toda información del punto de emisión, como: ubicación del punto (coordenadas geográficas), cantidad y tipo de contaminante y condiciones meteorológicas (Murillo *et al.* 2023).

2.2.7. Transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos

El transporte hace referencia al proceso de desplazamiento de las sustancias contaminantes de un lugar a otro, en donde depende de las condiciones climatológicas (dirección del viento) y topográficas (). La dispersión, alude a la dilución del contaminante en la atmosfera, por el cual se da por movimientos turbulentos y en grandes volúmenes de aire limpio, asimismo, depende de factores climáticos (viento, estabilidad atmosférica y temperatura) (Vidal y Pérez, 2017).

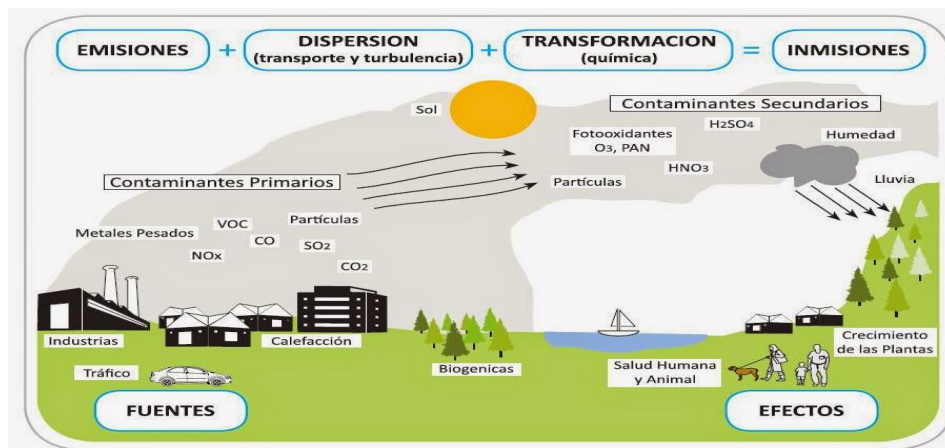
Triana (2014) menciona en su libro “Química Ambiental”, que la dispersión de los contaminantes atmosféricos predomina intensamente por las condiciones climatológicos como: la turbulencia del aire, viento y temperatura.

Por otro lado, las masas de aire aluden a la gran cantidad de volumen de aire, en el que se mantiene de forma estacionaria en una superficie a lo largo de un periodo. Las masas de aire comprenden miles de km² y se desarrollan en regiones específicas (Coronel *et al.* 2007).

Asimismo, Olcina (1996) hace mención que se distingue por su origen geográfica (polares, tropicales, continentales y marítimas) y características húmedas (secos y húmedos) y térmicas (frías y cálidas).

Figura 2.

Transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos



Fuente. Bermejo *et al.* (2009)

2.2.7.1. Factores que influye en el transporte y dispersión

a) Precipitación

Tiene un comportamiento beneficioso, que actúa como un lavador de los contaminantes atmosféricos. La intensidad y duración de la lluvia interviene en la variación de la dispersión y transporte de las partículas de contaminación. En algunas ocasiones, los contaminantes atmosféricos logran concentrarse en otras áreas distantes (Ramos *et al.* 2010).

b) Topografía

Es el estudio de la superficie terrestre, que determina la tipología del terreno clasificando en montañas, llanuras, valles y otros. Por otra parte, Vidal y Pérez (2017) menciona que las montañas y valles se desenvuelven como una barrera que retienen las sustancias nocivas. Sin embargo, en las superficies llanas ejerce la dispersión en gran magnitud, por causa de la circulación del aire.

c) Dirección de viento

De acuerdo con Mendoza (2018) menciona que la dirección del viento es considerada como un parámetro que influye en el transporte de las masas de aire, identificando la procedencia del flujo de aire.

En su estudio Ramos *et al.* (2010) indica que la dirección de viento se da a nivel regional y global, asimismo, establece el análisis de cómo actúa los contaminantes atmosféricos.

d) Humedad relativa

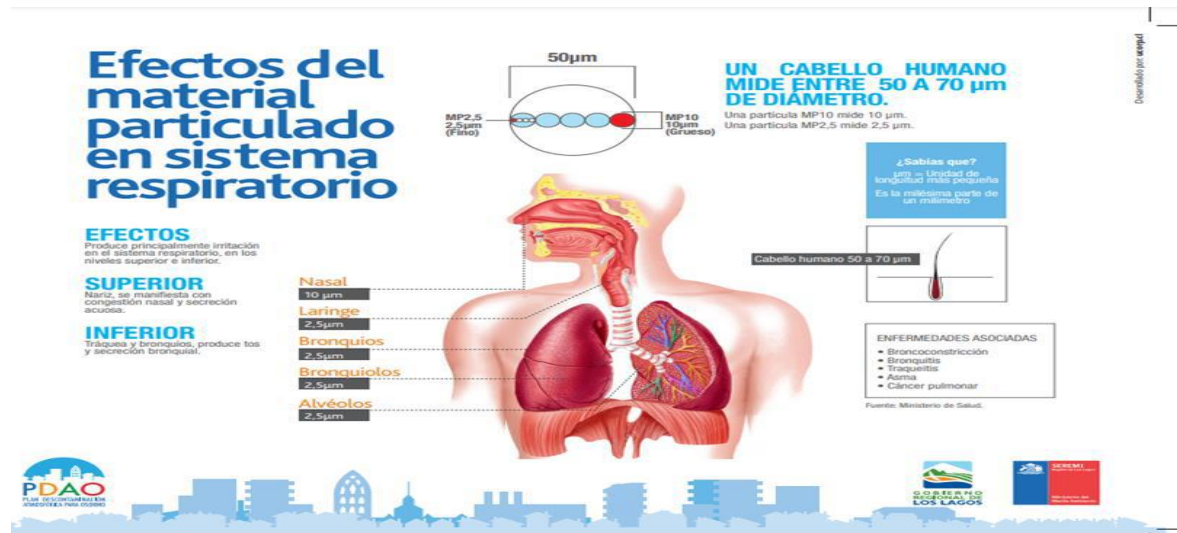
En condiciones de alta humedad relativa y presencia de precipitaciones, tienden a disminuir las concentraciones de los contaminantes, es decir, pueden facilitar que las partículas sedimenten rápidamente o ser eliminadas a través del proceso del lavado húmedo, por lo que afecta directamente en la dinámica física (Ramos *et al.* 2010).

2.2.8. Efectos en la salud

Según el Plan de Descontaminación Atmosférica para Osorno (PDAO), el material particulado perjudica a la salud humana, debido al tamaño microscópico de partículas de PM₁₀ y PM_{2.5}. Siendo fácil su inhalación, permite el pase por las principales vías del sistema respiratorio, hasta la llegada a los alvéolos pulmonares (PDAO, 2016).

Figura 3.

Efectos del material particulado en el sistema respiratorio



Fuente: PDAO (2016)

2.2.9. Normativa

Mediante el D.S. 003-2017-MINAM se aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) de aire, con la finalidad de establecer niveles de concentración de los elementos presentes en la atmósfera. Esto permite usarse como un referente sobre la situación de la calidad del aire (MINAM, 2017).

Tabla 3.

Estándares de Calidad Ambiental del aire

Parámetros	Período	Valor [µg/m ³]	Criterios de evaluación	Método de análisis
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	1 hora	200	NE más de 24 veces al año	Quimioluminiscencia (Método automático)
Material Particulado con diámetro menor a 2.5 (PM _{2.5})	24 horas	50	NE más de 7 veces al año	Separación inercial / filtración (Gravimetría)
	Anual	25	Media aritmética anual	

Nota. Tomado del Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Ámbito de estudio

El área de estudio monitoreada se localiza en la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa, por el cual tiene como coordenadas por el S: $11^{\circ} 12' 33''$ y O: $74^{\circ} 39' 49''$ y con una altitud de 655 m. s. n. m (Google Earth, 2020).

Figura 4.

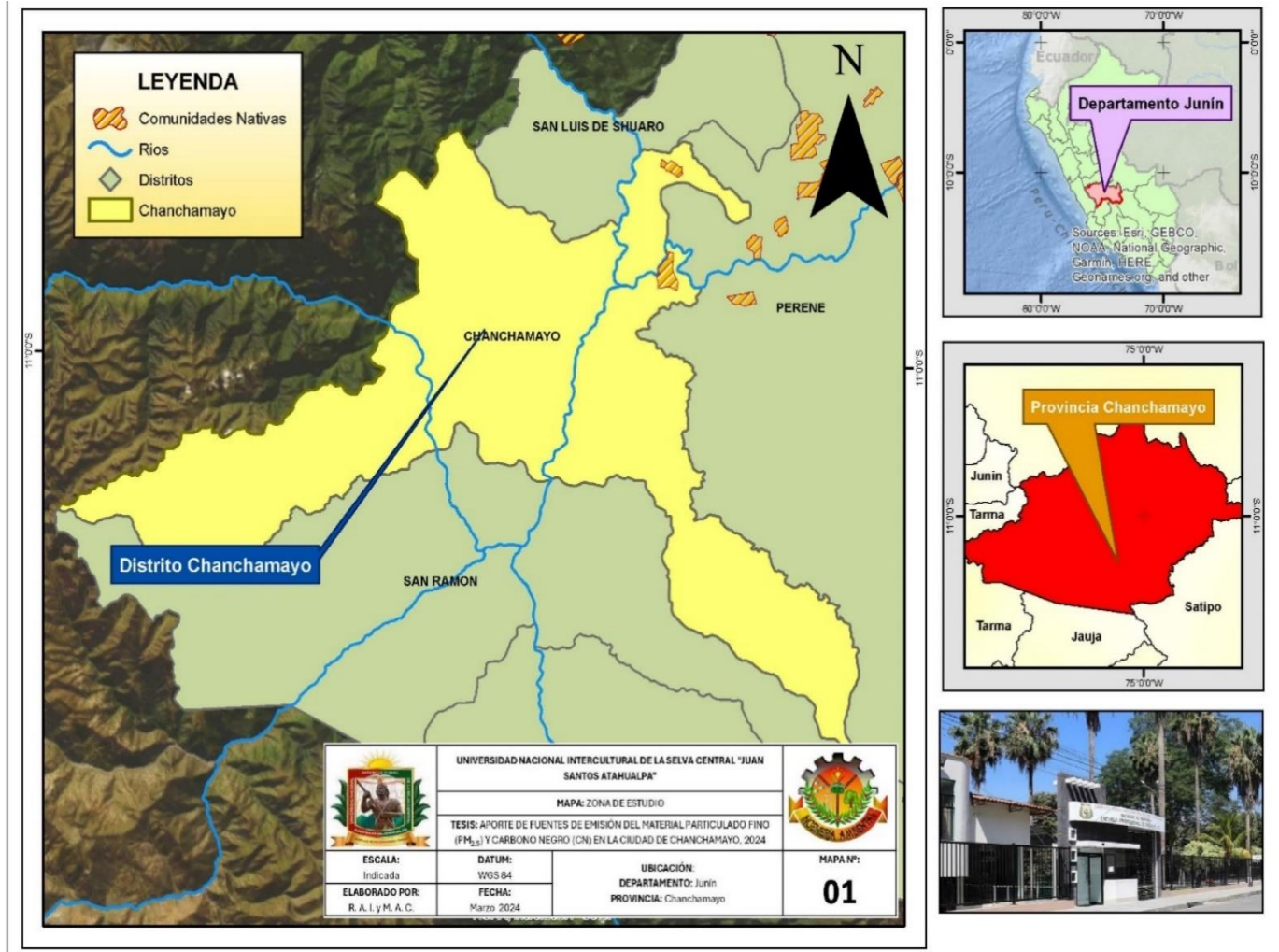
Mapa de ubicación del punto de monitoreo



Por otra parte, la Figura 5 se observa que el punto de monitoreo se sitúa geográficamente en la provincia Chanchamayo y región Junín, tiene una extensión de superficie 4 725 km² y está constituido por anexos, centros poblados y comunidades nativas.

Figura 5.

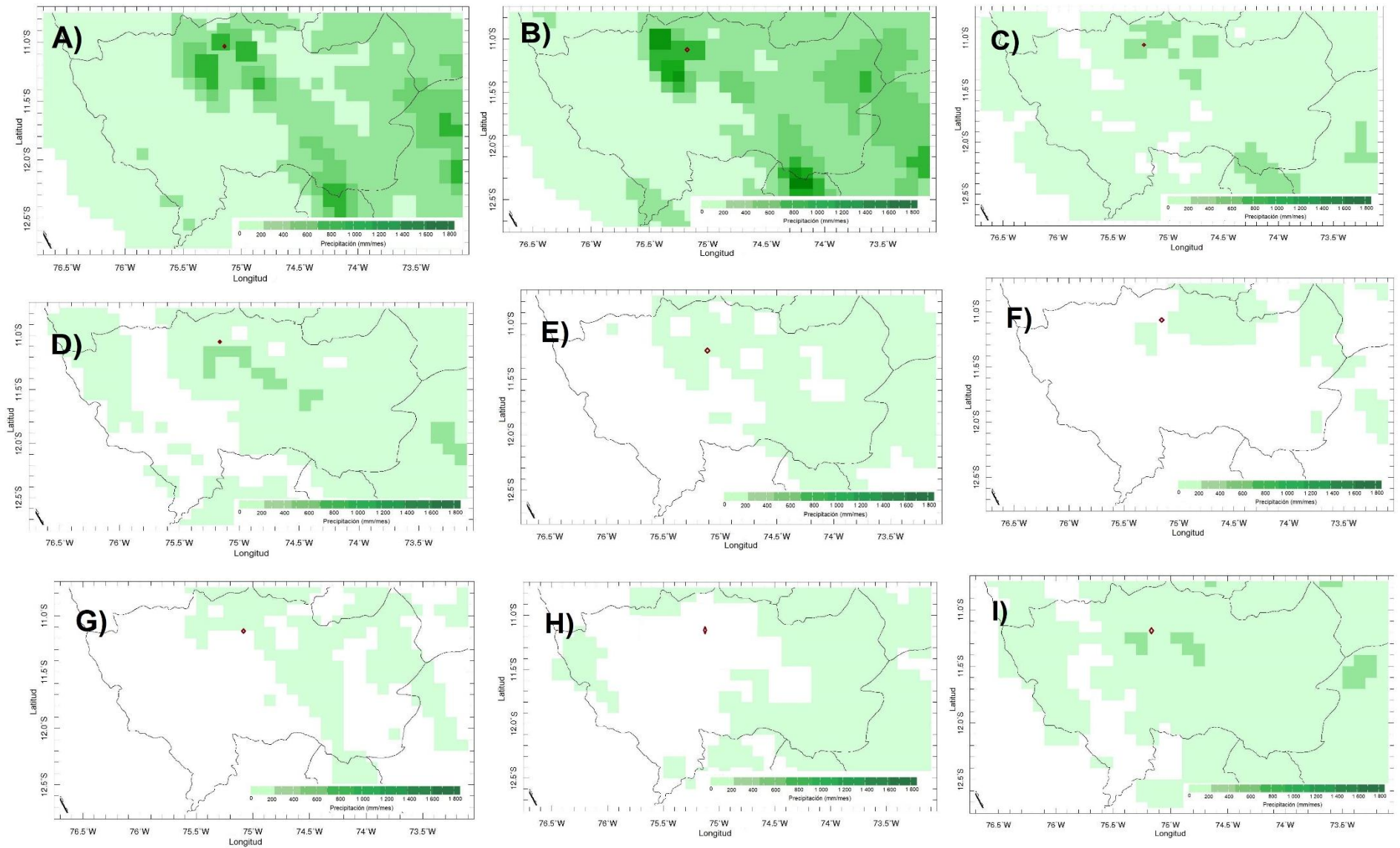
Mapa de ubicación geográfica del punto de monitoreo



El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), determina que el clima de Chanchamayo es tropical y cálido, con una temperatura media anual de 20.6 °C y una precipitación media anual de 459 mm. (SENAMHI, 2022). De acuerdo, con la Figura 6 se observa que la variabilidad mensual (febrero a octubre) de la precipitación en la región Junín en 2024, destacando los valores más elevados en los tres primeros meses estudiados (febrero - marzo). Sin embargo, en julio, agosto y setiembre presentan los niveles mínimos, por lo que se considera como periodo seco.

Figura 6.

Precipitación mensual desde febrero a octubre en la región Junín, 2024



Nota. Variabilidad climatológica de precipitación. A) febrero, B) marzo, C) abril, D) mayo, E) junio, F) julio, G) agosto, H) setiembre e I) octubre.

3.2. Tipo, nivel y diseño de investigación

3.2.1. Tipo

Según lo expuesto por Zafra (2006), el tipo de investigación es básica porque permite amplificar la información (comportamiento, fuente y entre otros) por medio del marco teórico, a fin de comprender el campo de estudio. No obstante, el método de la investigación será empleado el inductivo deductivo.

3.2.2. Nivel

Según Hernández y Mendoza (2020), el nivel de investigación se considera descriptivo, debido a que caracteriza y detalla el comportamiento de los contaminantes del PM_{2.5} y CN. Asimismo, describe la variabilidad de las concentraciones según el periodo estudiado.

3.2.3. Diseño

Además, de acuerdo con Hernández y Mendoza. (2020), el diseño de investigación se define que es no experimental longitudinal, debido a que abarca de dos variables (PM_{2.5} y CN), en donde se relaciona en distintos tiempos (meses).

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población fue toda la cuenca atmosférica de la ciudad de Chanchamayo, de las cuales fueron monitoreadas desde el mes de febrero hasta octubre del 2024.

3.3.2. Muestra

El tipo de muestra es no probabilístico por conveniencia, debido a que fue elegida según el criterio de las investigadoras. Tomando en cuenta la disposición de los equipos (PurpleAir PA-II y ObservAir DST), accesibilidad al punto de monitoreo localizada en la Escuela Profesional Ingeniería Civil de la UNISCJSA. La recolección de datos del PM_{2.5} y CN, se efectuó durante el periodo de febrero a octubre del 2024.

Asimismo, se tomó en consideración el Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad de Aire, donde establece el número mínimo de estaciones de monitoreo conforme al número total de habitantes. En este caso, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI] (2018), registró un total de 27 790 de habitantes en la ciudad de Chanchamayo.

Tabla 4.

Número mínimo de estaciones de monitoreo de calidad del aire

Población (miles de habitantes)	Número mínimo de estaciones de monitoreo
0 - 249	1
250 – 749	2
750 – 999	3
1 000 – 1 499	4
1 500 – 1 999	5
2 000 – 2 749	6
2 750 – 3 749	7
3 750 – 4 749	8
4 750 – 5 999	9
> 6 000	10

Fuente. MINAM (2019)

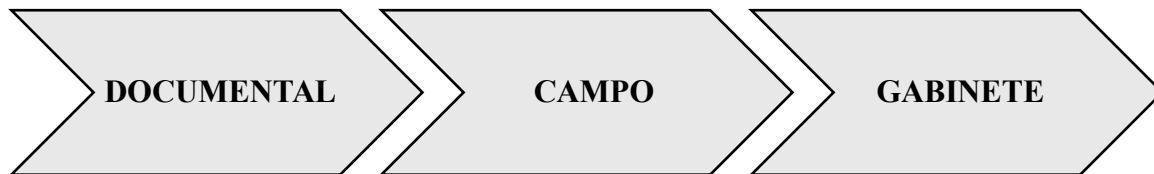
3.4. Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Procedimientos

El trabajo de investigación se empleó a través de las siguientes etapas (documental, campo y gabinete).

Figura 8.

Etapas de la investigación



Nota. Mecanismo de la investigación dividida en tres etapas

a) *Etapa documental*

Se recopiló toda información relacionada a los contaminantes atmosféricos ($PM_{2.5}$ y CN) y equipos (PurpleAir Pa-II y Observe Air DST), a fin de realizar la correcta instalación y manipulación durante los monitoreos. Para ello, se llevó las coordinaciones previas.

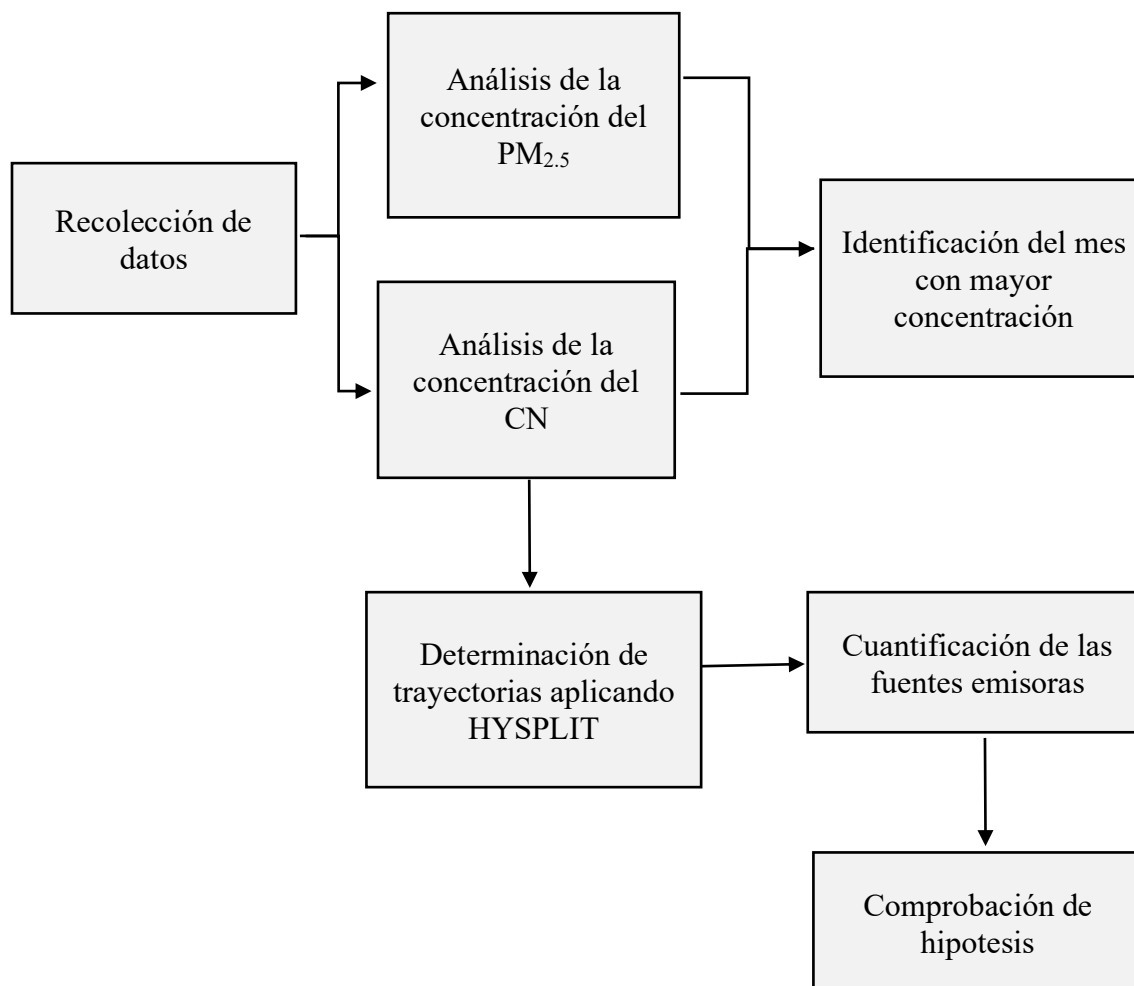
- Punto de monitoreo: Escuela de Ingeniería Civil de la UNISCJSA

b) *Etapa de campo*

El proceso en el campo se desarrolló a través de los siguientes pasos (Figura 7).

Figura 9.

Proceso metodológico de la etapa de campo



En el monitoreo del material particulado, se utilizó el sensor óptico PurpleAir PA-II el cual funciona mediante la detección de ondas electromagnéticas (haz de luz), tomando en cuenta el manual del Air Quality Sensor Performance Evaluation Center (AQ-SPEC). El sensor posee contadores láser de partículas, que permite la medición en tiempo real de las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀. Las visitas coincidirán con el monitoreo del CN.

Figura 10.

Sensor óptico PurpleAir PA-II



Nota. Equipo utilizado para la obtención del número de partículas del PM_{2.5} en tiempo real. Fuente. (AQ-SPEC, 2017).

Para el monitoreo del CN, se utiliza la unidad ObservAir DST, mediante el método térmico-óptico. La unidad cuenta con un fotómetro de absorción de aerosoles, que permite la medición de CN en la atmósfera, la visita fue cada dos semanas, para el cambio de la pestaña de filtro de cuarzo.

La medición dura desde febrero a octubre en la ciudad de Chanchamayo y se comparará la concentración con la base de datos registrados de forma mensual.

Figura 11.
ObservAir DST



Nota. Sensor utilizado para monitorear el CN en tiempo real. Fuente. (Observe Air, 2023)

Para la determinación de la procedencia de los contaminantes atmosféricos (CN), se efectuó a partir del análisis de la trayectoria de las masas de aire, aplicando el modelamiento HYSPLIT. Para ello, se consideró una altura de 500 m sobre el nivel del suelo.

En las siguientes figuras se precisa el procedimiento para la configuración del HYSPLIT.

Figura 12.

Procedimiento para la configuración del modelo HYSPLIT



Nota. El modelo HYSPLIT cuenta con información de diversas estaciones meteorológicas. Esta información se puede emplear directamente del sitio web o descargando datos históricos. Fuente. (NOAA, 2024) (<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).

Figura 13.

Selección del modelo de trayectoria



Nota. HYSPLIT proporciona información de trayectorias de pronóstico, trayectorias de archivo, previsión de trayectorias precalculadas para EE. UU y entre otros. Para el presente estudio se utilizó “trayectorias de archivo”. Fuente. (NOAA, 2024) (<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).

Figura 14.

Selección del número de lugares de inicio y tipo de trayectoria

Número de lugares de inicio de la trayectoria

1 2 3

Tipo de trayectoria

Normal Matriz Conjunto Frecuencia

Nota: Si se elige solo una ubicación de origen, se presentarán más opciones para seleccionar la ubicación en la página siguiente, como elegir por latitud/longitud, por ID de WMO o por ubicación de la planta. Las ubicaciones de origen múltiples limitan la entrada solo a posiciones de latitud/longitud. Esta opción se ignora para el conjunto de trayectorias y la frecuencia.

Siguiente>>

Nota. El modelo cuenta con trayectoria normal, matriz de trayectoria, conjunto de trayectorias y frecuencia de trayectorias. Se opta por el tipo de trayectoria normal.

Fuente. (NOAA, 2024) (<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).


Figura 15.

Selección de meteorología y coordenadas

Trajectory Calculation

Meteorology: REANALYSIS (global, 1948-present) [More info](#)

Source Location (enter using **one** of the following methods):



Click a location on the map or select from below:

Decimal Degrees Latitude: -11.056 N Longitude: -75.331 W

DDD/MM/SS Latitude: Deg. Min. Sec. N Longitude: Deg. Min. Sec. W

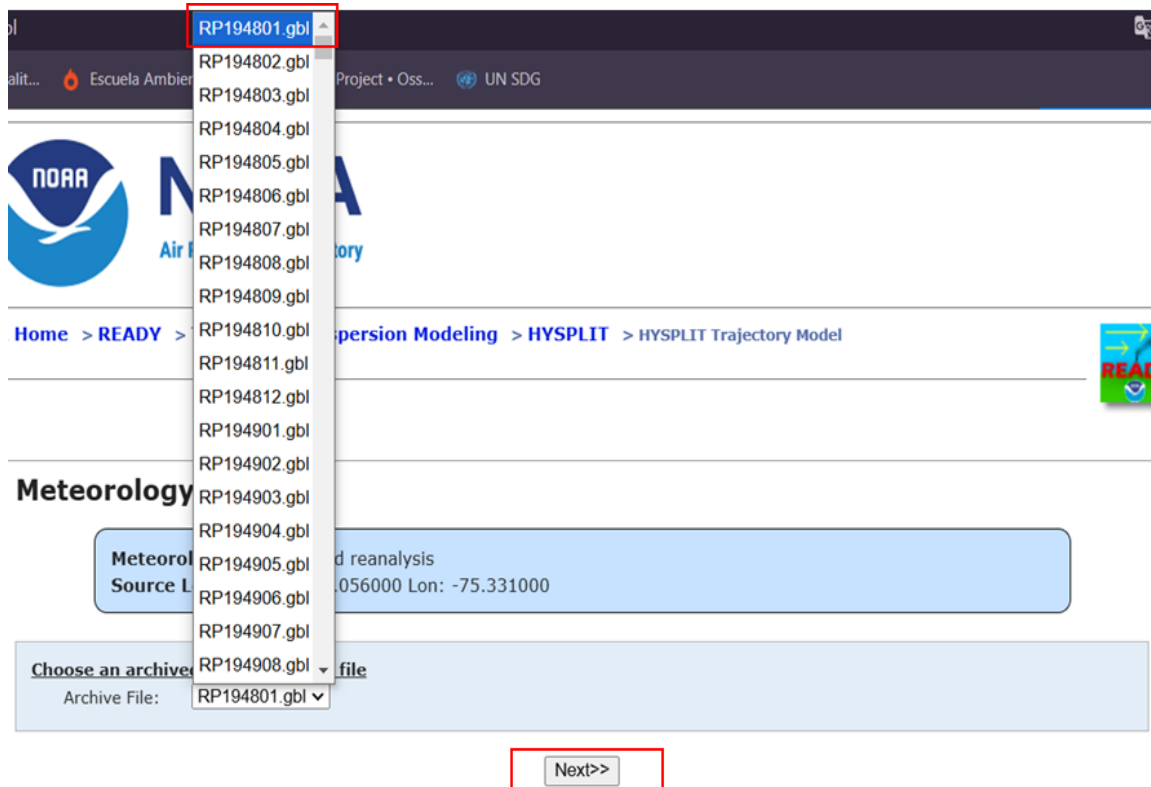
City (Country or State): name: lat: lon:

Airport or WMO ID (i.e., dca): ID Lookup

Nota. Se insertan las coordenadas correspondientes del lugar de estudio y se escoge la meteorología REANALYSIS (GLOBAL, 1948-actualidad). Fuente. (NOAA, 2024) (<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>)

Figura 16.

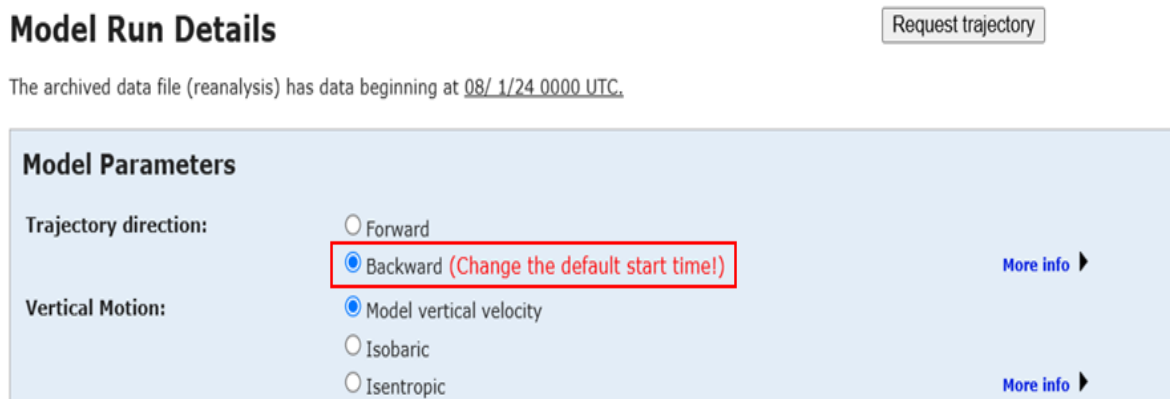
Selección del correspondiente archivo



Nota. El modelo muestra archivos generados por mes y año. Fuente. (NOAA, 2024) (<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).

Figura 17.

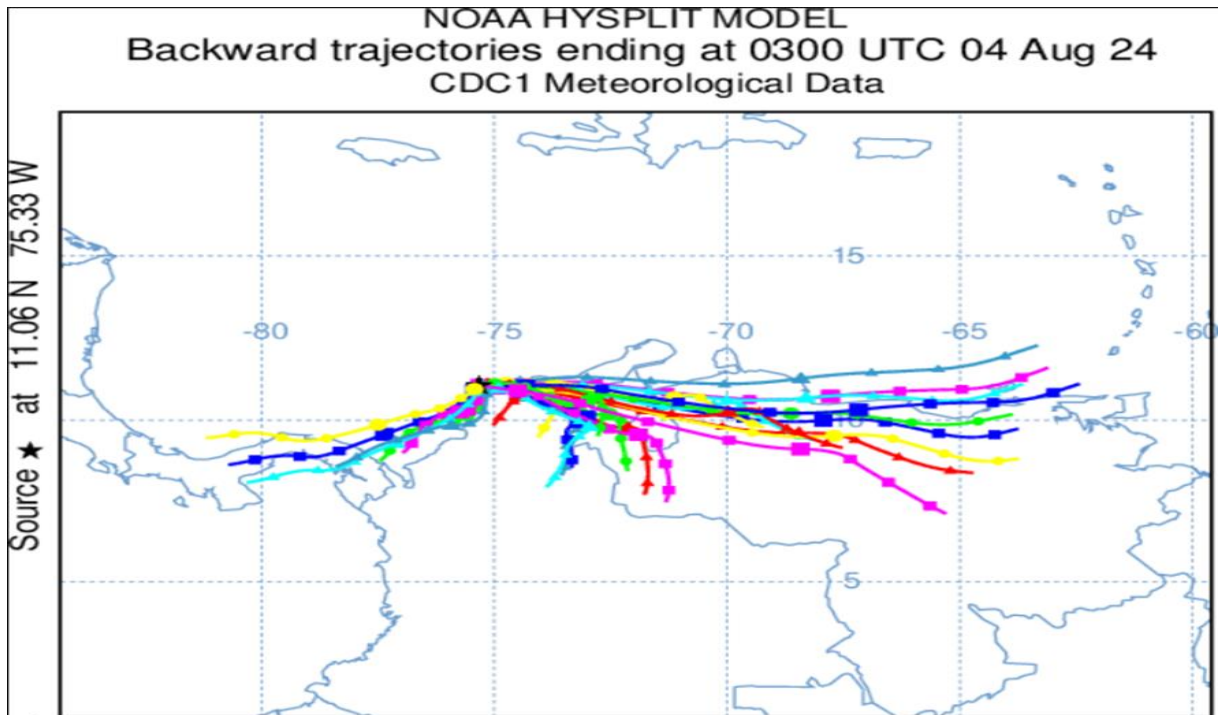
Selección de la dirección de trayectoria y movimiento vertical



Nota. Se detalla la dirección de la trayectoria, el movimiento vertical, altura de nivel (500 m.), entre otros. Fuente. (NOAA, 2024) (<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).

Figura 18.

Mapa de trayectorias de las masas de aire



Nota. La página web muestra el resultado de acuerdo con las especificaciones detalladas anteriormente. Fuente. (NOAA, 2024) (<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).

c) Etapa gabinete

Los datos obtenidos durante los monitoreos, se insertó en el software RStudio con el objetivo de determinar el comportamiento de las partículas (PM_{2.5} y CN) en periodos secos y lluviosos.

Por otra parte, para el modelamiento se utilizó el software HYSPLIT para cuantificar y determinar el origen de las retro trayectorias de los contaminantes del CN.

3.4.2. Técnicas e instrumentos

Se emplearon métodos de recolección y análisis de datos, respaldados por instrumentos especializados, lo que permitió obtener resultados precisos y confiables.

a) Observación directa y monitoreo de las contaminantes

La observación consistió en el monitoreo de concentraciones de material particulado fino (PM_{2.5}) y carbono negro (CN), mediante sensores electrónicos con mediciones automáticas en tiempo real. Este procedimiento se llevó a cabo a través de la

manipulación de los sensores instalados en un punto fijo de monitoreo, sin interferencia manual en la captación de datos.

Los instrumentos utilizados fueron:

- Sensor óptico PurpleAir PA-II, para la medición en tiempo real de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en el aire. Este instrumento funciona como un contador de partículas óptico, ya que permite detectar y cuantificar las partículas suspendidas presentes en el ambiente.
- ObserAir DST, equipo especializado para la medición de CN mediante el método térmico-óptico, con una frecuencia de muestreo quincenal. Se reemplazó el filtro de cuarzo periódicamente, para evitar la saturación de datos

b) Análisis de trayectorias atmosféricas

Se aplicó el modelo HYSPLIT para identificar la procedencia de las masas de aire, que transportan partículas contaminantes hacia Chanchamayo. Las trayectorias regresivas se modelaron a una altura de 500 m. s. n. m., enfocándose en los meses críticos del año (julio, agosto y setiembre), considerados de mayor concentración de emisiones.

c) Revisión documentaria

Esta técnica consistió en la exploración y análisis de literatura científica, normativas ambientales, manuales técnicos y otros documentos relevantes, con el objetivo de fortalecer el marco teórico de la investigación y apoyar la interpretación de los resultados empíricos obtenidos.

d) Registro de campo

Durante el periodo de febrero a octubre, se realizaron visitas periódicas de monitoreo, utilizando hojas de campo como instrumento de registro. Estas permitieron consignar información relevante como condiciones meteorológicas, funcionamiento de los sensores, observaciones técnicas y fechas de recolección.

e) Procesamiento y análisis de datos

El análisis estadístico y la visualización de los datos se llevaron a cabo en RStudio, utilizando paquetes especializados para generar gráficos como rosas de viento y análisis de frecuencia, lo que facilitó la interpretación del comportamiento de los contaminantes atmosféricos en la zona de estudio.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Determinación de la concentración del PM_{2.5}

La Figura 19 se observa la variabilidad diaria promedio de la concentración del PM_{2.5}, en el que setiembre resalta por obtener valores muy elevados, específicamente en los días 05, 12 y 14, registrando en 109.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 107.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 105.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De manera similar, Huanca *et al.* (2024), en su estudio en la Paz-Bolivia, hallaron niveles altos entre 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 135 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante los meses secos (junio-setiembre). En otro sentido, el 03 de mayo se detectó la más mínima cantidad, alcanzando 0.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentración.

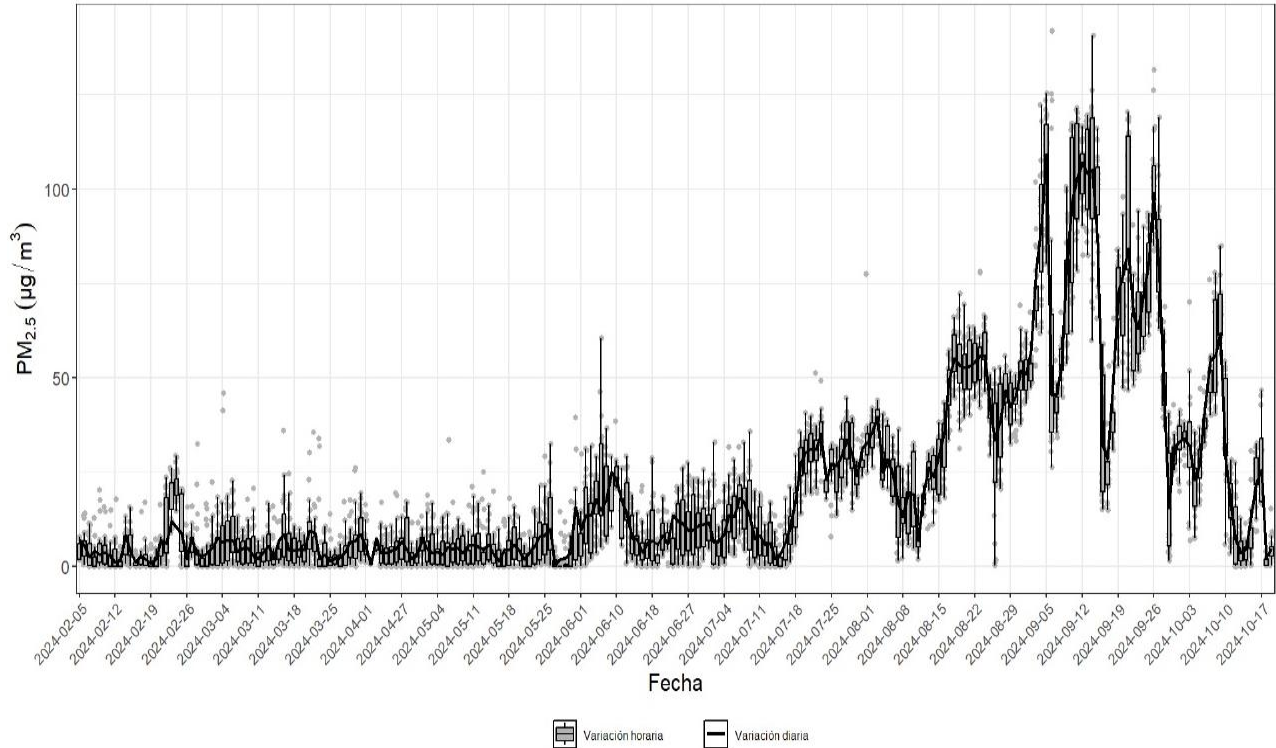
Además, se presencia que durante febrero hasta junio se mantuvo de forma continua en las cantidades de concentraciones del PM_{2.5}, sujetándose por debajo de los 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo cual coincide con los meses húmedos, siendo las precipitaciones caracterizadas por disponer un efecto de lavado atmosférico, disminuyendo notablemente las concentraciones en el aire y que a su vez son eficaces para remover el PM, según lo propuesto por Ramos *et al.* (2010). De igual modo, Díaz y Páez (2006) señala que existe una disminución más del 60 % en las concentraciones promedio del PM_{2.5} durante la temporada con precipitaciones.

Por otra parte, en la Figura 18 muestra el comportamiento horario, en el que el 05 de septiembre a las 11:00 horas alcanzó 125.36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ considerándose la cantidad máxima, además, se encuentra por encima al límite permitido por los Estándares de Calidad Ambiental del aire (ECA), en donde establece como valor máximo diario de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones elevadas encajan con los eventos suscitados por los incendios forestales en la región, tal como detectaron en el estudio de Serna *et al.* (2020) en Manizales-Colombia y en el reporte del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA] (2023) en algunas ciudades de Sudamérica.

Mientras que, el 03 de mayo a las 10:00 horas logró captar muy bajas concentraciones consiguiendo un 0.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 19.

Comportamiento promedio de la concentración del $PM_{2.5}$ en una escala de tiempo (días) desde febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.



En la Tabla 5, denota el resumen estadístico para la concentración del $PM_{2.5}$. En el que, setiembre resalta de forma considerable, adquiriendo para el primer cuartil Q_1 (25 %) los datos son menores o iguales que $48.812 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en el segundo cuartil Q_2 (50 %) los valores menores o iguales a $74.917 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en el tercer cuartil Q_3 (75 %) los datos menores o iguales que $89.527 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguidamente octubre descende con una mediana (Q_2) de $25.621 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un Q_3 (75 %) de $33.462 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En contraste, durante febrero a mayo presentan las cantidades más mínimas con medianas (50 %) entre $3.375 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $4.514 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $4.086 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $4.490 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por ende, se localiza por debajo del límite establecido del ECA-aire ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Por otra parte, a partir de junio, la desviación estándar aumenta de forma progresiva por lo que respecta una alta variabilidad, llegando al nivel más elevado en setiembre con $26.298 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un rango hasta $93.563 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 5.

Estadística descriptiva para la concentración promedio del PM_{2.5} desde febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.

Mes	Mediana	Desviación estándar	Rango	Q ₁	Q ₃
Febrero	3.375	3.077	11.101	2.153	7.038
Marzo	4.514	2.245	8.012	3.349	6.752
Abril	4.086	1.929	6.857	3.252	5.029
Mayo	4.490	2.849	15.423	3.484	5.661
Junio	11.076	5.335	21.152	7.447	13.861
Julio	16.981	10.624	33.015	7.785	28.457
Agosto	35.688	14.434	49.198	24.728	50.448
Setiembre	74.917	26.298*	93.563	48.812	89.527
Octubre	25.621	18.249	59.558	10.142	33.462

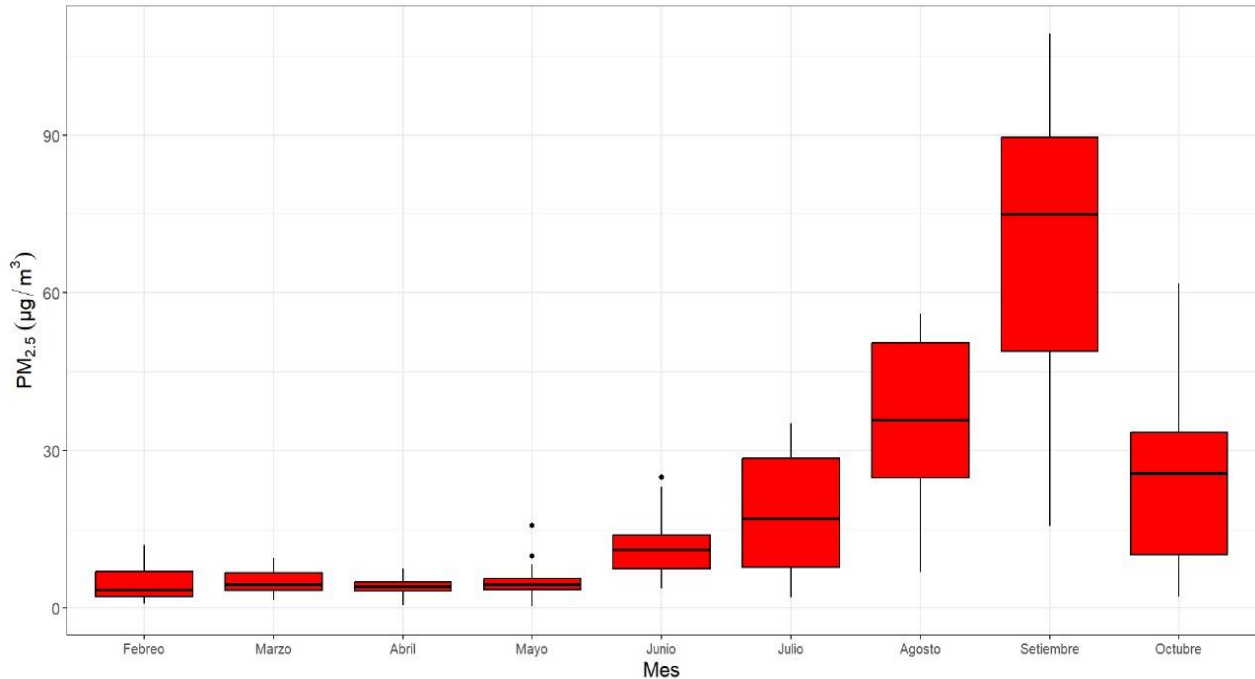
Nota. Q₁ = Cuartil inferior, Q₃ = Cuartil superior. *Valores más elevados en comparación a los otros meses estudiados.

En la Figura 20, presenta el comportamiento de las cajas y bigotes de los niveles de concentración del PM_{2.5} durante el periodo (febrero a octubre) de ejecución de monitoreo, en donde establece una alta variabilidad. Durante setiembre, se registraron los valores más alto, coincidiendo con el estudio de Warthon *et al.* (2024) que reportaron promedios hasta 78.3 µg/m³ en Cusco, debido a la influencia de la quema de residuos agrícolas y disminución de precipitaciones.

Además, la transición de junio a agosto manifiesta una tendencia creciente, obteniendo medianas de 16.981 µg/m³ a 35.688 µg/m³, mientras que, abril alcanzó mínimas cantidades de concentración. Asimismo, a partir del mes de febrero a mayo se mantiene de forma constante, cuyos valores son inferiores a 05 µg/m³. Este comportamiento respecta debido a la alta frecuencia de lluvias que logran desarrollar la remoción de partículas suspendidas en el aire, tal como reporta en el estudio de Capuena y Angulo (2019), que obtuvieron una disminución hasta 4.2 µg/m³ en la región Moyobamba, esta variabilidad coincide con los hallazgos de los datos obtenidos (Figura 20) en Chanchamayo durante los mismos meses.

Figura 20.

Diagrama de caja y bigote de las medias mensuales de la concentración del PM_{2.5}, desde febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.



4.2. Determinación de la concentración del CN

4.2.1. Variación horaria de la concentración del CN

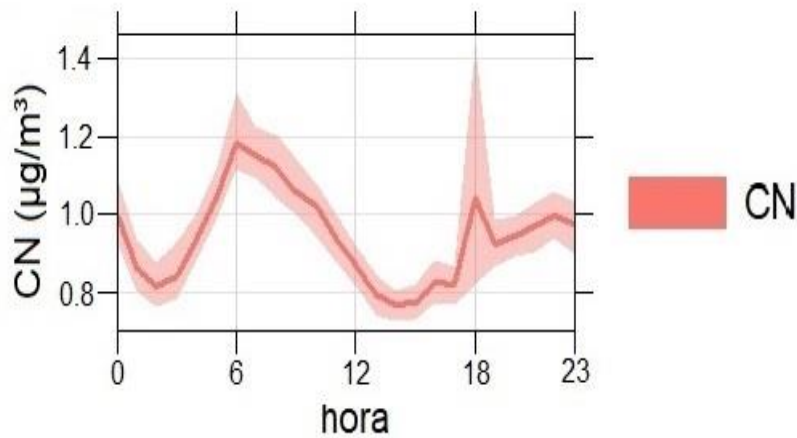
En la Figura 21, presenta la variación horaria de las concentraciones de CN a lo largo del día. Entre las 00:00 horas y las 02:00 horas, se registra una disminución progresiva de $1.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Posteriormente, de las 02:00 horas a las 06:00 horas, se observa un aumento en los niveles de CN, alcanzando un valor máximo de $1.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 06:00 horas. Entre las 06:00 horas y las 13:00 horas, se produce una reducción considerable, alcanzando una concentración mínima de $0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Finalmente, entre las 13:00 horas y las 23:00 horas, se observa un incremento gradual, estabilizando en $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al final del intervalo.

El valor máximo observado de CN se registró a las 18:00 horas, con una concentración de $1.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, este hallazgo es consistente según el reporte de Alver *et al.* (2020), que señala que las concentraciones del CN tienden a incrementarse a lo largo de las horas pico (18:00 horas), por causa de la emisión directa generada por el parque automotor, este comportamiento coincide con los resultados adquiridos, en el que aumenta de forma considerable en los mismos intervalos de tiempo en la ciudad de Chanchamayo.

Así pues, Beard *et al.* (2012) informa que, en las zonas tropicales en las horas de la madrugada, las condiciones atmosféricas (inversión térmica y baja altura de mezcla) condicionan la dispersión vertical de los contaminantes, en consecuencia, se acumula en las capas más bajas de la atmósfera.

Figura 21.

Comportamiento promedio de la concentración del CN en una escala de tiempo (diurno) desde febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.

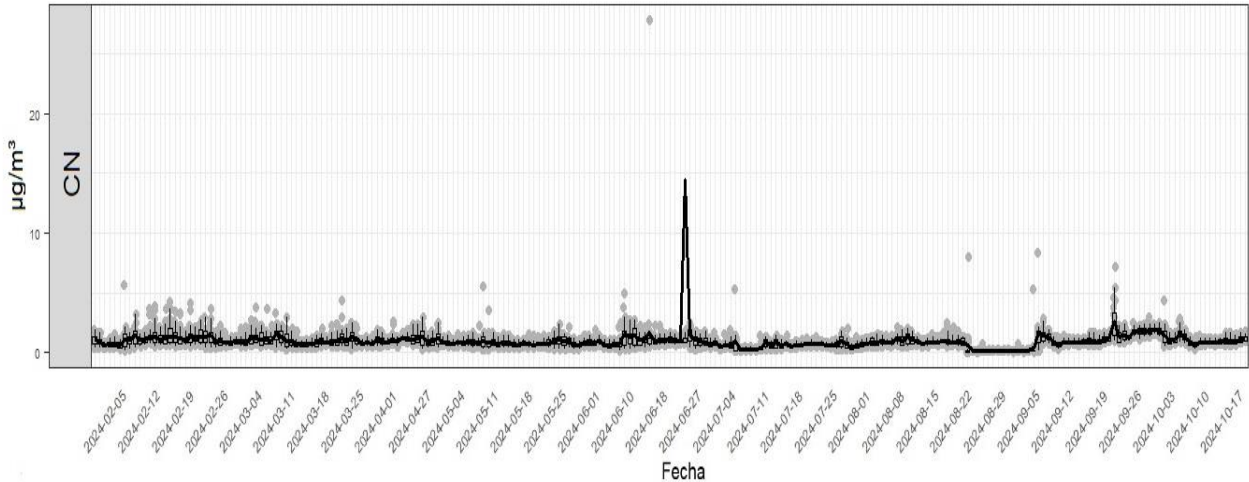


En la Figura 22, se presentan la variación horaria y diaria de las concentraciones de CN durante el periodo comprendido febrero a octubre. En cuanto a la variación horaria, las concentraciones fluctuaron entre 0 µg/m³ y 27 µg/m³, con el valor máximo registrado de 27 µg/m³ el 15 de junio a las 18:00 horas. De manera similar Alver *et al.* (2020) reportaron el aumento de las concentraciones promedio en 12.5 µg/m³ durante las horas punta (17:00 horas – 19:00 horas) por efecto a la incidencia del tráfico vehicular, así como también, reporta Liñán *et al.* (2020) que encontraron valores muy elevados durante las mismas horas. Por otro lado, en la variación diaria, las concentraciones de CN oscilaron entre 0 µg/m³ y 14 µg/m³, alcanzando un valor máximo de 14.407 µg/m³ el 26 de junio.

Por otra parte, Este valor se mantiene dentro de los límites establecidos (50 µg/m³) por los Estándares de Calidad del Aire, lo que indica que las concentraciones de CN no exceden los niveles que podrían representar un riesgo para la salud o el medio ambiente, según la normativa vigente.

Figura 22.

Comportamiento promedio de la concentración del CN en una escala de tiempo (días) desde febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.



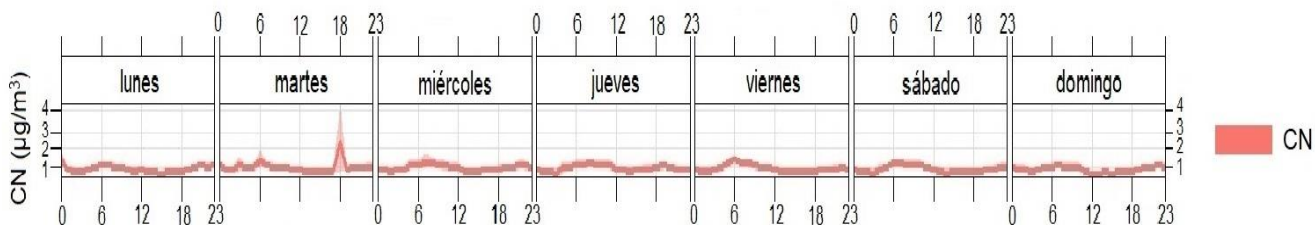
4.2.2. Variación semanal de la concentración del CN

En la Figura 23, se observa el comportamiento semanal del CN en una escala de tiempo por cada 06 horas, de las cuales fluctúan entre 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 2.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, registrando el valor máximo el día martes a las 18:00 horas. Esta variabilidad es generada por la alta demanda de tránsito de vehículos a las horas punta (18:00 horas), este hallazgo se respalda con los reportes Liñán *et al.* (2020) y Alver *et al.* (2020), evidenciando que el segundo pico vespertino incrementa el nivel de concentración del CN, obteniendo hasta 10.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, debido al impacto del parque automotor.

Como también, se visualiza que los días martes, miércoles y jueves manifiestan los niveles más altos de concentración del CN. En contraste, los días sábado y domingo presentan una reducción continua, por lo que se asocia a la disminución de las actividades antropogénicas, de igual manera, se refleja en la ciudad como Manizales-Colombia (Serna *et al.* 2020). Cabe destacar, que entre las horas de 17:00 a 19:00, suele generarse una inversión térmica (Muñoz *et al.* 2021), que como efecto incrementa los niveles de concentración del contaminante en el aire.

Figura 23.

Comportamiento promedio de la concentración del CN en una escala de tiempo (horas) en los días de la semana desde febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024

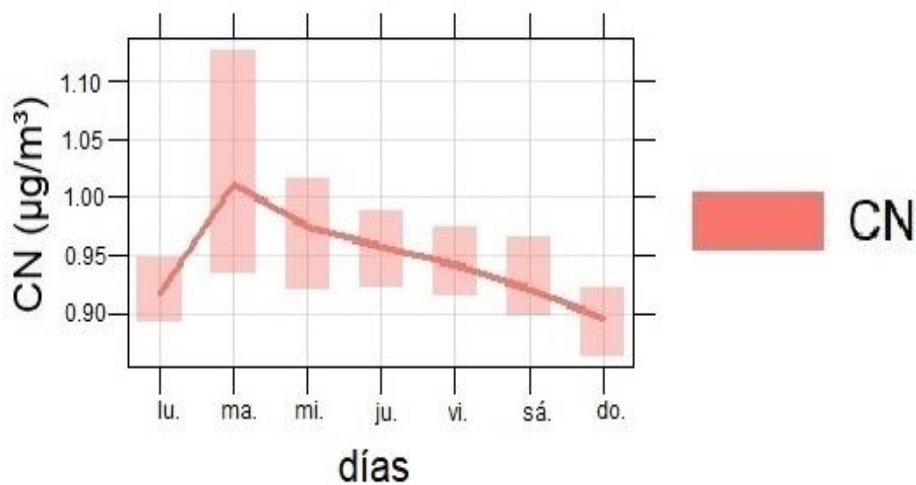


En la Figura 24, presenta la variación diaria de las concentraciones de CN, de lunes a domingo. Se observa que los martes presentan la mayor concentración, con un valor de $1.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguidos de los días miércoles y jueves, con concentraciones de $0.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Los niveles más bajos se registran durante los fines de semana, con valores inferiores a $0.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$, debido a la baja influencia del tránsito vehicular.

Además, la Figura 27 se visualiza la fotografía captada el día martes 17 de setiembre tomada por la estación meteorológica desde el punto de monitoreo, ubicado en la escuela profesional Ingeniería Civil de la UNISCJSA, donde respecta una humareda significativa provocada por los incendios de biomasa, afectando a las ciudades aledañas.

Figura 24.

Comportamiento promedio de la concentración del CN en una escala de tiempo (días laborables y no laborables) desde febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.



4.2.3. Variación mensual de la concentración del CN

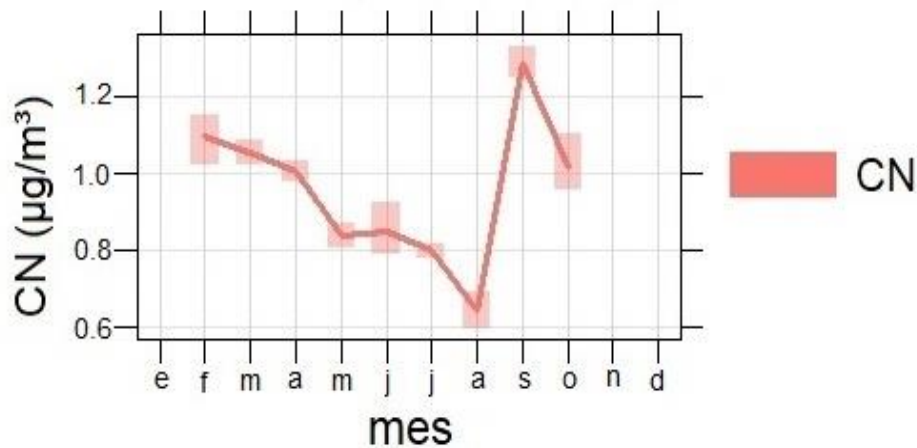
La Figura 25, se presencia la variabilidad mensual de las concentraciones del CN, comprendido entre febrero a octubre en la ciudad de Chanchamayo, en el que se evidencia una tendencia no lineal, iniciando un descenso entre los primeros siete meses estudiados, resaltando valores entre $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $0.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$, coincidiendo con el periodo húmedo. Este comportamiento encaja con el estudio de Suárez *et al.* (2017), el cual observaron valores promedios entre $0.81 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 0.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante en los meses lluviosos en Huancayo. Asimismo, Zegarra y Milton (2019) reportaron valores inferiores a $0.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en los meses con alta frecuencia de precipitación en la ciudad de Arequipa.

No obstante, en setiembre se resaltó por alcanzar el nivel más elevado, obteniendo hasta $1.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Del mismo modo, Beard *et al.* (2012) en Pucallpa registraron altas concentraciones de CN de hasta $8.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, debido a que suscitaron eventos relacionados a los incendios forestales durante en setiembre. La combinación de las condiciones climatológicas como la baja frecuencia de precipitación, altas temperaturas y baja humedad relativa, beneficia en la acumulación de los contaminantes, desencadenándose la inversión térmica, mayormente acontece en ambientes tropicales, según lo manifestado por Araneo *et al.* (2021).

Finalmente, en octubre, se documenta una disminución moderada, con una concentración de $1.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$, indicando una reducción en comparación a setiembre. Estos hallazgos determinan que las emisiones del contaminante CN es influenciada por la presencia de fuentes locales y regiones.

Figura 25.

Comportamiento promedio de la concentración del CN en una escala de tiempo (mensual) desde febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.



En la Tabla 6, se observa el resumen estadístico para la concentración del CN durante los meses estudiados. En donde señala que el mes de setiembre presenta una diferencia significativa, obteniendo como primer cuartil Q_1 (25 %) valores menores o iguales que $0.917 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para el segundo cuartil Q_2 (50 %) valores menores o iguales que $1.173 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para el tercer cuartil Q_3 (75 %) datos menores o iguales a $1.713 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con una desviación estándar de $35.181 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un valor extremo de $193.958 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que demuestra la ocurrencia de eventos de altos niveles de concentraciones de CN, que a su vez refleja una mayor dispersión diaria de datos en contraste con los demás meses.

Desde otro punto, el mes de agosto alcanzó las cantidades más mínimas, adquiriendo como primer cuartil Q_1 (25 %) valores menores o iguales que $0.167 \mu\text{g}/\text{m}^3$, segundo cuartil Q_2 (50 %) valores menores o iguales que $0.840 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para el tercer cuartil Q_3 (75 %) datos menores o iguales a $0.913 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con una desviación estándar $0.448 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un rango de $1.701 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Así pues, la variabilidad mensual del CN en la ciudad de Chanchamayo se encuentra vinculada con las emisiones de fuentes locales y aportes regionales.

Tabla 6.

Estadística descriptiva para la concentración promedio del CN durante febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.

Mes	Mediana	Desviación estándar	Rango	Q_1	Q_3
Febrero	1.084	0.267	0.571- 1.460	0.977	1.285
Marzo	1.028	0.223	0.675-1.512	0.880	1.205
Abril	0.934	0.173*	0.773-1.360	0.846	1.132
Mayo	0.813	0.201*	0.575-1.534	0.720	0.952
Junio	0.905	2.498*	0.287-14.408	0.652	1.080
Julio	0.787	0.186	0.419-1.279	0.709	0.908
Agosto	0.840	0.448*	0.151-1.701	0.167	0.913
Setiembre	1.173	35.181^{*b}	0.673- 193.958	0.917	1.713
Octubre	0.977	0.259	0.419-1.627	0.852	1.145

Nota. Q_1 = Cuartil inferior, Q_3 = Cuartil superior, *Indican que son datos no normales para la prueba estadística de Anderson Darling. ^bIndica que setiembre presenta diferencia significativa en comparación de los otros meses de estudio.

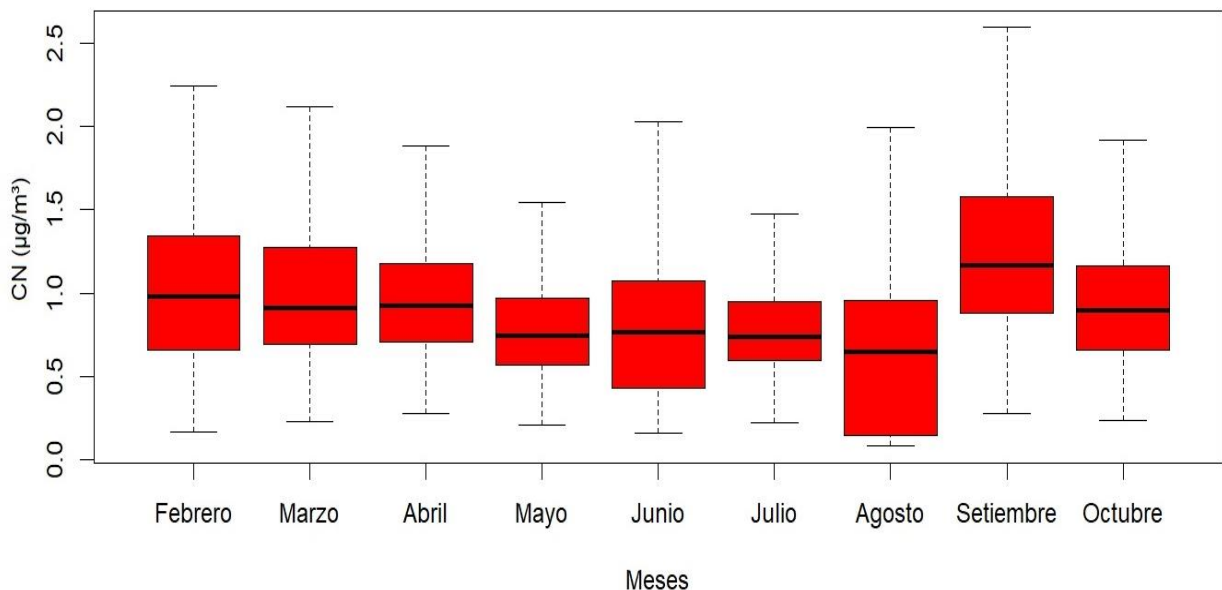
En la Figura 26, representa un diagrama de caja y bigotes que visualiza la variación mensual de las concentraciones del CN, desde febrero a octubre. La grafica utiliza una escala de 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, donde permite visualizar las dispersión, tendencia central y presencia de valores extremos. Los meses de julio y agosto muestran los niveles más bajos de concentración, lo que puede estar relacionado con las condiciones climáticas (precipitaciones) y los patrones de actividad humana en esos meses.

Posteriormente, en octubre, se observa una reducción moderada en las concentraciones de CN. Este descenso puede explicarse por las precipitaciones registradas en la zona de estudio, las cuales favorecieron la limpieza de partículas contaminantes del aire, este fenómeno se denomina lavado atmosférico que se encuentra descrito por Araneo (2021). Además, la Figura 19 son las imágenes captadas por la cámara de la estación meteorológica en ese periodo evidencian este fenómeno, mostrando cielos más limpios y una disminución en la presencia de partículas en suspensión. Este patrón subraya la relación directa entre las precipitaciones y la reducción de los niveles de contaminantes atmosféricos en la región.

Igualmente, la diferencia significativa se evidencia en los valores estadísticos de la Tabla 6, reflejando un comportamiento atípico en el mes de setiembre, observando un nivel superior en la concentración media y dispersión de datos.

Figura 26.

Diagrama de caja y bigote de las medias mensuales de la concentración del CN, durante febrero a octubre, en la ciudad de Chanchamayo, 2024.

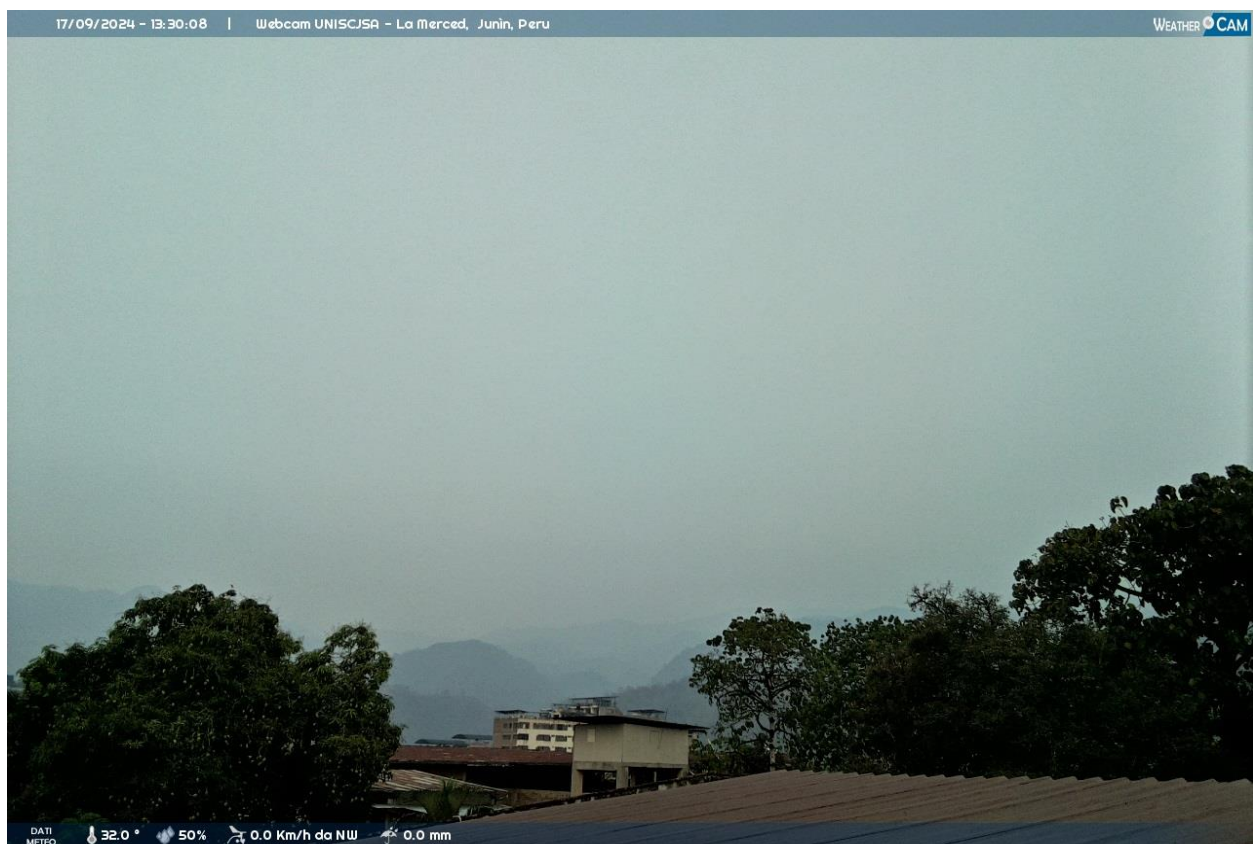


En los últimos años, el PNUMA ha registrado que el aumento de las concentraciones del CN, causado por el incremento de los incendios forestales descontrolados originados en algunas ciudades de América del Sur (OMS, 2024). En la Figura 27 denota el incendio desarrollado en las partes de las zonas boscosas de la ciudad de Chanchamayo, donde el evento perduró aproximadamente por 03 horas, la fotografía fue registrada a las 13:30 horas en el día 17 de setiembre, simultáneamente, se observa un aspecto humareda por toda la ciudad, provocando un cielo denso y con presencia de humo.

Asimismo, en la ciudad de Manizales-Colombia, propuesto por Serna *et al.* (2020), documenta de que el nivel más elevado ($14 \mu\text{g}/\text{m}^3$) fue registrado en setiembre, debido a la alta influencia de los incendios forestales.

Figura 27.

Fotografía registrada en setiembre, captando el aspecto humareda en la ciudad de Chanchamayo



Nota. Fotografía captada por la estación meteorológica, ubicada en la UNISCJSA de la sede La Merced de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil.

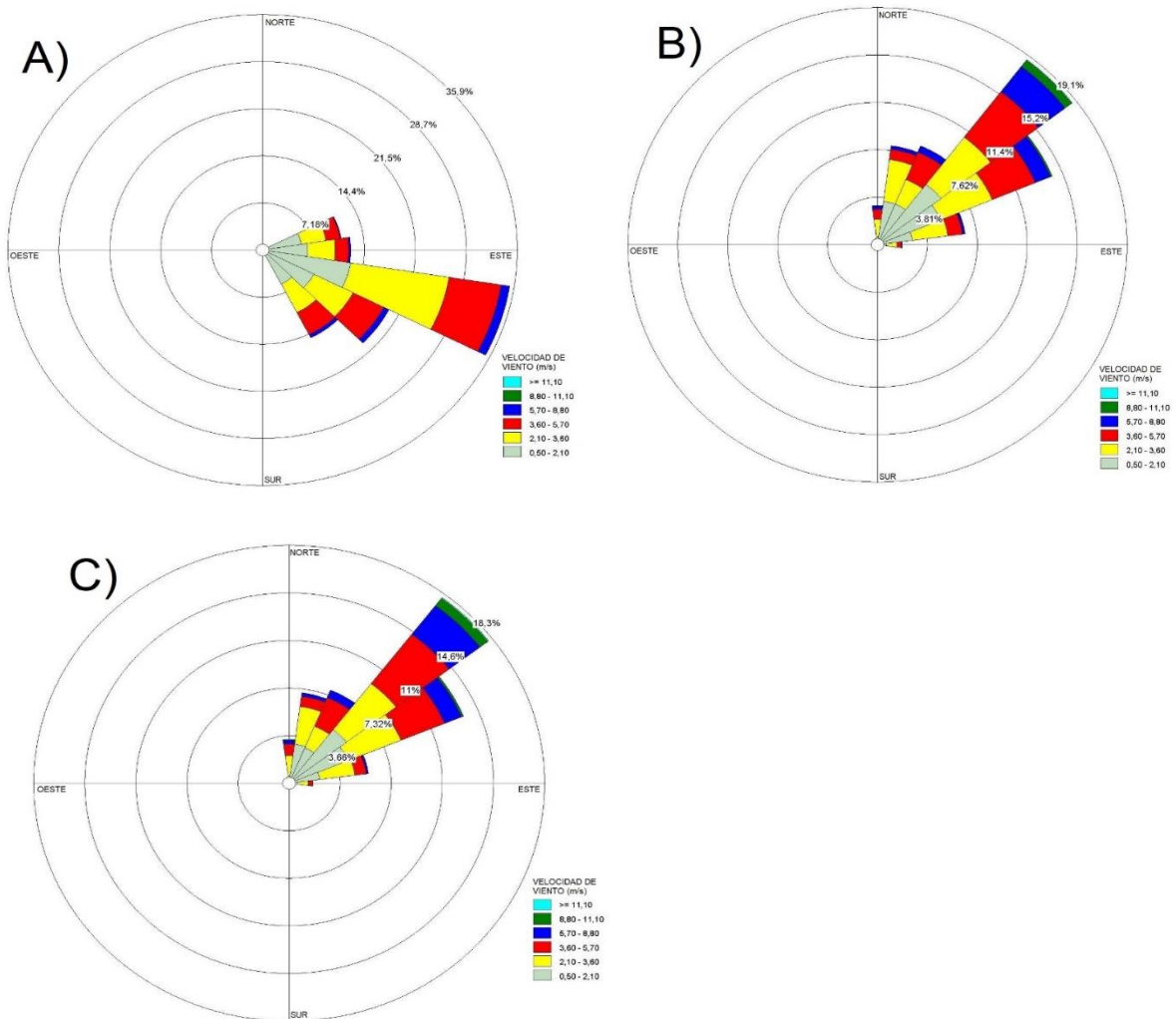
4.3. Retro trayectorias de las masas de aire aplicando el modelo HYSPLIT

4.3.1. Análisis del origen y trayectorias de las masas de aire hacia la zona de estudio

La Figura 28 muestra la rosa de viento en relación con la velocidad de viento de los meses julio, agosto y setiembre. En el que julio predomina los vientos del sureste (SE), con velocidades de hasta 8.80 m/s. En contraste, agosto y setiembre los vientos provienen del noreste (NE), cuyas velocidades alcanzaron hasta 11.10 m/s.

Figura 28

Rosa de viento de julio, agosto y setiembre, teniendo como punto de origen la ciudad de Chanchamayo, 2024.



Nota. Cada sección se clasifica a través de colores la velocidad de viento. A) julio, B) agosto y C) setiembre

La Figura 29 representa las trayectorias de las masas de aire aplicando el modelo HYSPLIT, a una altura de 500 m correspondiente a los meses de julio (A), agosto (B) y setiembre (C). A lo largo del mes de julio, se aprecia una predominancia de trayectoria del este (E) con un 51.6 %.

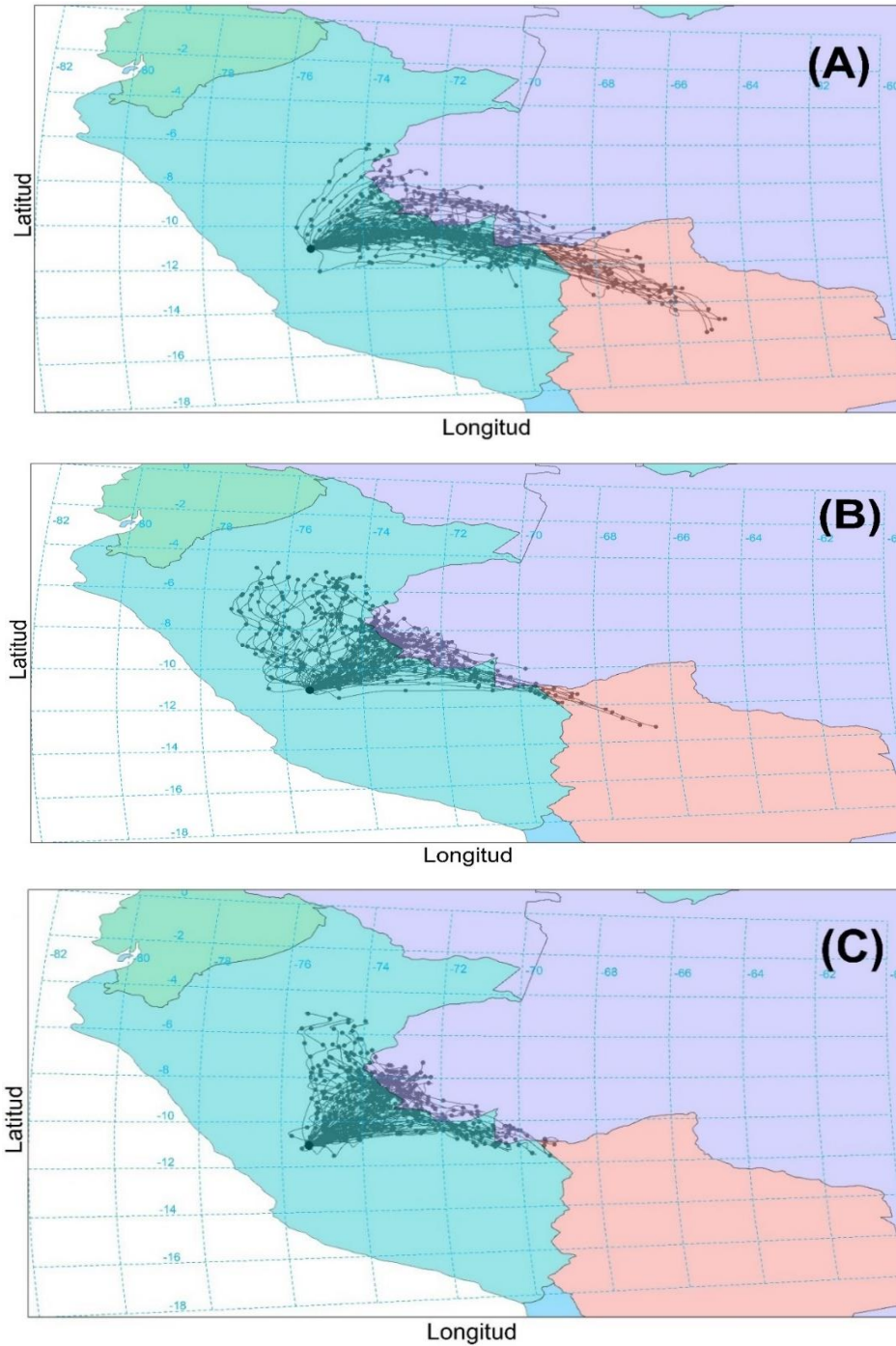
En contraste, durante el mes de agosto y setiembre, se observó un desvío de los vientos se desvía hacia el NE) siendo esta la dirección dominante en setiembre con un 55.6 % de las trayectorias, lo cual coincide con el incremento considerable en los niveles de concentración del PM_{2.5} y CN, cuyos valores máximos se obtuvo en 125.36 µg/m³ y 193.958 µg/m³, que paralelamente se asocia con las quemas agrícolas e incendios forestales suscitados en distintas ciudades, específicamente en regiones amazónicas.

Así también, Teerachai *et al.* (2020) evidencia que más del 60 % de la trayectoria de contaminantes provienen de fuentes regionales. De la misma manera Salina *et al.* (2022), documentó en Pucallpa niveles elevados de CN asociadas con los incendios forestales y con trayectorias predominantes del NE.

Este patrón sugiere una variabilidad estacional en los flujos atmosféricos, lo cual podría tener implicaciones importantes para los modelos de calidad del aire y la dispersión de contaminantes en la región durante estos meses.

Figura 29.

Trayectoria de las masas de aire a 500 m de altura, teniendo como punto de origen la ciudad de Chanchamayo, 2024. (A) Julio, (B) Agosto y (C) Setiembre



Nota: Trayectorias de masas de aire a un nivel de altura de 500 m, desde el punto de monitoreo de la ciudad de Chanchamayo del año 2024. (A) julio, (B) agosto y (C) setiembre.

4.3.2. *Análisis de clúster según las direcciones predominantes de las masas de aire (N, S, E y O)*

En la Tabla 7 se observa el análisis porcentual de las trayectorias de masas de aire, clasificadas en clústeres (C1, C2 y C3), durante los meses de julio, agosto y setiembre a una altura de 500 m. A lo largo del mes de julio, el C1 representó el 51.6 % de las trayectorias con dirección predominante del este (E), el C2 obtuvo con un 33.3 % siendo proveniente del SE y el C3 adquirió en 15.1 % en NE. En agosto, se presencia una variación en la dirección de los vientos, resaltando el C2 con un 47.3 % en NE, seguido por C1 con un 29 % en E y el C3 alcanzó en 23.7 % en norte (N). Por último, en setiembre el NE del C1, se consolidó como la dirección dominante con un 55.6 %, sin embargo, el C2 obtuvo 24.4 % en E y el C3 adquirió en 20 % en N.

Estos hallazgos obtenidos evidencian una transición estacional en las trayectorias atmosféricas, resaltando el flujo predominante del NE, en el periodo de septiembre. Además, encaja con el incremento en las concentraciones del PM_{2.5} y CN durante ese mes.

Tabla 7.

Porcentaje del clúster de las trayectorias de las masas de aire a 500 m de altura, en los meses de julio, agosto y setiembre, teniendo como punto de origen la ciudad de Chanchamayo, 2024.

Nivel de altura (m)	Mes	Nº de clúster	Porcentaje (%)	Dirección	Predomina
500	Julio	C1	51.6	E	
		C2	33.3	SE	E
		C3	15.1	NE	
	Agosto	C1	29	E	
		C2	47.3	NE	NE
		C3	23.7	N	
	Setiembre	C1	55.6*	NE	
		C2	24.4	E	NE
		C3	20	N	

Nota. *El C1 de setiembre tiene el porcentaje más elevado predominando la trayectoria de masas de aire en NE.

En la Figura 30, se muestran las trayectorias de las masas de aire a 500 m de altitud durante julio, agosto y septiembre, lo que permite visualizar el comportamiento y desplazamiento de los vientos a lo largo del periodo estudiado. Durante julio, la mayor concentración de las trayectorias es proveniente del E, reflejando una dirección predominante en la región.

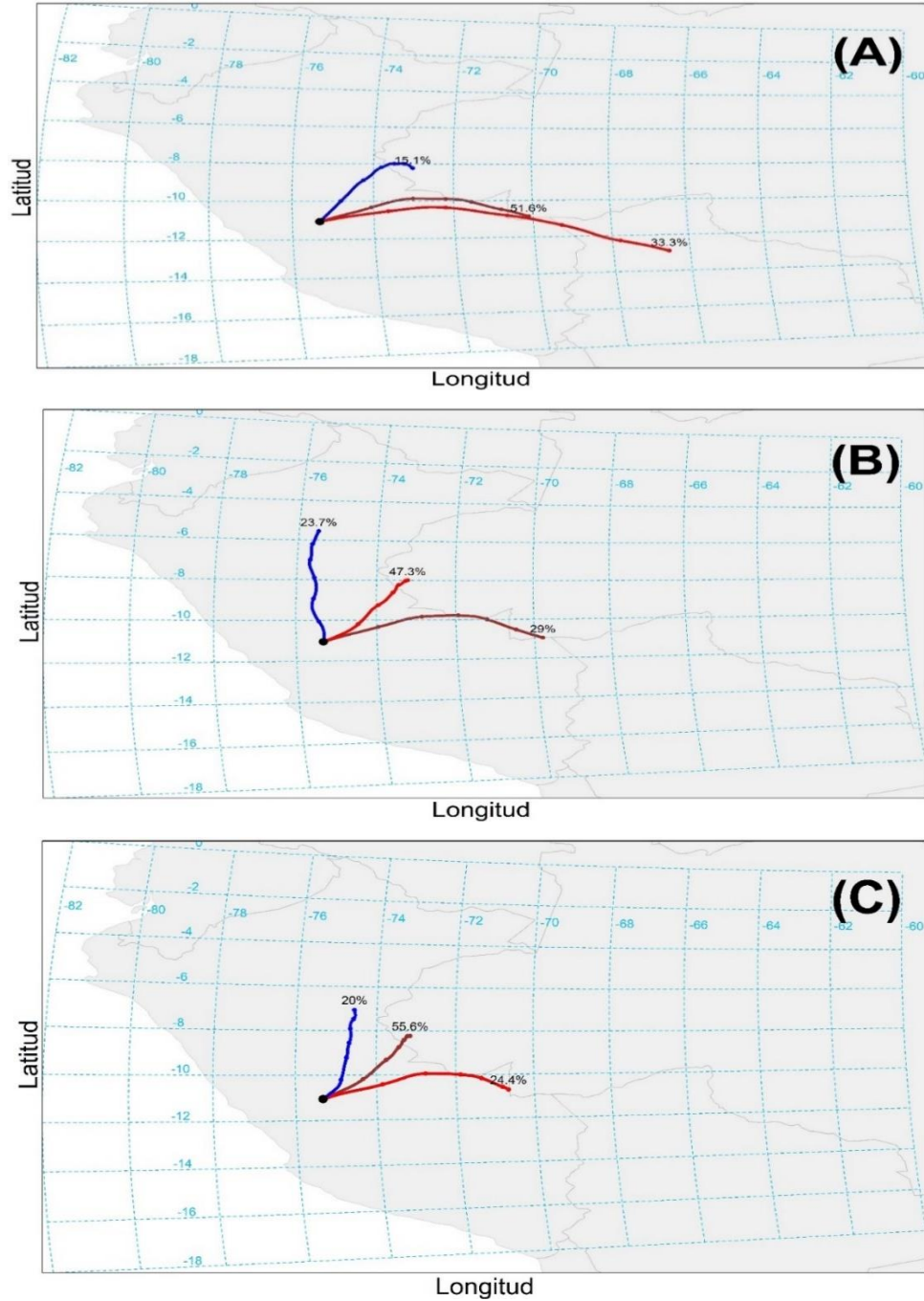
En contraste, en agosto y septiembre, se observa una clara desviación hacia el NE, con un mayor agrupamiento de las trayectorias en esa dirección. Este cambio sugiere una variabilidad en la circulación atmosférica, que podría estar asociada con cambios estacionales o con la interacción de diferentes sistemas meteorológicos en la región. El mapa proporciona una representación visual de estos cambios, permitiendo identificar con claridad el predominio de las trayectorias del noreste en los meses posteriores a julio.

Al comparar estos resultados con estudios previos, se encuentra que investigaciones como la de Teerachai *et al.* (2020), realizadas en el norte de Tailandia, abordan fenómenos similares en cuanto al transporte de contaminantes. En su estudio, los autores emplearon modelos atmosféricos como WRF y HYSPLIT para identificar el transporte de PM_{2.5} durante episodios de quema de biomasa, concluyendo que el monzón de invierno contribuye al transporte de contaminantes en la región a través de dos canales: uno desde el E de Asia hacia Laos y otro desde el NE a Birmania, siendo este último el de mayor influencia en la contribución de emisiones.

Aunque la geografía y los comportamientos climáticos de Chanchamayo y el N de Tailandia son distintos, ambos estudios muestran una relación entre los vientos predominantes y el transporte de partículas atmosféricas. En Tailandia, el viento del noreste juega un papel clave en la dispersión de contaminantes, lo cual guarda semejanza con la influencia de los vientos del noreste observados en nuestra región durante agosto y septiembre. El uso del modelo HYSPLIT en ambas investigaciones, demuestra la capacidad de simular el desplazamiento de las masas de aire y estudia la dispersión de contaminantes en diversas regiones.

Figura 30.

Clúster de las trayectorias de las masas de aire a 500 m de altura, en julio, agosto y setiembre, teniendo como punto de origen la ciudad de Chanchamayo, 2024.



Nota: Porcentual de clúster de trayectorias de masas de aire, desde el punto de monitoreo de La Merced, Chanchamayo del año 2024. (A) julio, (B) agosto y (C) setiembre.

4.4. Trayectoria de las masas de aire y su relación con el CN

En la Tabla 8, se visualiza el vínculo entre las direcciones predominantes de los vientos y las zonas geográficas, de las cuales son agrupadas en cuatro zonas (Z1, Z2, Z3 y Z4). Para determinar las zonas de contribución de CN, se integraron los datos de la dirección del viento con las mediciones de CN obtenidas a través del sensor ubicado en la zona de estudio. Además, el análisis se fundamenta en la agrupación de trayectorias de los clústeres y la identificación de los principales focos de emisiones de distintas regiones.

La Z1 con dirección de N, NE y E, abarcando en distintas regiones peruanos como Loreto, San Martín, Ucayali, Huánuco, Pasco y Junín, como también en los estados brasileños de Acre y Amazonas. Por otra parte, la zona Z2 con dirección de E, sureste SE y sur S, comprende a las regiones peruanos (Huancavelica, Ayacucho, Apurímac, Cusco y Madre de Dios) y bolivianos (Pando y La Paz). Por último, en las Z3 (S, SE y O) y Z4 (O, NE y N) engloba únicamente a las regiones del Perú, siendo provenientes de la zona andina y costa.

Cabe destacar, que el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales de Brasil (INPE) reportó un aumento notable de incendios de biomasa en distintas regiones brasileras durante el mes de agosto y setiembre, generándose en gran medida los flujos de humo que afectan negativamente a otras regiones (Vidal, 2023).

Tabla 8.

Influencia de dirección del viento en las zonas de los departamentos

Zonas	Dirección de viento	País	Departamento
Z1	Norte	Perú	Loreto, San Martín, Huánuco,
	Noreste		Pasco, Ucayali, Junín
Z2	Este	Brasil	Acre, Amazonas
	Este	Perú	Huancavelica, Ayacucho,
	Sureste		Apurímac, Cusco, Madre de Dios
Z3	Sur	Bolivia	Pando, La Paz
	Suroeste	Perú	Junín, Lima, Ica, Huancavelica,
Z4	Oeste		Ayacucho.
	Noroeste	Perú	Amazonas, Cajamarca, La Libertad,
	Norte		Ancash.

En la Figura 31 muestra el mapa de calor del periodo de julio, agosto y setiembre, aplicado mediante el modelo de HYSPLIT. En el mes de julio, la concentración más elevada del CN se asoció a las masas de aire provenientes de Ucayali, Brasil y Bolivia. De la misma manera, Beard *et al.* (2012) confirma que las concentraciones elevadas hasta de $8.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Pucallpa-Ucayali, se encuentran vinculadas a la influencia de vientos del NE. Por otro lado, demuestra que en el periodo mensual obtuvo niveles significativos del CN debido a la influencia de algunas regiones. Cabe mencionar, que en estudios como Teerachai *et al.* (2020), demuestran que las partículas finas originadas por las quemadas de biomasa son transportadas por más de 1 000 km, impactando a otras regiones distanciadas del foco emisor.

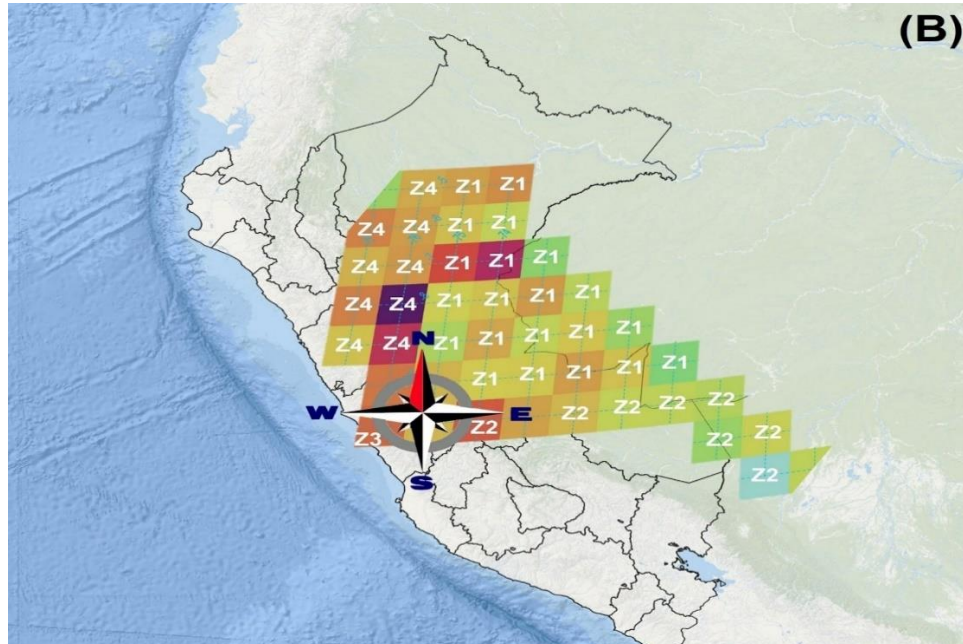
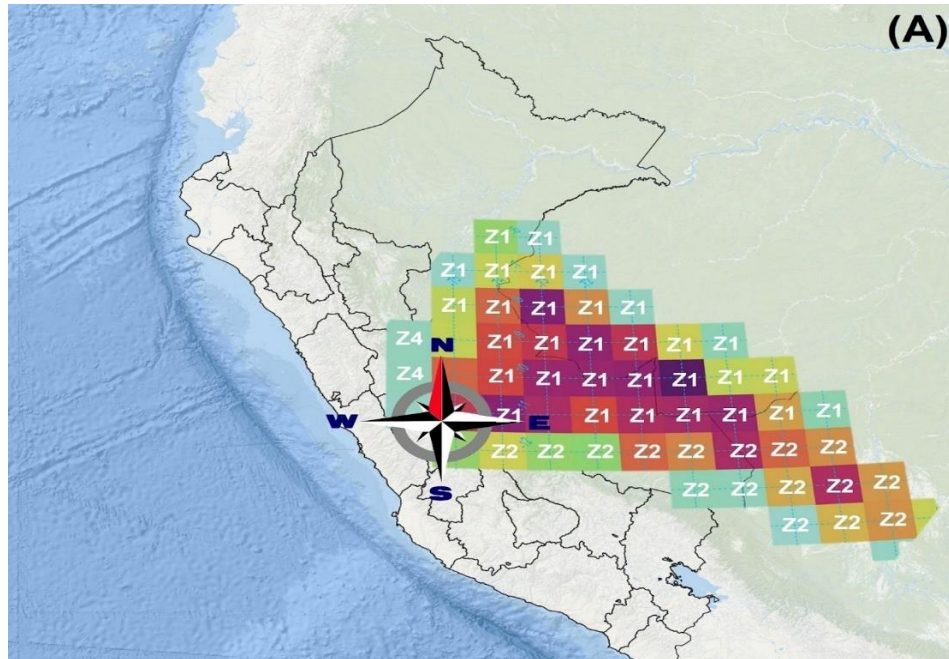
En contraste, en agosto comprende a regiones como Madre de Dios, Huancavelica, Ayacucho, Apurímac y Cusco, y presenta una reducción moderada en comparación con julio, sin embargo, la Figura 31 (B) revela que persisten los niveles altos de concentraciones del CN, por lo que su influencia disminuyó a causa de la menor frecuencia de trayectorias, debido a diversos factores. Asimismo, dado que se evidenció una reducción, a pesar de que se registraron valores superiores a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona cercana al límite con Brasil. Los eventos de las precipitaciones que suscitaron durante este mes contribuyeron de forma representativa a la limpieza del contaminante, por lo que resultó una disminución generalizada de las concentraciones del CN en la región.

Por otro lado, la Figura 31 (C) muestra que, a lo largo del mes de setiembre, abarca precisamente a regiones peruanas, asimismo, se caracteriza por presentar condiciones secas, bajo nivel de precipitaciones y entre otros, donde beneficia el límite de la dispersión vertical del CN, almacenándose en las capas más baja de la atmósfera, es por ello, durante este mes se reportó valores muy elevados. Del mismo modo, Camayo y Canturín (2021) demostraron en su estudio de Huancayo que, debido a la influencia del transporte de partículas proveniente de la Amazonía y la inversión térmica, incrementaron los niveles de concentración del CN.

En general, a través de los resultados comprueban que la calidad del aire en Chanchamayo está intensamente condicionada por las fuentes no locales, es decir, provenientes de otras regiones.

Figura 31.

Zonas con mayor contribución de CN a 500 m de nivel de altura, en julio, agosto y setiembre, teniendo como punto de origen la ciudad de Chanchamayo, 2024.





Nota: Ubicación de las zonas intercardinales, desde el punto de monitoreo de La Merced, Chanchamayo del año 2024. Z1=Zona 1 (Centro del Perú y Brasil), Z2=Zona 2 (Sureste del Perú y Bolivia), Z3=Zona 3 (Suroeste del Perú) y Z4=Zona 4 (Noroeste del Perú). (A) julio, (B) agosto y (C) setiembre.

La Tabla 9, indica el análisis del total de aportes de las fuentes emisoras, teniendo como punto de origen la ciudad de Chanchamayo, donde demuestra una diferencia estadística significativa entre las zonas (Z1, Z2, Z3 y Z4). Por lo que indica que, en la Z1 obtuvo el mayor total de aportes de fuentes emisoras que es de 24 517, predominando los vientos del NE (12 677). En la Z2, el total de aporte es de 7 774 siendo notablemente menor a la Z1, adquiriendo una alta frecuencia de vientos del E, con un total de aportes de 7 648. Mientras que, en la Z3 alcanzó el más bajo total de aportes con un 105, predominando la dirección de viento del O (56). Y en la Z4 consiguió un total de 4 744, predominando los vientos del N (4 192).

Tabla 9.

Aporte de las fuentes emisoras por zonas a partir de la frecuencia de direcciones de viento teniendo como punto de origen la ciudad de Chanchamayo, 2024

Zonas	Dirección de viento	Frecuencia	∑ Aportes
Z1	Norte	4 192	24 517*
	Noreste	12 677	
	Este	7 648	
Z2	Este	7 648	7 774
	Sureste	97	
	Sur	29	
Z3	Sur	29	105
	Suroeste	20	
	Oeste	56	
Z4	Oeste	56	4 744
	Noroeste	496	
	Norte	4 192	

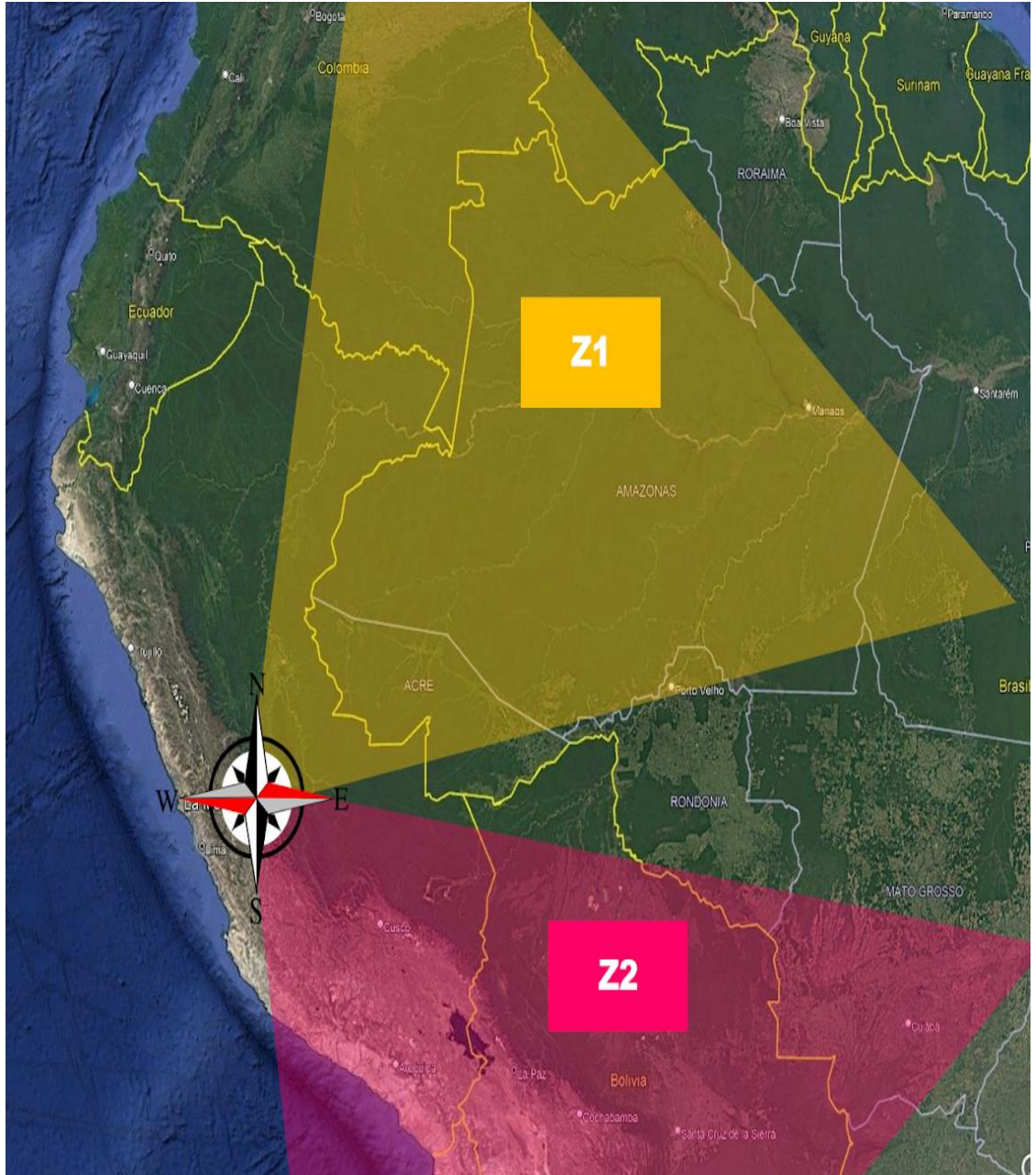
Nota. *Valor más elevado en comparación a las otras zonas

En la Figura 32, representa las zonas geográficas de mayor influencia en las trayectorias de las masas de aire, teniendo como punto de origen la ciudad de Chanchamayo, en el cual delimitan entre la Z1 y Z2, siendo las zonas con mayores significancias en los aportes de las fuentes emisoras. Asimismo, en la Tabla 9 evidencia que estas zonas son las más sobresalientes en la obtención del total de aportes.

La Z1 alcanzó un total de aportes de 24 517 que comprenden áreas como Junín, Huánuco, Ucayali, Loreto, Pasco, San Martín, y parte de la Amazonía de Brasil. Y la Z2 adquirió 7 774 de aportes, abarcando regiones como Madre de Dios, Cusco, Puno, Pando y La Paz. Siendo así, Chanchamayo localizada en la selva central del Perú, tiene influencia significativa de contaminantes que proceden de distintas regiones amazónicas externas. Del mismo modo, Ramírez (2014) evidenció que más del 60 % de las trayectorias son provenientes de fuentes regionales, por lo que en su estudio en Leticia-Colombia confirma que los contaminantes son transportados desde la Amazonía brasileña.

Figura 32.

Presentación de las zonas con mayor significancia, en julio, agosto y setiembre, teniendo como punto de origen en la ciudad Chanchamayo, 2024

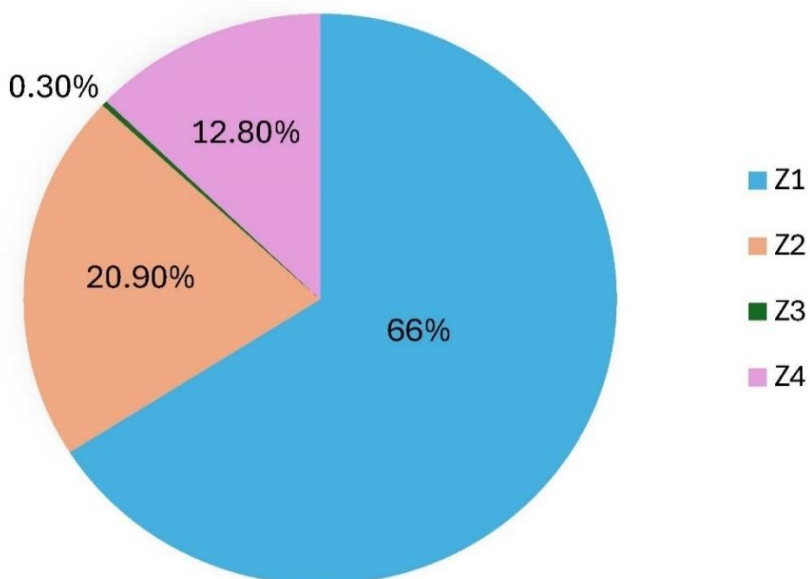


Nota: Ubicación de las zonas noreste y sureste, desde el punto de monitoreo de La Merced, Chanchamayo del año 2024. Z1=Zona 1 (Centro del Perú y Brasil), Z2=Zona 2 (Sureste del Perú y Bolivia)

En la Figura 33, se presenta la distribución de la dirección del viento a lo largo de cuatro zonas geográficas. Se observa que la zona Z1 registra la mayor frecuencia de vientos, con un 66% del total. Le sigue la zona Z2, con un 20.90% de los vientos, mientras que la zona Z4 representa un 12.80%. La zona Z3, por su parte, muestra la menor prevalencia, con solo un 0.30% de los vientos. Esta distribución evidencia una clara variabilidad en la dirección de los vientos entre las zonas, destacando Z1 como la de mayor influencia.

Figura 33.

Distribución de la velocidad del viento en los cuatros zonas



Nota. Porcentaje de direcciones de viento por zonas en Chanchamayo del 2024. Z1=Zona 1 (Centro del Perú y Brasil), Z2=Zona 2 (Sureste del Perú y Bolivia), Z3=Zona 3 (Suroeste del Perú) y Z4=Zona 4 (Noroeste del Perú).

4.5. Aporte de fuente emisoras en la ciudad Chanchamayo

La Figura 34 presenta la distribución mensual del aporte porcentual de las principales fuentes emisoras de los contaminantes en la ciudad de Chanchamayo.

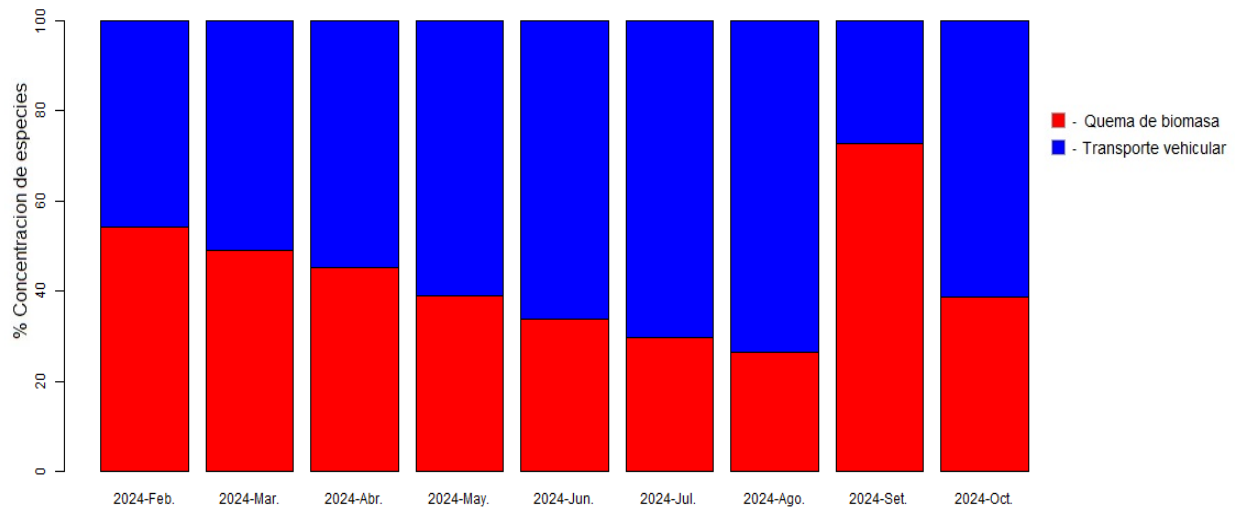
Los resultados indican que el transporte vehicular constituye la fuente dominante, con un aporte promedio del 60%, lo cual se relaciona con el flujo vehicular constante y el uso intensivo de combustibles fósiles. En contraste, a partir de julio – setiembre, la fuente de la quema de biomasa aumenta considerablemente su contribución, alcanzando su máximo en setiembre (> 60 %), por lo cual coincide con las prácticas agrícolas de eliminación de residuos mediante

combustión, que liberan grandes cantidades de partículas finas y CN a la atmósfera. Asimismo, en octubre, el aporte de la quema de biomasa reduce y el transporte vehicular vuelve a predominar, por lo que refleja la influencia de la estacionalidad.

Por lo tanto, demuestra la calidad del aire en Chanchamayo está intensamente condicionada por fuentes de origen antropogénicas, siendo el transporte vehicular una fuente altamente crónica y la quema de biomasa una fuente estacional crítica.

Figura 34.

Aporte de fuentes emisoras desde febrero a octubre en la ciudad Chanchamayo, 2024



4.6. Prueba de hipótesis

4.6.1. Determinación del aporte región del CN en la ciudad de Chanchamayo, 2024

H_0 = La concentración en la región fuente del NE es igual o menor que las demás regiones.

H_1 = La concentración en la región fuente del NE es mayor que las demás regiones

En la Tabla 10, muestra la prueba estadística de Shapiro-Wilk para determinar la normalidad de las direcciones de viento (NE, E, SE, SO, O, NO y N), por lo cual se evidencia que ninguno de los datos obtenidos posee una distribución normal. Asimismo, a través de la prueba de Kruskal-Wallis se rechaza la hipótesis nula (H_0) de manera significativa, es decir, la concentración en la región fuente del Noreste (NE) es significativamente diferente que las otras direcciones.

Tabla 10.

Prueba de Shapiro-Wilk (normalidad) para las direcciones de viento (NE, E, SE, S, SW, W, NW y N) desde febrero a octubre del 2024

Zonas	Dirección de viento	Prueba de Shapiro-Wilk	p-valor
Z1	NE	0.92267	1.258462e⁻³¹*
	E	0.80416	6.708888e ⁻⁴⁵
Z2	SE	0.16868	2.274124e ⁻⁷⁰
	S	0.068904	1.086236e ⁻⁷²
Z3	SW	0.068904	1.292395e ⁻⁷²
	W	0.13239	3.269363e ⁻⁷¹
Z4	NW	0.24822	2.083272e ⁻⁶⁸
	N	0.66915	1.850544e ⁻⁵³

Nota. *valores $p < 0.05$ (rechaza la hipótesis nula de forma significativa)

En la Tabla 11, muestra la distribución de la dirección del viento de la ciudad Chanchamayo, en el que predomina el Noreste (NE) con un 55.09 %. Mientras que, la dirección menos frecuente es del Noroeste (NW) con un 1.18 %. Y las direcciones Este (E) y Norte (N) lograron obtener frecuencias intermedias.

Tabla 11.

Porcentaje de la dirección de viento (E, N, NE y NW) teniendo como punto de origen la ciudad de Chanchamayo, 2024

Dirección de viento	E	N	NE	NW
Porcentaje (%)	28.659403	15.063951	55.092373*	1.184273

Nota. *valor más elevado

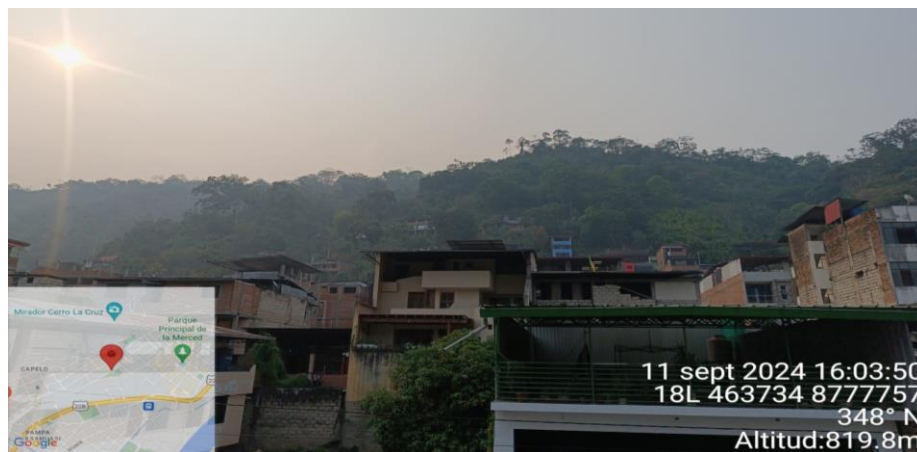
En la Figura 35 se observa que el cielo presenta una tonalidad opaca con una neblina densa, lo que sugiere la presencia de humo en el ambiente. Esta condición es producto de los incendios forestales ocurridos en otros lugares aledaños a la ciudad en esa fecha. La luz del sol se percibe tenue y difusa debido a la capa de humo en la atmósfera. Además, estas condiciones contribuyeron a un aumento anómalo de la temperatura, generando un ambiente más caluroso de lo habitual. La combinación de factores climáticos y la contaminación por partículas en

suspensión puede haber influido en la percepción térmica y en la calidad de aire, aspectos que se consideraron para el estudio.

La reducción en la visibilidad y la coloración grisácea del cielo indican una alta concentración de aerosoles, lo que pudo haber tenido efectos en la salud respiratoria de la población. Estas alteraciones en la atmosfera no solo evidencian el impacto ambiental de los incendios, sino que también destacan la importancia de un monitoreo constante de la calidad del aire en regiones vulnerables a este tipo de fenómenos.

Figura 35.

Densa humareda en el cielo de la ciudad de Chanchamayo, en el 2024



Nota. Fotografía tomada desde el punto de monitoreo en la Escuela Profesional Ingeniería Civil, UNISCJSA.

4.6.2. Determinación de la concentración mensual del $PM_{2.5}$ en los meses de febrero a octubre, 2024

H_0 = La concentración del $PM_{2.5}$ en setiembre no es significativamente mayor que en otros meses.

H_1 = La concentración del $PM_{2.5}$ en setiembre es significativamente mayor que en otros meses.

La Tabla 12, muestra la prueba estadística de Anderson Darling (normalidad) y Kruskal-Wallis de las concentraciones del $PM_{2.5}$. Dado que, los datos no lograron obtener una distribución normal se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis, alcanzando un p-valor excesivamente bajo ($2.44e^{-17}$), por tanto, se rechaza la hipótesis nula (H_0). Siendo así, que la concentración de $PM_{2.5}$ en setiembre es significativamente mayor que en otros meses.

Tabla 12.

Prueba de Anderson Darling (normalidad) y Kruskal-Wallis para las concentraciones de PM_{2.5} desde febrero a octubre del 2024

Meses	Mediana (µg/m ³)	Desviación estándar	Prueba de Anderson Darling	Prueba de Kruskal-Wallis
Febrero	3.375	3.077	0.01782158	4.66e ⁻¹⁷
Marzo	4.514	2.245	0.1995757	1.28e ⁻¹⁶
Abril	4.086	1.929	0.9429954	3.01e ⁻¹⁰
Mayo	4.490	2.849	0.003058025	2.44e ⁻¹⁷
Junio	11.076	5.335	0.2358073	1.07e ⁻⁵
Julio	16.981	10.624	0.006808182	1.1157e ⁻⁰⁴
Agosto	35.688	14.434	0.1688165	3.70e ⁻¹¹
Setiembre	74.917	26.298*	0.3759203	2.44e^{-17*}
Octubre	25.621	18.249	0.3406319	1.18776e ⁻⁰⁴

Nota * valores p<0.05 (rechaza la hipótesis nula de forma significativa)

4.6.3. Determinar el mes con mayor concentración del CN en los meses de febrero a octubre, 2024

H₀= La concentración del CN en setiembre no es significativamente mayor que en otros meses.

H₁= La concentración del CN en setiembre es significativamente mayor que en otros meses.

En la Tabla 13, se observa la prueba estadística de Anderson Darling, el cual se aplicó para determinar la normalidad del comportamiento de la concentración del CN a una escala mensual. Puesto que, los datos no seguían una distribución normal, se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis a fin de comparar las medianas de las concentraciones de CN entre febrero a octubre. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, por ende, la concentración de CN en el mes de setiembre fue significativamente mayor que en otros meses.

Tabla 13.

Prueba de Anderson Darling (normalidad) y Kruskal-Wallis para las concentraciones del CN desde febrero a octubre del 2024.

Meses	Mediana ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desviación estándar	Prueba de Anderson Darling	Prueba de Kruskal-Wallis
Febrero	1.084	0.267	>0.05	2.4e^{-03}
Marzo	1.028	0.223	>0.05	6e^{-04}
Abril	0.934	0.173*	<0.05	8.6e^{-03}
Mayo	0.813	0.201*	<0.05	7.37e^{-05}
Junio	0.905	2.498*	<0.05	6.7e^{-03}
Julio	0.787	0.186	>0.05	6.97e^{-06}
Agosto	0.840	0.448*	<0.05	5.36e^{-07}
Setiembre	1.173	35.181^{*b}	<0.05	5.36e^{-07*}
Octubre	0.977	0.259	>0.05	8.9e^{-03}

Nota. *indican que son datos no normales para la prueba estadística de Anderson Darling. ^b indica que setiembre presenta diferencia significativa

4.6.4. Cuantificar los aportes de las fuentes emisoras en la ciudad de Chanchamayo, 2024

H₀: Las concentraciones de PM_{2.5} y CN en la ciudad de Chanchamayo, no están significativamente influenciadas por la quema de biomasa ni el transporte vehicular.

H₁: Las concentraciones de PM_{2.5} y CN en la ciudad de Chanchamayo, están significativamente influenciadas por dos principales fuentes: la quema de biomasa y el transporte vehicular.

La Tabla 14, se observa los resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk aplicada a las concentraciones de PM_{2.5} y CN, por lo que indica que no presentan una distribución normal. Por consiguiente, muestran que el valor-p para ambos contaminantes es significativamente menor al umbral de significancia ($\alpha=0.05$), por tanto, se rechaza la hipótesis nula (H₀) y se acepta la hipótesis alternativa (H₁), concluyendo que las concentraciones de PM_{2.5} y CN en la ciudad de Chanchamayo, están significativamente influenciadas por dos principales fuentes (quema de bioma y transporte vehicular).

Tabla 14.

Prueba de Shapiro-Wilk (normalidad) para las concentraciones de PM_{2.5} y CN asociadas a las fuentes emisoras de quema de biomasa y transporte vehicular

Contaminante	Desviación Estándar	Mediana	Estadístico W	Valor p
PM _{2.5}	23.154	12.487	0.785	1.22e ⁻¹⁸
CN	0.343	0.922	0.951	6.29e ⁻⁸

*Nota. *valores $p < 0.05$ (rechaza la hipótesis nula de forma significativa)*

CONCLUSIONES

- Las emisiones de los contaminantes provienen principalmente del transporte vehicular como fuente continua, y la quema de biomasa como fuente estacional crítica, alcanzando como máximo en setiembre.
- La concentración máxima de partículas $PM_{2.5}$ en la ciudad de Chanchamayo se registró el 5 de septiembre de 2024, alcanzando un valor de $125.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 11:00 a.m. Este valor máximo fue seguido por los días 12 y 14 de septiembre, con concentraciones de $107.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $105.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Estos niveles elevados de $PM_{2.5}$ reflejan una variabilidad significativa en la calidad del aire durante el mes de septiembre, que podría estar vinculada tanto a las condiciones climáticas particulares como a las emisiones provenientes de los incendios forestales, que afectan la región en este periodo.
- El periodo de mayor concentración CN se registró en el mes de septiembre de 2024, destacando significativamente respecto a los demás meses analizados, comprendidos entre febrero y octubre. Este aumento en la concentración del contaminante coincide con el período de estiaje, caracterizado por la escasez de precipitaciones y condiciones atmosféricas secas, factores que favorecen la emisión de contaminantes atmosféricos. Asimismo, se evidenció una correlación entre los elevados niveles de CN y la ocurrencia de incendios forestales, tanto a nivel internacional, como en incendios locales, lo que resalta el impacto directo de estos eventos en la calidad del aire en la región durante este periodo crítico.
- El mes con la mayor concentración de CN se registró en septiembre de 2024. Durante este mes, se identificaron las retrotrayectorias a una altura de 500 metros, las cuales indicaron una dirección predominante hacia el noreste. De las trayectorias analizadas, el 55.09% se originó desde este sector, mientras que un 28.66% provino del este, un 15.06% del norte y un 1.18% del noroeste. Estos patrones de dirección sugieren que las fuentes de emisión de CN en septiembre tienen una fuerte influencia proveniente del noreste, lo que podría estar relacionado con las condiciones meteorológicas y fuentes específicas de contaminación en las regiones cercanas.

- La zona con mayor aporte de partículas $PM_{2.5}$ en la ciudad de Chanchamayo fue la Zona 1 (Z1), que abarca las direcciones norte, noreste y este. Este aporte proviene principalmente de los departamentos peruanos de Loreto, San Martín, Huánuco, Pasco, Ucayali y Junín, así como de los estados brasileños de Acre y Amazonas. La contribución de estas regiones se debe en gran parte a actividades como la quema de cultivos, la deforestación y las emisiones provenientes de la industria. Este patrón evidencia que la calidad del aire en Chanchamayo no solo depende de las fuentes locales, sino también de las dinámicas de contaminación de las áreas adyacentes.

RECOMENDACIONES

1. Establecer el monitoreo continuo de la calidad del aire, especialmente durante los meses de estiaje, cuando se observan picos significativos en los niveles de CN y partículas PM_{2.5}, como ocurrió en septiembre de 2024.
2. Incluir nuevos puntos de monitoreo en la Zona 1, específicamente en las inmediaciones de la caseta de vigilancia en la Escuela Profesional Ingeniería Civil de la universidad, con el fin de optimizar la recolección de datos en una ubicación clave y fortalecer la capacidad de evaluación y respuesta ante variaciones en la calidad del aire.
3. Fortalecer las políticas de control y prevención de incendios forestales, dada la correlación directa entre los elevados niveles de CN y los incendios forestales locales e internacionales. Esto implica implementar programas de concientización y mejorar las capacidades de respuesta, particularmente en las regiones vecinas a Chanchamayo, que son fuentes relevantes de contaminación.
4. Implementar programas de reforestación, especialmente en áreas vulnerables a incendios, así como promover tecnologías limpias y prácticas agrícolas sostenibles que puedan reducir la quema de biomasa, una fuente importante de contaminación.
5. Desarrollar campañas educativas dirigidas a la población local para sensibilizar sobre los riesgos de la contaminación atmosférica y promover medidas preventivas, tales como el uso de mascarillas y la adopción de protocolos de alerta en días de alta contaminación.
6. Mejorar el ordenamiento territorial en la ciudad de La Merced, mediante la delimitación clara de zonas urbanas, zonas de protección y zonas de reforestación, las cuales son esenciales para la gestión efectiva de la calidad del aire.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, D., Herrera, J., Rojas, J. F., & González, M. (2022). Propuestas de reducción de emisiones de carbono negro para fuentes móviles en Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 56(1), 157–177. <https://doi.org/10.15359/rca.56-1.8>
- Alver, Ü., Onat, B., Akın, Ö., Ayvaz, C., Uzun, B., Mangır, N., Doğan, M., & Harrison, R. M. (2020). Temporal variations of atmospheric black carbon and its relation to other pollutants and meteorological factors at an urban traffic site in Istanbul. *Atmospheric Pollution Research*, 11(7), 1051–1062. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.03.009>
- Anglés, M., Rovalo, M., & Tejado, M. (2021). *Atmósfera*. In *Manual de derecho ambiental mexicano*. (p. 149–179). <https://biblio.juridicas.unam.mx/bjv/detalle-libro/6429-manual-de-derecho-ambiental-mexicano>
- Angulo, N. (2009). Evaluación de la calidad del aire en la provincia de las Palmas [Tesis doctoral, Universidad de la Palmas de Gran Canaria]. https://acceda.ulpgc.es/handle/10553/4859#.WnV_h_fIahQ.mendeley
- APP. (2022). Perú es el principal emisor de partículas contaminantes PM_{2.5} de la región. Asociación Automotriz Del Perú. <https://aap.org.pe/indice-progreso-social-particulas-contaminantes-peru-2022/>
- AQ-SPEC. (2017). Air Quality Sensor Performance Evaluation Center. <https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/summary/purpleair-pa-ii---summary-report.pdf?sfvrsn=16>
- Araneo, D., Galarza, M., & Santos, J. (2021). Climatología de las inversiones térmicas de la baja tropósfera en la ciudad de Mendoza. 1–3. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/temperature-inversion>
- Aránguez, E., Ordóñez, J. M., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández-Patier, R., Gandarillas, A., & Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista Española de Salud Pública*, 73(2), 123–132. <https://doi.org/10.1590/s1135-57271999000200003>
- Balde, B., & Vega, C. (2019). Estimation of GHG emissions and trajectories from large forest fires in Catalonia, Spain. *Madera y Bosques*, 25(2). <https://doi.org/10.21829/MYB.2019.2521764>
- Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista Española*

- Salud Pública, 79(6), 159–175. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(15\)70238-X](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(15)70238-X)
- Beard, J., Beck, C., Graham, R., Packham, S., Traphagan, M., Giles, R., & Morgan, J. (2012). Winter temperature inversions and emergency department visits for asthma in Salt Lake County, Utah, 2003-2008. *Environmental Health Perspectives*, 120(10), 1385–1390. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104349>
- Benites, O., & Pacsi, S. (2023). Análisis Temporal de los Contaminantes Atmosféricos (NO₂, O₃ Troposférico y CO) y su relación con la Temperatura del aire y la Radiación Solar en Lima Metropolitana. *Ecología Aplicada*, 22(1), 17–25. <https://doi.org/10.21704/rea.v22i1.850>
- Bermejo, V., Del Amo, R., Elvira, S., Rábago, I., Aracil, J., & García, M. (2009). El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación. In Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/Ozono_tcm30-188049.pdf
- Boldo, E. (2019). La contaminación del aire. In *Sustainability* (Vol. 11, Issue 1). CATARATA. http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SYSTEM_PE_MBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- Camayo, A., & Canturin, C. (2021). Evaluación de la concentración de las partículas atmosféricas PM₁₀ Y PM_{2.5} para la formulación de su Plan de Acción en Huancayo Metropolitano [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7479/T010_71245513_T.pdf?sequence=1
- Camilloni, I., & Vera, C. (2003). La Atmósfera. In *Explora: Las Ciencias en el Mundo Contemporáneo* (Vol. 1). <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL002316.pdf>
- Capuena, H., & Angulo, J. (2019). Determinación de la influencia de las actividades urbano e industrial en el nivel de contaminación del aire mediante la determinación de partículas suspendidas respirables (PM_{2,5}), en el Alto Mayo, 2015 [Tesis pregrado, Universidad Nacional de San Martín]. <http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/574>
- Castro, T., Ponce, D., Mendoza, K., & Valero, C. (2021). Epidemiología de las infecciones respiratorias y sus factores predisponentes en adultos del cantón Jipijpa. *Dominio de*

- Las Ciencias, 7, 893–914. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i4.2137>
- CCA. (2015). Directrices para la estimación de las emisiones de carbono negro de América del Norte: Métodos recomendados. <http://www.cec.org/files/documents/publications/11629-north-american-black-carbon-emissions-recommended-methods-estimating-black-es.pdf>
- Colman, E., Sanchez, E., & Porta, A. (2018). Monitoreo y modelado de contaminantes atmosféricos. Efectos en la salud pública. In Universidad de la Plata. <https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/1080/1066/3503-1>
- Coronel, A., Bischoff, S., & Lara, M. Á. (2007). Estructura vertical, temporal y espacial de las masas de aire extremas en la República Argentina en invierno. 31(1 y 2), 12. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-468X2006000100003
- Cueva, A. (2019). La atmósfera, sus capas y propiedades. Universidad Autónoma Del Estado de Hidalgo, 6. https://www.uaeh.edu.mx/division_academica/educacion-media/repositorio/2019/3-semester/diversidad-espacio-terrestre/docs/la-atmosfera-capas-propiedades.pdf
- Díaz, G. (2012). El cambio climático. Ciencia y Sociedad, 37(2), 227–240. <https://doi.org/10.22206/cys.2012.v37i2.pp227-240>
- Díaz, V., y Páez, C. (2006). Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras. ActaNova, 3, 308–322.
- Donzelli, G., y Suarez Varela, M. M. (2024). Tropospheric Ozone: A Critical Review of the Literature on Emissions, Exposure, and Health Effects. Atmosphere, 15(7), 1–14. <https://doi.org/10.3390/atmos15070779>
- Gatari, M. J., y Boman, J. (2003). Mediciones de carbono negro y carbono total en sitios urbanos y rurales de Kenia, África Oriental. Atmospheric Environment, 37(8), 1149–1154. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)01001-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)01001-4)
- Gaviria, C., Benavides, P., y Tangarife, C. (2011). Contaminación por material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009). Revista Facultad Nacional de Salud Pública, 29(3), 241–250. <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.8920>
- Google Earth. (2020, March 31). Google Earth.

<https://www.google.com/intl/es/earth/download/gep/agree.html>

- Gutiérrez, I., Calderón, D. M., Gutierrez, D., y Aquino, E. (2019). Correlación entre diferentes contaminantes atmosféricos de la Ciudad de México y el Área Metropolitana. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 27(3), 364–375. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262008000100006&lng=en&tlng=es
- Hernández, R., y Mendoza, C. (2020). *Metodología de la investigación* (McGRAW-HIL). <http://repositorio.uasb.edu.bo:8080/bitstream/54000/1292/1/Hernández- Metodología de la investigación.pdf>
- Huanca, L., Aparicio, M., Jemio, D., Hurtado, M., Huanca, M., y Chuquimia, A. (2024). Relación entre la calidad del aire y el asma en habitantes de grandes altitudes, La Paz, Bolivia (3.600 m.s.n.m.). *Biomédica*, 44(2), 217–229. <https://doi.org/10.7705/biomedica.7155>
- IDEAM. (2022). Informe del estado de la Calidad del Aire en Colombia. <https://ideam.gov.co/sala-de-prensa/informes/Estado de la calidad del aire>
- INEI. (2018). Junín Compendio Estadístico (Vol. 1). https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaless/Est/Lib1617/
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (n.d.). 2019. Retrieved March 14, 2025, from <https://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/glosario>
- ITE. (2017). El Subsistema Atmosférico. Instituto de Tecnologías Educativas. https://fjferrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion03/1_estructura_vertical.html
- Jiménez, D., Murillo, J., Marín, J., y Rodríguez, M. (2022). Propuestas de reducción de emisiones de carbono negro para fuentes móviles en Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 56(1), 157–177. <https://doi.org/10.15359/rca.56-1.8>
- Juliño, M., Ocaña, F., y Concha, J. (2021). Contaminación ambiental y su influencia en la salud. *RENACIENTE*, 2(1), 75–90. <https://doi.org/10.46498/renacipb.v2i1.1566>
- Leal, J. (2019). Efectos físicos de la contaminación atmosférica percibidos de manera inconsciente por la ciudadanía, en el área metropolitana de la ciudad de Monterrey, Nuevo León, México. *Revista de Salud Pública*, 21(4), 1–7. <https://www.scielosp.org/pdf/rsap/2019.v21n4/423-429/es>

- Li, C., Bosch, C., Kang, S., Andersson, A., Chen, P., Zhang, Q., Cong, Z., Chen, B., Qin, D., y Gustafsson, Ö. (2016). Sources of black carbon to the Himalayan-Tibetan Plateau glaciers. *Nature Communications*, 7, 1–7. <https://doi.org/10.1038/ncomms12574>
- Liñán, R., Salcedo, D., Castro, T., Carabeli, G., Peralta, O., Arnott, P., Ruiz, L., y Paredes, G. (2020). Mediciones continuas de carbono negro, monóxido de carbono y dióxido de carbono, durante la temporada seca caliente 2016, en un sitio periurbano de Querétaro, México. *Ciencia & Desarrollo*, 19(26), 68–76. <https://doi.org/10.33326/26176033.2020.26.934>
- Llanque, J. (2004). Efectos de la Contaminación Atmosférica en el clima Urbano y Calidad Ambiental de Arequipa. *Revista Cuadernos de Investigación Urbanística*, 95–106. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1334387>
- Marambio, M. (2012). Fundamentos y alcance del régimen de la convención de Ginebra sobre contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia de 1979 [Tesis doctoral, Universitat Rovira I Virgili]. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/101529/Tesis.pdf?sequence=1>
- Marincovich, G., Condori, L., y Fogwill, G. (2021). Aethalometer AE33: Instalación y mantenimiento. Servicio Meteorológico Nacional Argentina. https://repositorio.smn.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12160/1756/Nota_Tecnica_SMN_2021-114.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Martínez, J. (2011). Aplicación del Modelaje Geoespacial en Geomática para estimar los niveles de partículas suspendidas PM₁₀ en la cuenca atmosférica del Valle de México [Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1012/39>
- Matus, P., Díaz, M., y González, F. (2021). Contaminación atmosférica por dióxidos de nitrógeno en Región Metropolitana y su impacto sobre la salud. *Revista Médica de Chile*, 149(10), 1391–1398. <https://doi.org/10.4067/s0034-98872021001001391>
- Maura, R., Andrade, M., Fornaro, A., Astolfo, R., De Andre, P., y Saldiva, P. (2010). Urban air pollution: A representative survey of PM_{2.5} mass concentrations in six Brazilian cities. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 5(1), 63–77. <https://doi.org/10.1007/s11869-010-0124-1>
- Mena, N. M., Meneses, E., Miravet, B. L., y Roig, A. (2024). Evaluación del transporte de

- contaminantes atmosféricos en La Habana mediante el uso del modelo HYSPLIT. *Revista Cubana de Meteorología*, 30(1). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2664-08802024000100002&lang=es
- Mendoza, I. (2018). Valoración del viento como fuente de energía eólica en el estado de Guerrero. *Ingeniería - Revista*, 22(3). <http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/>
- MINAM. (2017a). Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM. *El Peruano*, 1–4. https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/12/DS_011-2017-MINAM.pdf
- MINAM. (2017b). Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones complementarias - Decreto Supremo N° 003-2017. *El Peruano*, 6–9. <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/ds-003-2017-minam.pdf>
- MINAM. (2019). Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire. In Ministerio del Ambiente (p. 102). https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/434320/PROTOCOLO_MONITOREO_AIRE_compressed.pdf
- Minambiente. (2024). Contaminación Atmosférica. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/gestion-del-aire/contaminacion-atmosferica>
- Mora, J., Sibaja, J., y Borbón, H. (2021). Fuentes antropogénicas y naturales de contaminación atmosférica: estado del arte de su impacto en la calidad fisicoquímica del agua de lluvia y de niebla. *Revista Tecnología En Marcha*, 34(1), 92–103. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4806>
- Moretti, L., Tafur, V., y Valiente, Y. (2023). Contaminación del aire en la ciudad de Lima, Perú. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 8, 822–831. <https://doi.org/https://doi.org/10.35381/r.k.v8i2.2975>
- Muñoz, S., Salcedo, J., y Sotomayor, A. (2021). Contaminación ambiental producida por el tránsito vehicular y sus efectos en la salud humana: revisión de literatura. *Inventum*, 16(30), 20–30. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.16.30.2021.20-30>
- Murillo, A., Rodríguez, J., y Bush, U. (2023). Dispersión de contaminantes criterios emitidos por fuentes móviles en tres vías principales de una ciudad intermedia de Colombia.

- Revista EIA, 20(40), 1–24.
<https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/1696/1567>
- NOAA. (2024). Modelo de trayectoria integrada lagrangiana de partícula única híbrida. Air Resources Laboratory. <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>
- Núñez, P. (2019). Estimación de fuentes de material particulado atmosférico (PM₁₀ y PM_{2.5}) en la ciudad de Barranquilla, Colombia [Tesis de maestría, Universidad de la Costa]. [https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/6017/Estimación de fuentes de material particulado atmosférico %28PM₁₀ y PM_{2.5}%29 en la ciudad de Barranquilla%2C Colombia.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/6017/Estimación%20de%20fuentes%20de%20material%20particulado%20atmosférico%20PM10%20y%20PM2.5%29%20en%20la%20ciudad%20de%20Barranquilla%2C%20Colombia.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Observe Air Manual de instrucciones. (2023).
- Olcina Cantos, J. (1996). El clima: Factor de diferenciación espacial. Divisiones regionales del mundo desde la antigüedad al S. XVIII. *Investigaciones Geográficas*, 15, 79–98. <https://www.redalyc.org/pdf/176/17654244005.pdf>
- OMS. (2018, July). Organización Panamericana de la Salud. <https://www.paho.org/es/temas/etras-equipo-tecnico-regional-agua-saneamiento/residuos-solidos>
- OMS. (2024). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- PAHO. (2023). El cambio climático y salud. <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2023/08/02/el-cambio-climatico-tambien-es-una-cuestion-de-salud>
- PDAO. (2016). Efectos del material particulado en sistema respiratorio. Plan Descontaminación Atmosférica Para Ozono, 5. <https://repositorioambiental.mma.gob.cl/index.php/2019/09/19/infografia-efectos-mp-en-sistema-respiratorio/>
- Peñaloza, F. (2016). Influencia del Ozono y Dióxido de Nitrógeno en la contaminación atmosférica en la ciudad de Huancayo [Tesis pregrado, Universidad Alas Peruanas]. https://repositorio.uap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12990/5428/Tesis_Influencia_Ozono_Dióxido_Nitrógeno.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- PNUMA. (2023). El PNUMA lanza su Informe Mundial de Litigios Climáticos 2023. Plataforma de Litigio Climático Para América Latina y El Caribe.

<https://litigioclimatico.com/es/noticia/el-pnuma-lanza-su-informe-mundial-de-litigios-climaticos-2023-n104>

- Poblano, J. (2018). Caracterización de la materia orgánica extraída de PM_{2.5} y su efecto citotóxico en la línea celular de epitelio alveolar humano A549 [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. <https://repositorio.cinvestav.mx/bitstream/handle/cinvestav/3562/SSIT0015774.pdf?sequence=1>
- Quispe, G. (2022). Variación espacial del riesgo en la salud por Material Particulado PM_{2.5} y PM₁₀ en los distritos de Huancayo Metropolitano [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/8548/T010_74730784_T_removed.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ramírez, O. (2014). Origen de masas de aire en cuatro ciudades de Colombia mediante el modelo HYSPLIT. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(1), 103. <https://doi.org/10.22490/21456453.935>
- Ramos, S., Bautista, R., y Valdez, A. (2010). Estudio Estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México. *Universidad y Ciencia*, 26(1), 65–80. <http://www.scielo.org.mx/pdf/uc/v26n1/v26n1a5.pdf>
- Romero, M., Diego, F., y Álvarez, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 44(2), 3. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223214848008>
- SENAMHI. (2022). Pronóstico Meteorológico. <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=junin&p=pronostico-meteorologico>
- Serna, A., Duque, C., Ramírez, J., Betancourt, R., Riveros, J., y Zuluaga, B. (2020). Monitoreo de material particulado fino y carbono negro, en microambientes de la ciudad andina de Manizales: estudio piloto. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 20(39), 129–146. <https://doi.org/10.22395/rium.v20n39a8>
- SERVIR. (2009). Monitoreo. https://www.servir.net/servir_alertas/index-new.php
- Shu, Z., Huang, C., Min, K., Long, C., Liu, L., Tan, J., Liu, Q., y Jiang, G. (2023). Analysis of black carbon in environmental and biological media: Recent progresses and

- challenges. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 169, 117347. <https://doi.org/10.1016/J.TRAC.2023.117347>
- Silva, S. (2021). Evaluación de carbonilos, PM_{2.5} y especies de carbono negro en ambientes intramuros y extramuros de la ciudad de México [Tesis de maestría, Universidad Metropolitana Azcapotzalco]. <https://doi.org/10.24275/uama.6734.8743>
- Solaz, J. (2001). El ozono atmosférico, ¿benefactor o malhechor? *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 18(3), 350–363. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5165796.pdf>
- Suárez, L., Álvarez, D., Bendezú, Y., y Pomalaya, J. (2017). Caracterización Química del Material Particulado Atmosférico del Centro Urbano de Huancayo, Perú. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 83(2), 187–199. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v83i2.197>
- Suarez, L., Torres, C., Helmig, D., y Hueber, J. (2017). Medición y análisis del aerosol de Carbono Negro en el Observatorio de Huancayo, Perú. *Boliviana De Física*, 30, 7–15. http://www.scielo.org.bo/pdf/rbf/v30n30/v30n30_a03.pdf
- Teerachai, A., Jirarat, I., Radshadaporn, J., y Vanisa, S. (2020). Long range transport of southeast asian PM_{2.5} pollution to northern thailand during high biomass burning episodes. *Sustainability*, 12(23), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su122310049>
- Thermo Scientific. (2022). <https://tools.thermofisher.com/content/sfs/brochures/D19987~.pdf>
- Triana, M. del P. (2014). Química Ambiental. In *Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería*. [https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/7618/M%F3dulo de Qu%EDmica Ambiental.pdf?sequence=5](https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/7618/M%F3dulo%20de%20Qu%EDmica%20Ambiental.pdf?sequence=5)
- Vargas, F. (2005). La contaminación ambiental como factor determinante de la salud. *Esp Salud Pública*, 17(3), 204–205. <https://doi.org/10.1177/02630672221081898>
- Ventosilla, R. (2016). Monitoreo de la concentración de NO_x y C_xH_y en relación con el nivel de contaminación atmosférica en el distrito de Huancayo - 2015 (Issue X) [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. [https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3762/Ventosilla Camac.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3762/Ventosilla%20Camac.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Vidal, C. (2023). Infierno en el Paraíso: Incendio del 2020 en el Pantanal. <https://intranet.catie.ac.cr/flipbook/EB051182/go/pdf/El-Pantanal-CVidal.pdf>
- Vidal, O., y Pérez, A. (2017). Estimación de la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos

- Emitidos por una Industria Papelera Mediante el Modelo AERMOD. *Ingeniería*, 23(1), 31. <https://doi.org/10.14483/23448393.12262>
- Warthon, B., Miranda, I., Quispe, I., Ponce, R., Ramos, V., Zamalloa, A., Tupayachi, R., y Warthon, J. (2024). Evaluación de la Contaminación del Aire por Material Particulado PM_{2.5} en la ciudad del Cusco Respecto de los Índices de Calidad del Aire entre 2017 y 2018. *Ambiente, Comportamiento y Sociedad*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.51343/racs.v6i1.1112>
- Xarxa. (2001). Introducción, Objetivos y Metodología. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/10385/BloqueI.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Zafra, O. (2006). Tipos de Investigación. 4, 13–14. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476259067004>
- Zafra, R., Inoue, J., Najarro, L., Gómez, H., Rojas, J., y Bedregal, P. (2024). Determinación de concentración de Carbón Negro en PM_{2.5} muestreado en una zona urbana de la ciudad de Lima, Perú. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 90(4), 202–214. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v90i04.487>
- Zegarra, Y., & Milton, B. (2021). Determinación de fuentes de emisión de Carbono Negro mediante el análisis de retrotrayectorias de masas de aire sobre el Nevado Coropuna, Arequipa [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12773/12336/MDzutoma.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ANEXOS

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES, DIMENSIONES E INDICADORES	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Material particulado fino (PM_{2.5}) a) Concentración b) Concentración de PM _{2.5} c) Fuentes de emisión d) Aporte de fuentes naturales y antropogénicas Carbono negro (CN) g) Concentración h) Concentración de carbono negro	a) Nivel, tipo y diseño de investigación Nivel: Descriptivo correlacional Tipo: Investigación básica Diseño: No experimental b) Población y muestra Población: La atmosfera de la ciudad de Chanchamayo PM _{2.5} , monitoreada por 24 h. CN, monitoreadas cada dos semanas. c) Técnicas e instrumentos de recolección de datos Técnica: observación. Instrumentos: Fichas de campo d) Análisis de datos Prueba de Anderson Darling Prueba de Kruskal-Wallis
¿Cuáles son los aportes de las fuentes de emisión del PM _{2.5} y CN en la ciudad de Chanchamayo, 2024?	Cuantificar los aportes de las fuentes de PM _{2.5} y CN en la ciudad de Chanchamayo, 2024.	Las concentraciones de PM _{2.5} y CN en la ciudad de Chanchamayo están significativamente influenciadas por dos fuentes principales de emisión: quema de bioma y transporte vehicular.		
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas		
¿Cuál es el mes con mayor concentración del PM _{2.5} en la ciudad de Chanchamayo, 2024?	Determinar el mes con mayor concentración del PM _{2.5} en la ciudad de Chanchamayo, 2024.	<ul style="list-style-type: none"> La concentración del PM_{2.5} en setiembre es significativamente mayor que en los otros meses La concentración del CN en setiembre es significativamente mayor que en los otros meses. 		
¿Cuál es el mes con mayor concentración del CN en la ciudad de Chanchamayo, 2024?	Determina el mes con mayor concentración del CN en la ciudad de Chanchamayo, 2024.	<ul style="list-style-type: none"> La concentración en la región fuente del Noreste (NE) es mayor que las demás regiones 		
¿Cuáles son las trayectorias de una altura de 500 m. en los meses con altas concentraciones del CN en la ciudad de Chanchamayo, 2024?	Determinar las trayectorias a una altura de 500 m. en los meses con altas concentraciones del CN en la ciudad de Chanchamayo, 2024.			
¿Cuál es el aporte de la región fuente del contaminante en la ciudad de Chanchamayo, 2024?	Determinar el aporte de la región de contaminante en la ciudad de Chanchamayo, 2024.			

Anexo 2. Instrumento de recolección de datos

		UNIVERSIDAD NACIONAL INTERCULTURAL DE LA SELVA CENTRAL JUAN SANTOS ATHUALPA		FICHA DE REGISTRO DE DATOS EN CAMPO	
Tipo de proyecto		Investigación básica			
Nombre del proyecto de tesis		"APORTE DE FUENTES DE EMISIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO FINO (PM2.5) Y CARBONO NEGRO EN EL DISTRITO CHANCHAMAYO DEL 2023 - 2024"			
Lugar		Estación de Monitoreo de la calidad del aire () La Merced () Pichanaqui			
Ubicación		Este	463785.8	Código Monitoreo	
		Norte	8777658.4	Última carpeta	
		Altitud	730 m. s. n. m.		
EQUIPO		FECHA Y HORA DE DESCARGA		CÓDIGO CARPETA	OBSERVACIONES
Carbono negro DST					
Sensor PurpleAir					
Parámetros de medición		Frecuencia		Periodo	Sustento

Responsable del monitoreo:

Firma

Firma

Anexo 3. *Descarga de datos del equipo Carbono negro DST*



Anexo 4. *Filtros que se utilizaron para monitorear a través del equipo Carbono negro DST*



Anexo 5. Monitoreo del Carbono negro DST



Anexo 6. Monitoreo del Sensor PurpleAir

