

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



## **FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Comportamiento del carbono negro,  $PM_{2.5}$  y su relación con los incendios forestales en el periodo de estiaje en Chanchamayo, 2023

### **TESIS**

Para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental

### **AUTORA**

Mariori Angie Inga Caja

### **ASESOR**

Dr. Daniel Martín Álvarez Tolentino

**Chanchamayo, Perú**

**2025**

## AGRADECIMIENTOS

A los proyectos “**Efecto de los incendios forestales en el material particulado atmosférico de la selva central de Junín para implementar un sistema de vigilancia on-line de la calidad del aire en un contexto de cambio climático**” y “**Concentración, composición química e identificación de fuentes de contaminación de material particulado atmosférico fino (PM<sub>2.5</sub>) en las principales zonas urbanas de la provincia de Chanchamayo como contribución para la generación de acciones de aire limpio**” financiado por la unidad de investigación de la Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa; por haberme permitido ser parte de este aventurero proyecto lleno retos y aprendizajes continuos.

A mi asesor **Dr. Daniel Álvarez Tolentino**, por las enseñanzas compartidas desde su experiencia y trayectoria, y, sobre todo, por haber confiado en mi capacidad y guiado hasta el camino de la investigación en ciencias atmosféricas.

A todas las personas que conocí en esta bonita aventura de investigación en línea de aerosoles y cambio climático, porque fueron personas que me motivaron e impulsaron a continuar y no rendirme en este camino profesional. **¡MUCHAS GRACIAS!**

## **DEDICATORIA**

A mis padres por darme la vida y acompañarme en cada etapa de mi camino;

Especialmente a mi madre Hermelinda por haber confiado en mí desde el primer día, y brindarme palabras de aliento y sacrificio silencioso, y, por sobre todas las cosas, haberme brindado su apoyo incondicional en cada una de mis decisiones, MUCHAS GRACIAS MAMÁ. Y a mi padre Carlos, por su dedicación y por las enseñanzas transmitidas a lo largo de mi camino profesional.

A mi hermano Jhan;

Quien fue mi compañero de vida desde muy pequeño y siempre estuvo para darme soporte, escucharme y animarme para continuar y alcanzar mis objetivos.

A mi mamita Teodosia;

Quien desde muy pequeña me enseñó a confiar en Dios sobre todas las cosas, manteniendo la perseverancia y humildad. Gracias mamita por el cariño, paciencia y comprensión que me diste y, sobre todo gracias por todas tus oraciones.

A toda mi familia, por ser unida y darme el ejemplo de salir adelante y siempre mejorar.

## RESUMEN

Las partículas carbono negro (BC) y  $PM_{2.5}$  han emergido como una preocupación significativa, puesto que sus altas concentraciones contribuyen al cambio climático, impactando en el ambiente y la salud humana. Sin embargo, la información sobre los niveles de BC,  $PM_{2.5}$  y su relación con incendios forestales (IF) en Chanchamayo es poco comprendida. Por lo tanto, para este estudio, se evaluó el comportamiento de BC,  $PM_{2.5}$  y su relación con los IF en periodo de estiaje del 2023. Las concentraciones de BC y  $PM_{2.5}$  fueron monitoreadas mediante sensores (ObservAir y PurpleAir) instalados en el centro urbano de Chanchamayo, zona relativamente montañosa. Para analizar el número de IF, se empleó la plataforma FIRMS de la NASA; asimismo, aplicando la prueba de Rho de Spearman fue posible determinar la correlación entre BC,  $PM_{2.5}$  e IF. Observamos que, para el BC hubo 12 días que superaron el percentil 90 ( $1.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), asimismo, para  $PM_{2.5}$  se obtuvo 5 días que superaron el ECA  $<50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que para los incendios se determinó que la mayor frecuencia se da en los meses de agosto y septiembre. El análisis de correlación entre las tres variables mostró correlación baja positiva, excepto de  $PM_{2.5}$  e IF, donde se obtuvo ( $r = 0.77$ ,  $p < 0.001$ ), indicando que estas fueron influenciadas por fuentes externas de BC. Pese a la baja correlación entre las variables, la influencia de los patrones sinópticos y condiciones topográficas del lugar favorecieron al aumento de concentración de estos aerosoles desde fuentes puntuales cercanas hasta las lejanas.

**Palabras clave:** Carbono negro,  $PM_{2.5}$ , Incendios Forestales y Comportamiento.

## ABSTRACT

Black carbon (BC) and PM<sub>2.5</sub> particles have emerged as a significant concern, as their high concentrations contribute to climate change, impacting the environment and human health. However, information on BC and PM<sub>2.5</sub> levels and their relationship to forest fires (IF) in Chanchamayo is poorly understood. Therefore, for this study, the variability of BC and PM<sub>2.5</sub> and their relationship to IF were evaluated during the 2023 dry season. BC and PM<sub>2.5</sub> concentrations were monitored using sensors (ObservAir and PurpleAir) installed in the urban center of Chanchamayo, a relatively mountainous area. NASA's FIRMS platform was used to analyze the number of IFs; furthermore, Spearman's rank correlation coefficient was applied to determine the correlation between BC, PM<sub>2.5</sub>, and IF. We observed that, for BC (Bacillus thuringiensis), there were 12 days that exceeded the 90th percentile (1.56 µg/m<sup>3</sup>). Similarly, for PM<sub>2.5</sub>, there were 5 days that exceeded the ECA (Environmental Quality Standard) <50 µg/m<sup>3</sup>. For wildfires, the highest frequency was determined to occur in August and September. The correlation analysis between the three variables showed a weak positive correlation, except for PM<sub>2.5</sub> and IF (Influenza Fibre), where the correlation was ( $r = 0.77$ ,  $p < 0.001$ ), indicating that these were influenced by external BC sources. Despite the weak correlation between the variables, the influence of synoptic patterns and topographic conditions of the area favored the increase in the concentration of these aerosols from nearby to distant point sources.

**Keywords:** Black carbon, PM<sub>2.5</sub>, forest fires and behavior.

## ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	14
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.1. Fundamentación del problema.....	14
1.2. Formulación de Problema.....	15
1.2.1. Problema general .....	15
1.2.2. Problemas específicos .....	15
1.3. Objetivos.....	15
1.3.1. Objetivo general .....	15
1.3.2. Objetivos específicos .....	15
1.4. Definición y operacionalización de variables .....	16
1.5. Hipótesis .....	17
1.5.1. Hipótesis general .....	17
1.6. Justificación .....	17
CAPÍTULO II.....	18
MARCO TEÓRICO.....	18
2.1. Antecedentes .....	18
2.2. Bases teóricas.....	20
2.2.1. Contaminación atmosférica.....	20
2.2.2. Material Particulado (PM).....	22
2.2.3. Propiedades físicas del material particulado .....	22
2.2.4. Carbono negro (BC).....	24
2.2.5. Incendio forestal .....	30
2.2.6. Causas de los incendios forestales .....	37
2.2.7. Consecuencias de los incendios forestales .....	39
CAPÍTULO III .....	41
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	41

3.1.	Ámbito de estudio .....	41
3.2.	Tipo, nivel y diseño de investigación.....	41
	3.2.1. Tipo de investigación.....	41
	3.2.2. Nivel de investigación.....	42
	3.2.3. Diseño de investigación .....	42
3.3.	Población y muestra .....	42
	3.3.1. Población.....	42
	3.3.2. Muestra.....	42
3.4.	Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	43
	3.4.1. Procedimientos .....	43
	3.4.2. Técnicas e instrumentos .....	46
3.5.	Análisis de datos .....	47
	3.5.1. Carbono Negro .....	47
	3.5.2. Incendios forestales.....	48
	3.5.3. PM <sub>2.5</sub> .....	49
	CAPÍTULO IV .....	50
	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	50
4.1.	Presentación de resultados y discusiones .....	50
	4.1.1. Variabilidad del carbono negro en Chanchamayo.....	50
	4.1.2. Variabilidad del PM <sub>2.5</sub> .....	51
	4.1.3. Variabilidad de los incendios forestales .....	58
	4.1.4. Relación de carbono negro, PM <sub>2.5</sub> e incendios forestales .....	62
	4.1.5. Estimación de porcentaje de aportes de fuentes de carbono negro .....	68
4.2.	Prueba de hipótesis.....	77
	CONCLUSIONES .....	78
	RECOMENDACIONES .....	80
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

ANEXOS..... 91

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Distribución típica de las partículas en la atmósfera donde se muestran las partículas finas y las gruesas .....	23
Figura 2 Material particulado y su llegada a las diferentes zonas del tracto respiratorio en el cuerpo humano .....	27
Figura 3 Forzamiento albedo del BC sobre las superficies de hielo.....	29
Figura 4 Partes de un incendio forestal.....	31
Figura 5 Tipología de los incendios forestales .....	33
Figura 6 Mapa de ubicación del distrito de Chanchamayo .....	41
Figura 7 Partes del sensor de carbono negro ObservAir.....	43
Figura 8 Esquema de la tecnología de medición del carbono negro mediante el equipo ObservAir .....	44
Figura 9 Características del Sensor PurpleAir.....	45
Figura 10 Esquema de la tecnología de medición del PM <sub>2.5</sub> mediante el sensor PurpleAir ....	46
Figura 11 Comportamiento horario del BC en Chanchamayo durante periodo de estiaje, 2023. ....	50
Figura 12 Comportamiento diario y mensual del BC en Chanchamayo en periodo de estiaje	51
Figura 13 Comportamiento horario del PM <sub>2.5</sub> en Chanchamayo en periodo de estiaje,2023 ..	52
Figura 14 Comportamiento diario del PM <sub>2.5</sub> en Chanchamayo en periodo de estiaje, 2023....	53
Figura 15 Comportamiento horario del PM <sub>2.5</sub> en Santa Isabel en periodo de estiaje, 2023 ....	55
Figura 16 Comportamiento diario y mensual del PM <sub>2.5</sub> en Santa Isabel en periodo de estiaje, 2023.....	55
Figura 17 Comportamiento mensual de los incendios forestales en Junín .....	58
Figura 18 Distribución espacial de los incendios forestales en Chanchamayo .....	59
Figura 19 Comportamiento sectorizado de los incendios forestales en Chanchamayo durante periodo de estiaje .....	61
Figura 20 Correlación con transformación Box-Cox de BC y PM <sub>2.5</sub> en Chanchamayo .....	62
Figura 21 Correlación de PM <sub>2.5</sub> e incendios forestales en Chanchamayo .....	64
Figura 22 Correlación de PM <sub>2.5</sub> e incendios forestales en Santa Isabel .....	65
Figura 23 Correlación de incendios forestales y carbono negro .....	66
Figura 24 Comportamiento horario del BC.....	67
Figura 25 Retrotrayectorias de incendios forestales para días picos de carbono negro en periodo de estiaje, 2023.....	69
Figura 26 Clúster de retrotrayectorias a escala de 100m .....	74

Figura 27 Clúster de retrotrayectorias a escala de 1000m .....	74
Figura 28 Clúster de retrotrayectorias a escala de 3000m .....	75
Figura 29 Topografía del lugar de estudio .....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables .....	16
Tabla 2 Principales ciudades y sus fuentes de contaminación en el Perú.....	24
Tabla 3 Satélites para detección de incendios relacionados a la vegetación.....	34
Tabla 4 Nivel de investigación .....	42
Tabla 5 Ubicación de equipos de muestreo.....	43
Tabla 6 Días pico que superaron el Estándar de Calidad Ambiental del aire y sus valores porcentuales respectivamente .....	57
Tabla 7 Días pico de carbono negro que superaron el percentil 90.....	68
Tabla 8 Coeficiente de correlación y Pvalue para las variables BC, PM <sub>2.5</sub> e IF .....	77

## INTRODUCCIÓN

A nivel internacional la preocupación por el cambio climático y sus consecuencias nefastas para nuestro planeta ha ido en aumento en las últimas décadas; las actividades humanas, especialmente aquellas relacionadas con la industrialización y la urbanización, han generado una acumulación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera, exacerbando el fenómeno del cambio climático (National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2024). Entre estos gases, los contaminantes atmosféricos juegan un papel crucial, ya que se caracteriza por ser una mezcla de muchos elementos distintos, algunos visibles, como el polvo y el hollín, pero muchos otros invisibles, como las partículas muy pequeñas que terminan afectando la calidad del aire y, por ende, la salud humana y los ecosistemas (European Space Agency [ESA], 2025).

Los contaminantes atmosféricos como el material particulado (PM, por sus siglas en inglés: particulate matter), es un conjunto combinado de partículas que se encuentran suspendidas en el aire de diferente tamaño, forma, origen y su composición química representa una complejidad aún mayor (Suarez, 2017). Debido a que son de tamaño variado, para su identificación se han clasificado en términos de su diámetro; partículas menor o igual a  $10\ \mu\text{m}$ ,  $\text{PM}_{10}$ , y partículas menor o igual a  $2.5\ \mu\text{m}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ , las cuales varían ampliamente con respecto a su concentración, y este último, siendo catalogado como uno de los contaminantes que más afecta a la salud por su tamaño 100% respirable como para ser inhaladas profundamente y depositarse en los pulmones, donde pueden causar una serie de problemas de salud, incluyendo infecciones respiratorias, enfermedades cardíacas y cáncer (Environmental Protection Agency [EPA], 2020). Además, de acuerdo al reporte de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022) la contaminación del aire en las ciudades grandes en diferentes partes del mundo provoca cada año 4.2 millones de muertes prematuras, el cual se debe a la exposición de aire contaminado por material particulado fino siendo Asia sudoriental y Pacífico Occidental los países con mayor carga de registro de muertes a nivel mundial.

El BC es un contaminante atmosférico asociado al  $\text{PM}_{2.5}$  que destaca por posicionarse como el segundo contaminante que más aporta al cambio climático después de gases como el  $\text{CO}_2$ ; este aerosol fino es producto de la combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y quema de biomasa, el cual, se transporta orográficamente como plumas atmosféricas alcanzando niveles altos de la Cordillera llegando a ejercer una fuerte influencia sobre los cuerpos glaciares, así como en la microfísica de las nubes y precipitaciones (Pazos, 2021). Entre los efectos del BC, por un lado, genera enfermedades cardiovasculares, respiratorias e inclusive cambios en la función cerebral y rigidez arterial, comprometiendo de

manera directa el sistema circulatorio, nervioso y especialmente el respiratorio (Jeong & Park, 2018; Gobbo et al., 2016). Por otro lado, impactan negativamente al clima debido a su capacidad de absorción de calor, acelerando los procesos de fusión en zonas con hielo y nieve, incrementando el calentamiento de la capa baja de la tropósfera y, en consecuencia, contribuyendo al cambio climático (Pörtner et al., 2019; Niu et al., 2020).

En la selva central peruana, específicamente en la región Junín, se encuentra el distrito de Chanchamayo; ciudad que se caracteriza por su buena producción de café y sus atractivos turísticos (Giacomotti et al., 2021). No obstante, la rápida transformación urbana y económica no ha sido ajena a los efectos adversos de la contaminación atmosférica y los incendios forestales. Sin embargo, existe una falta de información sobre la relación entre estos incendios y la concentración de  $PM_{2.5}$  y BC en la atmósfera local durante el periodo de estiaje, periodo que se extiende de julio a octubre, propiciando la ocurrencia de incendios forestales en la zona. Por tanto, el objetivo de este estudio es determinar el comportamiento de BC,  $PM_{2.5}$  y su relación con los incendios forestales en el distrito de Chanchamayo durante el periodo de estiaje 2023, con el objetivo de llenar este vacío de conocimiento y proporcionar una base sólida para la toma de decisiones informadas que promuevan el bienestar local y la preservación del medio ambiente.

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Fundamentación del problema

A nivel mundial existen evidencias de que las principales alteraciones que viene atravesando nuestro planeta tierra es a causa del cambio climático y su variabilidad espacio temporal natural producto de las malas prácticas antropogénicas, generando una gran cantidad de GEI que se han ido acumulando en la atmósfera, siendo una de sus principales fuentes la contaminación atmosférica, ya que se caracteriza por la presencia de contaminantes atmosféricos que afectan la calidad del aire (González, 2012).

El aumento de la industrialización, la urbanización y la actividad humana ha contribuido significativamente a la emisión de contaminantes atmosféricos como el material particulado, siendo catalogado como uno de los contaminantes que más afecta a la salud (Cachon et al., 2014). El PM es una mezcla compleja de partículas que se encuentran suspendidas en el aire de diferente tamaño, forma, composición química y origen, siendo las partículas finas, PM<sub>2.5</sub>, que se caracterizan por su tamaño aerodinámico menor o igual a 2.5 µg, las más perjudiciales para la salud humana y ecosistemas (EPA, 2023a).

El BC es un contaminante atmosférico asociado al material particulado que destaca por su gran impacto en la salud y medio ambiente; este contaminante es producto de distintas fuentes de contaminación como el parque automotor, quema de biomasa, combustible fósil, entre otros, causando distintas enfermedades cardiovasculares, respiratorias e inclusive cambios en la función cerebral y rigidez arterial, comprometiendo de manera directa el sistema circulatorio, nervioso y especialmente el respiratorio (Jeong & Park, 2018; Gobbo et al., 2016). Asimismo, de acuerdo al reporte de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022) la contaminación del aire en las ciudades grandes en diferentes partes del mundo provoca cada año 4.2 millones de muertes prematuras, el cual se debe a la exposición de aire contaminado por material particulado fino siendo Asia sudoriental y Pacífico Occidental los países con mayor carga de registro de muertes a nivel mundial.

Los incendios forestales tienen una gran preocupación a nivel mundial debido a los contaminantes que se generan durante su emisión, su interferencia con la radiación solar y su contribución al cambio climático (Castillo et al, 2003). En el Perú, de acuerdo al reporte realizado por Zubieta et al., (2023) en colaboración con el Ministerio del Ambiente (MINAM) y el Instituto Geofísico del Perú (IGP), donde precisan que el número de incendios forestales durante los últimos 20 años se ha incrementado de manera severa, asimismo, se registra en periodos secos, es decir, en época de estiaje (Zubieta et al., 2023). El distrito de Chanchamayo

a la actualidad enfrenta una rápida transformación en términos de desarrollo urbano y actividades económicas no ha sido la excepción de sufrir los efectos adversos de la contaminación atmosférica. Los incendios forestales, tanto causados por factores naturales como por actividades antropogénicas, son un fenómeno recurrente en la región Junín (Manta & León, 2004). Estos incendios no solo tienen un impacto directo en la pérdida de vegetación y biodiversidad, sino que también liberan cantidades significativas de PM, entre ellos el  $PM_{2.5}$  Y BC, y otros contaminantes al ambiente. Teniendo en cuenta los efectos a la salud y al ambiente de los incendios forestales, así como la escasa información que se tiene sobre el comportamiento de este contaminante, aparecen muchas preguntas sobre la relación que mantienen con los incendios forestales y el  $PM_{2.5}$ , razón por la cual, este estudio determina la relación que mantienen estas tres variables y evalúa su variabilidad en el periodo de estiaje, y así, llenar ese vacío de conocimiento en el distrito de Chanchamayo. Asimismo, esta investigación contribuirá a la construcción de una base sólida de conocimiento científico que guíe la toma de decisiones informadas y promueva el bienestar de la localidad y la preservación del medio ambiente en el distrito.

## **1.2. Formulación de Problema**

### **1.2.1. Problema general**

¿Cuál es la relación entre el comportamiento del carbono negro,  $PM_{2.5}$  y los incendios forestales en el periodo de estiaje en Chanchamayo, 2023?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- ¿Cuál es la variabilidad del carbono negro en Chanchamayo?
- ¿Cuál es la fluctuación del  $PM_{2.5}$  en el periodo de estiaje en Chanchamayo?
- ¿Cuál es la variabilidad de los incendios forestales en periodo de estiaje en Chanchamayo?
- ¿Cuál es la correlación entre el carbono negro,  $PM_{2.5}$  e incendios forestales?
- ¿Cuál es el porcentaje de aporte de las fuentes locales y externas del carbono negro durante el periodo de estiaje?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Analizar la relación entre el comportamiento del carbono negro,  $PM_{2.5}$  y los incendios forestales en el periodo de estiaje en Chanchamayo, 2023.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Analizar la variabilidad del carbono negro en Chanchamayo.

- Describir la fluctuación del  $PM_{2.5}$  en el periodo de estiaje en Chanchamayo.
- Determinar la frecuencia del número de incendios en Chanchamayo.
- Determinar la correlación entre el carbono negro,  $PM_{2.5}$  e incendios forestales.
- Estimar el porcentaje de aporte de las fuentes locales y externas del carbono negro.

#### 1.4. Definición y operacionalización de variables

**Tabla 1**

*Operacionalización de variables*

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA
Carbono negro	Es un aerosol carbonoso emitido por la combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montañas [INAIGEM], 2023).	Comportamiento temporal	*Concentración de carbono en la atmósfera.	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
		Fuentes de emisión	*Porcentaje de aporte de fuentes locales y externas de emisión de carbono negro.	%
$PM_{2.5}$	Son partículas muy finas que tienen un tamaño de diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros y que se encuentran suspendidas en el aire (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 2025).	Comportamiento temporal	Concentración $PM_{2.5}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Incendios Forestales	Es la propagación libre y no programada del fuego sobre la	Ocurrencia de Incendios	Frecuencia de focos de calor en	Unidad

	vegetación en los bosques, selvas, zonas áridas y semiáridas (Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI], 2024)		el periodo de estiaje.	
--	---	--	------------------------	--

## 1.5. Hipótesis

### 1.5.1. Hipótesis general

Existe una relación directa significativa entre el comportamiento del carbono negro,  $PM_{2.5}$  y los focos de incendios forestales, donde la presencia de carbono negro está asociada con un aumento en la frecuencia y la intensidad de los incendios forestales.

### 1.6. Justificación

El presente estudio es de vital importancia para la salud y medio ambiente, puesto que busca estudiar la correlación del comportamiento del carbono negro, partículas  $PM_{2.5}$  y focos de incendios forestales en el distrito de Chanchamayo durante el periodo de estiaje del 2023, y así, contribuir con el aporte científico a las crecientes preocupaciones sobre la calidad del aire y los impactos directos e indirectos de los incendios forestales en la salud humana y el ecosistema local, a través de un enfoque multidisciplinario que incluye métodos analíticos, muestreo de aire y técnicas de análisis geoespacial, por lo que se espera obtener una comprensión profunda sobre el comportamiento de estas tres variables.

Asimismo, los resultados obtenidos proporcionarán datos y evidencia empírica que servirán como base para futuras investigaciones y para la formulación de recomendaciones dirigidas a autoridades locales y organismos ambientales. Del mismo modo, se espera que el estudio fomente la conciencia pública sobre la importancia de la conservación de los ecosistemas y la adopción de prácticas sostenibles en el distrito de Chanchamayo y áreas circundantes.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes

##### 2.1.1. Internacional

Martins et al., (2018), en su estudio denominado “Transporte de largo alcance de los aerosoles procedentes de la quema de biomasa sobre el sureste de Sudamérica y sus implicaciones en la calidad del aire”, para lo cual se estudiaron dos tipos de eventos ocurridos en los meses de agosto y septiembre del 2016 con el fin de evaluar las condiciones sinópticas atmosféricas de eventos de transportes de partículas empleando el Jet Sudamericano de Bajo Nivel (SALLJ) para definir el origen de masas de aire. Los resultados mostraron que los incendios significativos registrados asociado con las condiciones sinópticas, favorecieron al aumento de concentraciones de  $PM_{2.5}$ , entre 70-87%; por ende, el transporte de aerosoles fue un factor determinante 0 que las concentraciones de  $PM_{2.5}$  superen la calidad del aire de la región.

Abanto et al., (2020) en su artículo “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”. El periodo de medición se llevó a cabo desde el 01 de marzo al 30 de abril de 2016; para el registro de concentración de carbono negro (BC) se empleó un Extinciómetro Fotoacústico mientras que para el CO y el CO<sub>2</sub> se usó un analizador que utiliza la técnica de la Espectroscopia de Cavidad “Ring-Down”. Los resultados mostraron una buena correlación en el ajuste lineal de CO-CO<sub>2</sub>, BC-CO y BC-CO<sub>2</sub>, lo que determina que estos contaminantes provendrían de las mismas fuentes, del mismo modo, se observó un efecto fin de semana principalmente en las horas de máximo tráfico.

Cantillo & Lozano (2020) en su tesis sobre la “Evaluación de las concentraciones de Black Carbón en la ciudad de Barranquilla Atlántico”, en la cual identificaron las fuentes mediante el cálculo del Exponente de Absorción de Ångström (AAE) utilizando el equipo Etalómetro. La concentración promedio de BC fue de  $1.09 \pm 1.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , siendo los días hábiles los que presentaron elevados picos entre las 6:00 - 9:00 am. Los resultados para el AAE obtenidos confirmaron que la combustión de combustibles fósiles fueron los que predominaron con un aporte del 58%, mientras que para la quema de biomasa un 6% y para la influencia de las dos fuentes en el mismo periodo de tiempo un 36%. Asimismo, estas modelaciones mostraron los puntos de

incendios, con lo cual se determinó que el mayor aporte a las concentraciones de BC provenían del Este y Noreste de la ciudad de Barranquilla Atlántico.

### **2.1.1. Nacional**

El primer estudio de quemadas en la Amazonía del Perú es el de Suarez et al. (2006) titulada “Estudio de la variación estacional de ozono troposférico y aerosoles del Perú relacionado a las quemadas de vegetación en la Amazonía” donde como resultado se presentó las evidencias del transporte transfronterizo de contaminantes del aire hacia el Perú desde Brasil, mediante datos de satélite para cuantificarlo y evaluar el papel que tiene este transporte en la composición química de la atmósfera de la región peruana. Los resultados mostraron valores máximos durante la última parte del periodo seco (agosto a noviembre), sin embargo, este incremento no encontraría explicación solamente en las quemadas locales, sino que además tendría la influencia del transporte de contaminantes del lado de la región de Brasil.

Zegarra (2019) en su estudio denominado “Determinación de fuentes de emisión de carbono negro mediante el análisis de retrotrayectorias de masas de aire sobre el Nevado Coropuna, Arequipa”, para el desarrollo de esta investigación se realizaron mediciones de  $PM_{2.5}$  y posteriormente, las concentraciones de Carbono Negro, en el Nevado Coropuna mediante el equipo MiniVol Ecotech 1100; asimismo, con el apoyo del software HYSPLIT se determinaron las fuentes del carbono negro. Como resultado mostro que los orígenes de masas de aire, fueron muy dispersos en todo el continente Sudamericano. Es así que un 5% del total de trayectorias trazadas, tuvieron su origen dentro del territorio nacional, mientras que un 67% lo hicieron en el Océano Pacífico y un 33%, sobre superficie terrestre, fuera de Perú, por lo tanto, se concluyó que las fuentes de emisión de carbono negro, se encontraron fuera de la región Arequipa y que, en su mayoría, fueron fuentes naturales.

Álvarez-Tolentino & Suárez-Salas (2020) en su estudio “Aporte cuantitativo de las fuentes de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en sitios urbanos del valle del Mantaro, Perú” donde se analizaron los datos obtenidos en el periodo monitoreo mensual que comprendió desde julio del 2007 hasta octubre de 2008 en las zonas urbanas de Jauja, Concepción y Huancayo. Para el monitoreo se empleó un muestreador de bajo volumen, Thermo Scientific Partisol. La composición química elemental se obtuvo mediante la técnica de fluorescencia de rayos X y se les aplicó el análisis de componentes principales con rotación varimax y análisis de componentes principales absoluto. Con los datos obtenidos se contrastaron los agrupamientos de elementos químicos mediante el factor de enriquecimiento y análisis de conglomerados jerárquico. Por lo tanto, los resultados

indicaron que, en Huancayo, una zona urbana, las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  fueron notablemente superiores ( $p < 0.05$ ) en comparación con otras áreas. Además, se sobrepasó el Estándar de Calidad Ambiental para Aire (ECA) establecido por la legislación peruana para ambos tamaños de partículas. En total se detectaron cinco fuentes de emisión para los sitios urbanos del Valle del Mantaro: polvo del suelo (Al, Ca, Si, Fe, Ti, Mn y K), quema de biomasa (Cl, Br, K), vehículos (Cu, Zn, Cl, Cr), combustible-aceite (Ni) y fundición (Pb, Zn, As y Cu), siendo el polvo del suelo la principal fuente de aporte de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ .

Rocha & Huacho (2022) en su investigación denominado “Análisis del espesor óptico de aerosol debido a incendios forestales en la amazonia de Perú, Ecuador, Colombia, Brasil y Bolivia”, donde se basó en la obtención de datos de AOD a través del fotómetro solar Cimel CE-318T; los resultados mostraron un incremento de AOD en los meses de agosto y septiembre del 2019 con valores de [0.01 – 1.06] en la ciudad de Huancayo, demostrando que los aerosoles atmosféricos estarían siendo influenciado por los incendios forestales ocurridos en regiones amazónicas de Bolivia y Brasil.

Miranda (2025) en su tesis sobre “Identificación de hot spots de carbono negro en la cordillera Huaytapallana con el modelo numérico WRF-CHEM”, este estudio llevado a cabo en los andes centrales del departamento de Junín mostraron, que hay predominancia de fuentes estacionarias y permanentes por el flanco oriental, siendo JJA y SON donde las concentraciones de BC son altas; además, los patrones sinópticos como la circulación local favorecieron la llegada de este contaminante al Huaytapallana. En promedio, se identificó que el 70% de BC que llega al punto de estudio proviene del norte, lo que lo convierte en la principal fuente de aporte. Por ende, este estudio demuestra la necesidad de abordar las zonas de Hot Spots de BC originada por estaciones permanentes y estacionarias.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Contaminación atmosférica**

Es la presencia de agentes químicos, físicos o biológicos en el aire, que al interactuar o incorporarse en la atmosfera, alteran o modifican su condición y composición natural, ocasionando efectos negativos que implican riesgo, daño o molestia para las personas, animales o plantas que se encuentran expuestos en el medio ambiente. Estos contaminantes son el resultado de diversas actividades antropogénicas, causas naturales, o la combinación de estas; se presentan en forma de aerosoles (PM), esto gases, que van desde algunos nanómetros ( $nm$ ) a decenas de micras ( $\mu m$ ) (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 2020)

### 2.2.1.1. Clasificación de contaminantes

De acuerdo a McGraw (2009), los contaminantes atmosféricos se pueden agrupar de la siguiente manera:

#### 2.2.1.1.1. Según su origen

##### a) Contaminantes primarios

Son sustancias emitidas directamente a la atmósfera desde distintas fuentes de emisión (industria, vehículos, naturales, entre otras). Entre los contaminantes que más destacan en este grupo son el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), hidrocarburos (HC), etc.

##### b) Contaminantes secundarios

Los contaminantes secundarios no son emitidos directamente de los focos de emisión, sino que se forma cuando los contaminantes reaccionan entre sí mediante reacciones químicas teniendo lugar en la atmósfera. Entre los contaminantes que más impacto generan son los nitratos de peroxiacetilnitrato (PAN), sulfatos (SO<sub>4</sub>), ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), nitratos (NO<sub>x</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), entre otros.

#### 2.2.1.1.2. Por su estado físico

##### a) Gases

Son residuos que se generan en estado gaseoso. Muchos de ellos son tóxicos para las personas dependiendo de sus concentraciones, y muy contaminantes para el agua y suelo.

##### b) Partículas

Son todas las partículas en estado sólido y líquido que se encuentran suspendidas en el aire, la mayoría suponen un peligro para la sociedad. Esta mezcla compleja contiene, entre otras cosas, hollín, humo polvo, polen, hollín, humo y pequeñas gotas.

#### 2.2.1.1.3. Por su composición química

a) **Orgánicos:** Son aquellos que contienen carbono (C) e hidrógeno (H).

b) **Inorgánicos:** Son aquellos que no contienen compuestos con carbono, excepto los compuestos simples de carbono (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>)

#### 2.2.1.1.4. Por el sitio donde se encuentran

a) **Aire del exterior:** Aire de la atmósfera.

**b) Aire del interior:** Dentro de las casas e inmuebles.

### **2.2.2. Material Particulado (PM)**

Es el resultado de una compleja mezcla de todas las partículas sólidas y líquidas que se encuentran suspendidas en el aire que pueden interactuar entre sí formando otros compuestos. Su composición depende del área donde se encuentran y la variedad de contaminantes al cual puede adherirse, por lo que la vida media de las partículas en suspensión varía desde segundos hasta meses. Cierta parte de las partículas introducidas por el hombre al ambiente sirven como 21 núcleos de condensación que influyen en la formación de nubes, lluvia y nieve (McGranahan & Murray, 2003).

Cabe mencionar que el material particulado es el más complejo entre los demás contaminantes, ya que es también un subproducto de los contaminantes gaseosos mezcla de sustancias orgánicas e inorgánicas; son emitidas directamente al aire mediante el hollín de diésel, polvo de las vías, el polvo de la agricultura y las partículas resultantes de procesos productivos (Fang, 2003).

### **2.2.3. Propiedades físicas del material particulado**

#### **2.2.3.1. Tamaño del material particulado**

La medida de una partícula está caracterizada por su diámetro el cual varía desde unos pocos nanómetros a decenas de micrómetros; según Reist (1993) de acuerdo a su diámetro aerodinámico se dividen en dos grandes grupos: fracción gruesa y fracción fina.

#### **a) Fracción gruesa (PM<sub>10</sub>)**

Se caracteriza por contener partículas gruesas con diámetro aerodinámico entre 2.5 y 10  $\mu\text{m}$ , puede incluir, el polvo generado por los procesos agrícolas, por el transporte, minería, así como, materiales no combustibles relacionados con la quema de combustibles fósiles. Contribuyen a la fracción gruesa, elementos como granos de polen, esporas de plantas, de igual forma, la evaporación del rocío del mar puede producirlas cerca de las zonas costeras (Eurofins, 2024)

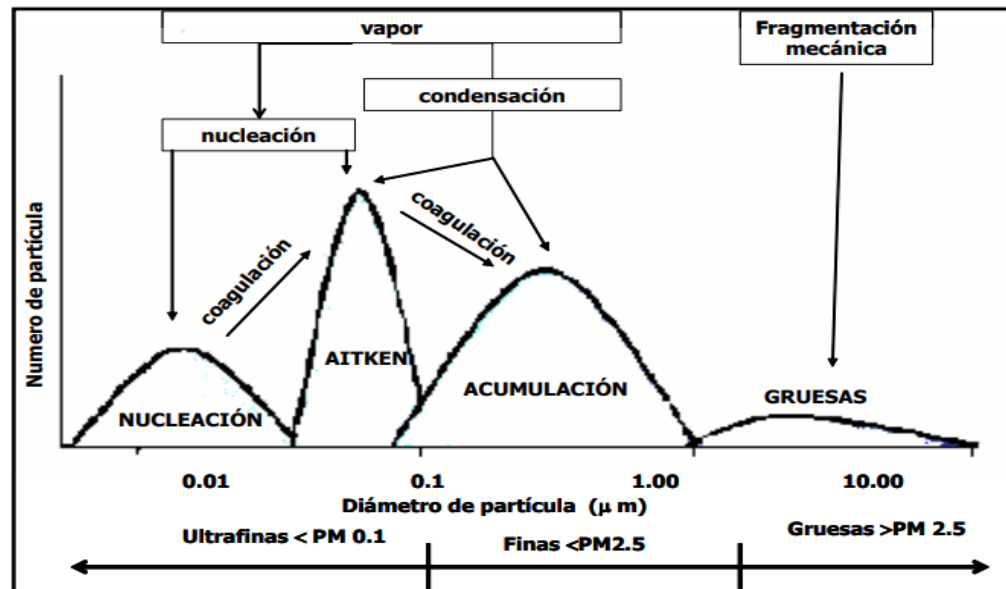
#### **b) Fracción fina (PM<sub>2.5</sub>)**

Son partículas que se caracterizan por tener un tamaño inferior a 2.5  $\mu\text{m}$  (PM<sub>2.5</sub>), éstas se forman inicialmente a través de un proceso llamado "sublimación" y luego crecen de tamaño gracias a la condensación, donde gases adicionales se solidifican sobre las partículas. Otro mecanismo de formación implica la coagulación, donde dos o más partículas se fusionan para crear una única cadena (EPA, 2023a).

Estas partículas son tan finas, casi 100 veces más delgadas que un cabello humano que agrupan a partículas sólidas o líquidas que contienen hollín y otros derivados de las emisiones de vehículos y fábricas; son respirables al 100% y pueden alojarse en los bronquios, bronquiolos y alveolos pulmonares (EPA, 2023a).

### Figura 1

*Distribución típica de las partículas en la atmósfera donde se muestran las partículas finas y las gruesas*



Fuente: Watson & Chow (2000)

#### 2.2.3.2. Composición

Dentro de las muestras de composición de material particulado se encuentran dos tipos de composición: el orgánico, donde se encuentran los carbonatos ( $\text{CO}_3$ ) y silicatos ( $\text{SiO}_4$ ) que se encuentran presentes en la corteza terrestre, y el inorgánico donde se tiene a los sulfatos ( $\text{SO}_4$ ), amonio ( $\text{NH}_4$ ), nitratos ( $\text{NO}_3$ ), cloruro ( $\text{Cl}$ ), sodio ( $\text{Na}$ ), potasio ( $\text{K}$ ). Asimismo, se encuentran compuestos procedentes de los desgastes de freno, pero en pequeñas cantidades (traza), y neumáticos de los vehículos, vanadio ( $\text{V}$ ), zinc ( $\text{Zn}$ ), y arsénico como inorgánicos (Bloss, 2014).

#### 2.2.3.3. Abundancia

A la actualidad, en el Perú se han desarrollado y ajustado a los límites legislativos para el monitoreo de la calidad del aire; estas se relacionan en la abundancia con la concentración de masa por debajo de un cierto límite, generalmente  $\text{PM}_{10}$  ( $10 \mu\text{m} \leq$ ) y  $\text{PM}_{2.5}$  ( $2.5 \mu\text{m} \leq$ ), son estos diámetros los que están asociados al riesgo de salud en las personas por tratarse de partículas finas,

PM<sub>2.5</sub>, inhalables (alveolares) y respirables, PM<sub>10</sub>, (torácicas). La abundancia de material particulado se determina de acuerdo a la concentración promedio que se maneja para cada localidad asumiendo un kilómetro de altura respecto a la capa límite (Bloss, 2014).

#### 2.2.3.4. Fuentes de emisión del material particulado *PM*<sub>2.5</sub> y *PM*<sub>10</sub>

Las principales fuentes de emisión son el parque automotor, seguido de la biomasa, industrias, entre otros. De acuerdo a Morand & Maesano (2004), el 13% de las emisiones de PM<sub>10</sub> están comprendidas por la combustión incompleta del motor diésel; a continuación, de acuerdo a un recuento realizado por el Ministerio del Ambiente (MINAM), se ubicaron las principales ciudades y sus fuentes de contaminación en el Perú (Tabla 2).

**Tabla 2**

*Principales ciudades y sus fuentes de contaminación en el Perú*

<b>Ciudad</b>	<b>Principales fuentes de contaminación</b>
Arequipa	Industrias ladrilleras y cementeras, parque automotor
Ayacucho	Fuentes naturales y parque automotor
Cajamarca	Parque automotor
Chiclayo	Ladrilleras, quema de caña de azúcar y parque automotor
Cusco	Parque automotor
Iquitos	Parque automotor
Huancayo	Parque automotor y quema de biomasa
Lima	Industrias y parque automotor
Puno	Fuentes fijas y móviles, parque automotor
Trujillo	Industrias, parque automotor quema de caña de azúcar

**Fuente:** MINAM (2014)

#### 2.2.4. Carbono negro (BC)

El carbono negro, es un tipo de aerosol carbonáceo producto las llamas de procesos de combustión incompleta por motores diésel y sus derivados, combustión de biomasa (incendios forestales, quemas rurales, chimeneas a leña, etc.), plantas termoeléctricas a carbón y otras fuentes que queman combustibles fósiles (Bond et al., 2013). La partícula de carbono negro se encuentra generalmente en la atmósfera como partículas cuasi esféricas compuestas de grafito. Miles de esférulas de grafito coagulan formando aglomerados o cadenas fractales, con diámetros aerodinámicos entre 10 y 200 nm (Invernizzi et al. 2011).

#### 2.2.4.1. Propiedades físicas

De acuerdo a Bond et al. (2013) indica que lo que hace distinguible AL BC de otros tipos de aerosoles y otras formaciones de carbono son la combinación única de sus propiedades físicas, como indica

- a) **Composición:** Su estructura de tipo grafítico que contiene una alta fracción de átomos de carbono unidos sp<sup>2</sup>. Gracias a esto, posee baja reactividad química en la atmósfera, fuerte absorción óptica y su eliminación es lenta mediante procesos químicos.
- b) **Morfología:** El material particulado se presenta en la forma de conglomerados de diminutas esferas, pudiendo agruparse de manera individual con diámetros que oscilan entre 10 y 50 nanómetros.
- c) **Volatilidad:** El índice refractorio del BC es independiente de la longitud de onda, lo que le permite absorber en todas las longitudes de onda del espectro visible. La temperatura de volatilización es cerca de 4000 K, lo que significa que mantiene su forma básica a altas temperaturas, proporcionándole una alta estabilidad en la atmósfera, y mayor tiempo de residencia atmosférica.
- d) **Solubilidad:** Este aerosol carbonáceo es insoluble en agua, como también en solventes orgánicos, incluyendo acetona y metanos, entre otros componentes de aerosoles atmosféricos. Debido a esta propiedad, posee eliminación lenta por nubes y precipitación, a menos que esté recubierto con compuestos solubles en agua.
- e) **Absorción de la luz:** Según Bond & Bergstrom (2006), el carbono negro es un "componente refractario de las partículas finas de aerosol que absorbe fuertemente la luz visible y emite luz en el infrarrojo cercano". Por lo tanto, podemos afirmar que el carbono negro es conocido por su alta capacidad de absorber la luz visible en todas las longitudes de onda de su rango espectral. Cuando se emite recientemente a la atmósfera, tiene una eficiencia de absorción de masa de al menos 5 m<sup>2</sup>/g a una longitud de onda de 550 nm. Esta propiedad provoca la reducción del albedo de las nubes, la nieve y el hielo, el enfriamiento de la superficie, la curación atmosférica, todo lo cual tiene efectos sobre la radiación solar y el clima.

#### 2.2.4.2. Fuentes de carbono negro

Las fuentes de carbono negro, de acuerdo a Bond et al. (2013), se han categorizado cinco fuentes de carbono negro, los cuales se mencionan a continuación:

- a) **Industrias a carboneras:** Contribuyen aproximadamente 9% de las emisiones globales, se reparten principalmente en pequeñas calderas.
- b) **Motores diésel:** Contribuyen aproximadamente 20% de las emisiones globales CN en 2000.
- c) **Combustibles sólidos residenciales:** Contribuyen aproximadamente 25% de las emisiones globales, se consideran (madera, residuos agrícolas, estiércol y carbón).
- d) **Quema de biomasa:** Contribuyen aproximadamente el 42% de las emisiones globales.
- e) **Otras fuentes de emisiones:** Los cuales no se consideran en los grupos anteriores, están emisiones industriales y residenciales que contribuyen con 85%.

#### **2.2.4.3. Carbono negro y su efecto en la salud humana**

Los contaminantes atmosféricos pueden afectar a los seres humanos de dos maneras: indirectamente a través de plantas y animales, o directamente mediante contacto físico o inhalación. Cada una de estas formas de exposición conlleva efectos distintos, ya que penetran en diferentes partes del cuerpo humano.

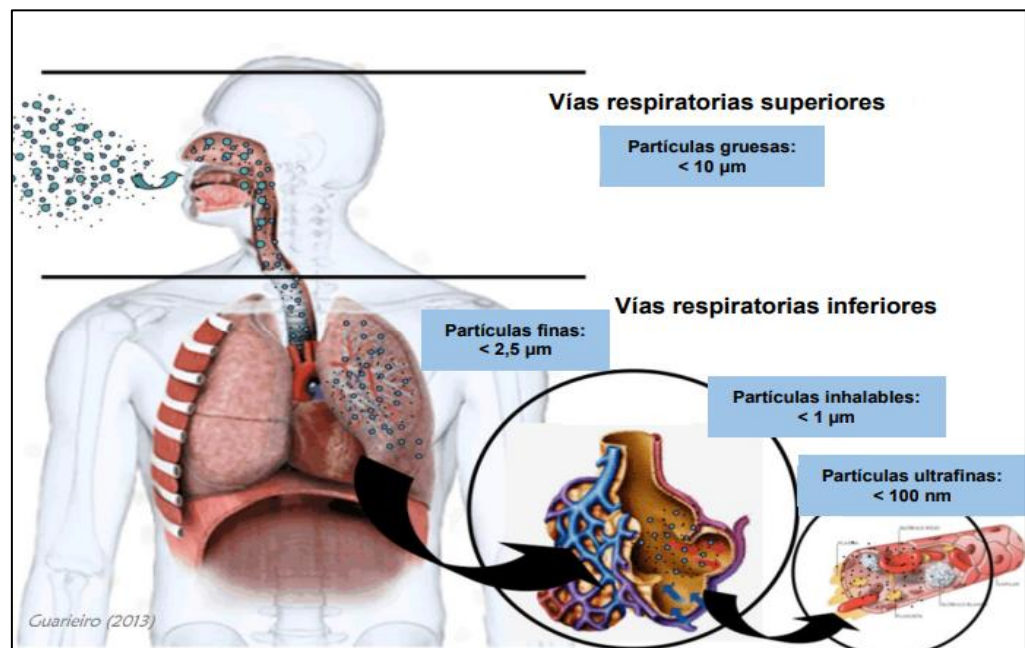
La exposición al BC, puede dar lugar a enfermedades respiratorias y cardíacas. Estudios han demostrado que millones de muertes prematuras anuales son atribuibles a la influencia del BC y el ozono troposférico (O<sub>3</sub>). En el 2011, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) estimaron que aproximadamente 2.4 millones de muertes prematuras podrían evitarse con la disminución de las concentraciones de estos de BC y O<sub>3</sub> (AIDA & IEMA, 2016).

El BC tiene un notable impacto en la calidad del aire y ha sido asociado con una serie de problemas de salud, incluyendo enfermedades respiratorias, cardiopulmonares, cardiovasculares e incluso cáncer. Los vapores de diésel, que contienen una alta concentración de BC, son especialmente responsables de estos trastornos (Krecl et al., 2016). La Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA) ha respondido a esta problemática mediante la implementación de medidas regulatorias para controlar las concentraciones de partículas finas, con el propósito de mejorar la calidad del aire y, por consiguiente, mitigar los impactos en la salud humana. Estudios epidemiológicos han confirmado las partículas finas no se eliminan fácilmente y al depositarse en las vías

respiratorias ocasionan problemas pulmonares y cardíacos, más aún, si las partículas llevan adsorbidos compuestos tóxicos, como metales pesados e hidrocarburos aromáticos policíclicos (Figura 2). No obstante, en la actualidad se ha establecido una clara relación entre las concentraciones de BC y problemas cardiovasculares (EPA, 2023b). Asimismo, otro de los efectos que causa el BC por su exposición son el bajo peso de los bebés recién nacidos, arritmias, cáncer de pulmón y el asma bajo; esto se debe a que el contaminante atmosférico presenta una alta porosidad lo cual facilita la absorción de partículas de otras especies depositándose en distintos órganos o ingresan al torrente sanguíneo, afectando negativamente la salud (Peña, 2014).

### Figura 2

*Material particulado y su llegada a las diferentes zonas del tracto respiratorio en el cuerpo humano*



Fuente: EPA (2023b)

#### 2.2.4.4. Carbono negro y su efecto en el clima

De acuerdo con el Instituto de Gobernanza y Desarrollo Sostenible (IGSD, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos las emisiones de Carbón Negro constituyen la segunda mayor contribución al cambio climático, por detrás del  $\text{CO}_2$  (IGSD, 2008), debido a su alta capacidad de absorción teniendo un impacto de calentamiento hasta 1500 veces más fuerte que el  $\text{CO}_2$  por unidad de masa.

Los efectos del BC sobre el clima dependen de distintos factores, tales como: punto posición geográfica desde donde se esté generando, interacción con

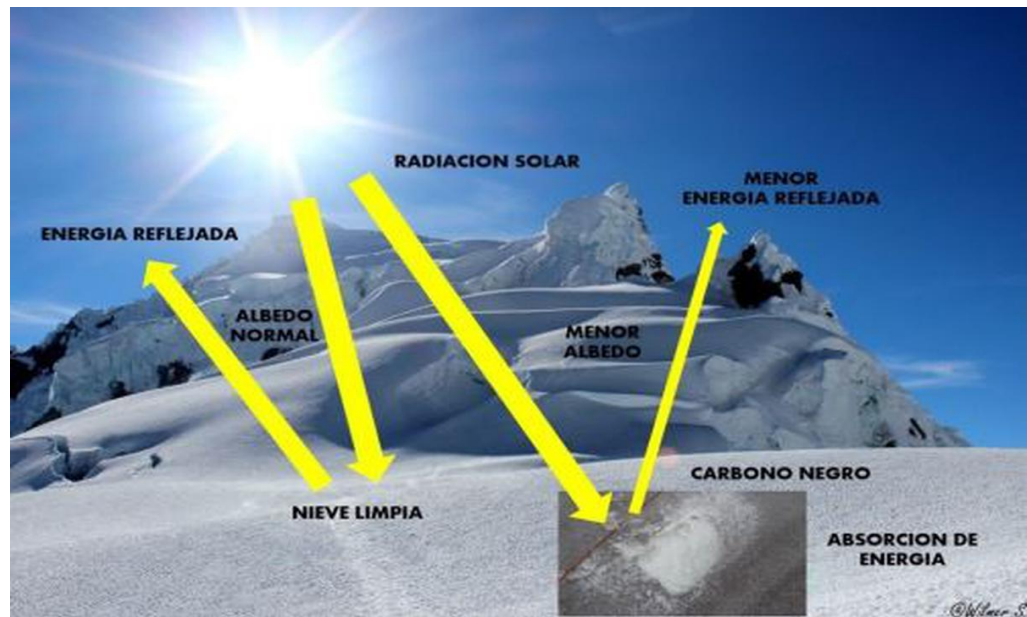
las nubes, tiempo de vida, presencia de otros contaminantes y acción del viento que interviene directamente en el proceso de mezcla. De esta manera, por su capacidad de absorción al estar suspendido en el aire o sobre la superficie actúa reduciendo la cantidad de calor y tiende a volver al espacio.

Asimismo, Díaz, (2016), señala que el BC influye en el clima a través de mecanismos directos como indirectos, el cual está estrechamente asociado al forzamiento radiactivo y los cambios de temperatura. El forzamiento radiativo se refiere a cómo un contaminante altera el equilibrio entre la radiación solar que entra y la radiación infrarroja que sale de la tierra, por lo tanto, un contaminante que incrementa la energía en el sistema climático de la tierra se dice que tiene un "forzamiento radiativo positivo", lo que resulta en un aumento de la temperatura del sistema. De lo contrario, un contaminante que tiene un "forzamiento radiativo negativo" reduce la cantidad de energía en el sistema climático permitiendo su enfriamiento (Días, 2016). Además del forzamiento radiactivo, el carbono negro es asociado con otros efectos incluidos el oscurecimiento de superficies y cambios en los patrones de precipitación (mecanismos indirectos). Como señala Días (2016), el forzamiento radiactivo del BC ocurre mediante tres efectos:

- Forzamiento directo, absorción directa de la radiación solar y terrestre
- Forzamiento albedo en nieve/hielo, resultante del oscurecimiento de nieve y hielo.
- Forzamiento indirecto, resultante de un rango de efectos del impacto del carbono negro en las nubes, incluyendo su tiempo de vida, reflectividad y composición

### Figura 3

*Forzamiento albedo del BC sobre las superficies de hielo*



**Fuente:** INAIGEM (2018)

Las superficies de hielo poseen la capacidad de reflejar hasta el 90% de radiación solar al ambiente, no obstante, las partículas carbonáceas sobre el hielo ocasionan el efecto albedo en la nieve (Figura 3), donde la superficie de hielo que más acumulación de BC tiene, absorbe significativamente la energía solar, lo cual conlleva a un retroceso glaciar, y como consecuencia, mayor retroceso hídrico (INAIGEM, 2018).

#### 2.2.4.5. Técnicas de medición

La medición del carbono negro proveniente de incendios forestales también puede realizarse utilizando varias técnicas. A continuación, con base al estudio realizado por el Consejo Internacional de Transporte Limpio (ICCT, 2016) se presentan algunas de las técnicas de medición más comunes utilizadas para evaluar la concentración y la distribución de carbono negro generado por incendios forestales:

1. **Espectroscopía:** Esta técnica de la espectroscopia de absorción atómica se basa en la medida de la absorción de la luz por el carbono negro en el rango de longitud de onda de la luz visible e infrarroja cercana. Se utiliza un espectrofotómetro para medir la cantidad de luz absorbida por las partículas de carbono negro, es decir, mide las concentraciones específicas de carbono dentro de una muestra. Las longitudes de onda de las radiaciones de una partícula de carbono negro y la eficiencia con la que se absorben dependerán

de la estructura atómica y de las condiciones del medio, como, por ejemplo: pH, temperatura, fuerza iónica y constante dieléctrica.

2. **Microscopía óptica:** Esta técnica utiliza un microscopio óptico para examinar las partículas de carbono negro en una muestra de aire.
3. **Microscopía electrónica:** Se basa en el uso de un microscopio electrónico para examinar las partículas de carbono negro a nivel microscópico. Esto permite una mayor resolución que la microscopía óptica y puede proporcionar información detallada sobre la estructura y la composición química de las partículas.
4. **Métodos químicos:** Para esta técnica se utilizan diversos métodos químicos para medir la cantidad de carbono negro en una muestra de aire. Uno de los métodos más comunes es la técnica del humo negro, que implica la combustión de una muestra de aire en un tubo de cuarzo a alta temperatura. El carbono negro en la muestra se oxida a dióxido de carbono y se mide la cantidad de gas producido.
5. **Monitorización en línea:** Se utilizan monitores de carbono negro para medir continuamente la concentración de este contaminante en el aire. Estos monitores utilizan técnicas de espectroscopía de absorción o fotometría para detectar la presencia de carbono negro en el aire en tiempo real.

#### 2.2.5. Incendio forestal

Con base al argumento presentado por el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR, 2018), un incendio forestal, también conocido como fuego forestal, es descrito como el fuego no deseado de cualquier origen, que no es estructural; generalmente se propaga sin control en los recursos forestales causando daños ecológicos, económicos y sociales (Figura 4). Este fuego es la reacción rápida producto de la unión del oxígeno del aire, la cobertura vegetal como combustible y una fuente de calor, a estos elementos se le denomina triángulo del fuego; que se manifiesta en forma de llamas y humo.

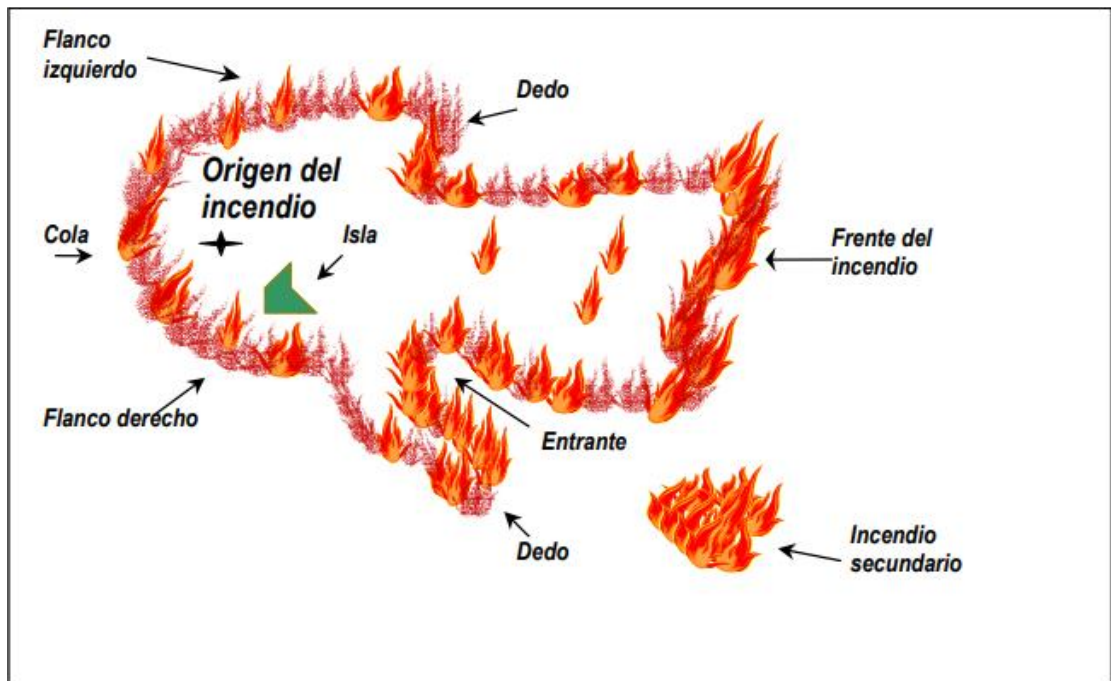
Por otro lado, es importante recalcar que en el Perú existe una actividad ampliamente distribuida denominada “quema”. Dicha actividad constituye una práctica cotidiana que se lleva a cabo en tierras donde predomina la actividad agrícola y pecuaria; sin embargo, su uso se ha hecho muy intensivo con la finalidad de eliminar malezas y expandir la frontera agrícola. Así los pequeños incendios intencionados, comúnmente denominados “quemados”, no sobrepasan una hectárea y media en promedio, pero en

conjunto han ocasionado una acelerada pérdida de la superficie boscosa (Manta & León, 2004)

En la parte selva y sierra del Perú, la presencia de fuego se debe principalmente a la práctica masiva de realizar quemas. El tiempo en el que generalmente llevan a cabo esta práctica es entre julio y diciembre, la que coincide con la época seca o verano regional, estiaje, y donde se encienden tantos bosques recién tumbados, pastos, entre otros (MINAM, 2011). Como por ejemplo la quema de pastos como práctica ancestral con la finalidad de lograr la expansión agrícola que origina el cambio de uso de suelo (SERFOR, 2018).

#### Figura 4

*Partes de un incendio forestal*



**Fuente:** Zarate (2004)

#### 2.2.5.1. Tipos de incendios forestales

De acuerdo a CENEPRED (2019), existen tres tipos:

##### a) Incendios de subsuelo

Este tipo de incendio, son pocos frecuentes, se produce cuando se da la quema de la materia orgánica que se encuentra entre la superficie y la capa mineral del suelo; esta materia orgánica está compuesta por hojas muertas, virutas, residuos vegetales en descomposición, humus, raíces, etc. Este tipo de incendios puede ser que sean detectados sólo por la emisión de humo, ya que normalmente queman sin llama.

Avanzan lentamente debido a la insuficiencia de oxígeno y pueden mantenerse incluso con contenidos elevados de humedad durante días o semanas, trayendo como consecuencia daños considerables en el ciclo ecológico (Frandsen, 1987).

**b) Incendios de superficies**

Según, Trabaud (1992), se consideran dentro de este tipo de incendios aquellos en los cuales se quema el material combustible situado sobre la superficie del suelo, sin alcanzar las copas de los árboles. Esta capa comprende ramas muertas, hojas, restos de talas troncos caídos, vegetación herbácea viva y matorrales. Este tipo de incendios son los más comunes y también los más estudiados.

**c) Incendio de copas**

Es el incendio que se produce en la parte superior de los árboles, y se extiende a través de ellos. Generalmente, se genera en bosques de árboles altos y densos y son los que presentan mayor dificultad para la extinción y peores efectos sobre la masa forestal (Trabaud, 1992). Se subdividen en tres categorías (Figura 5), tal como se muestra a continuación.

- **Incendios de copas pasivos**

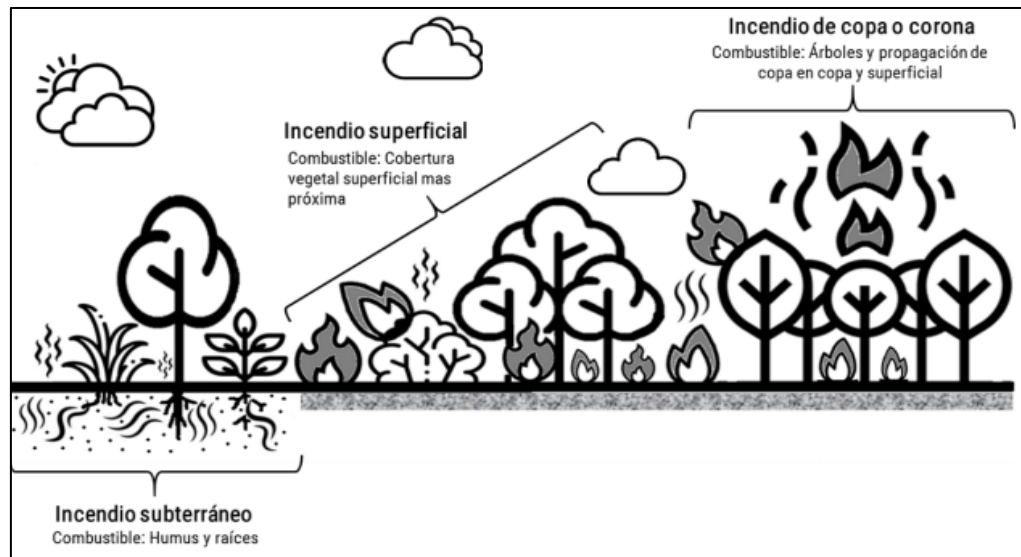
Ocurren cuando el calor del frente de un incendio en el suelo enciende intermitentemente las hojas, ramas y troncos de los árboles.

- **Incendios de copas activos**

Involucran la combustión simultánea en la superficie y en las copas de los árboles, sostenidos por el calor de las llamas en el suelo.

- **Incendios de copas independientes**

Se propagan rápidamente a través de las copas sin depender de un incendio en el suelo.

**Figura 5***Tipología de los incendios forestales*

**Fuente:** CENEPRED (2019)

Los incendios pueden ocurrir en el subsuelo, en la superficie o en las copas de los árboles, y a menudo se presentan en combinaciones diversas; su naturaleza del incendio puede cambiar según una serie de factores que influyen en este fenómeno.

#### 2.2.5.2. Técnicas de medición de incendios forestales

1. **Satélites:** Son una herramienta importante que permite la detección y monitoreo de incendios forestales mediante la observación de la temperatura de la superficie terrestre y la presencia de humo. Esta técnica puede proporcionar información en tiempo real, ya que permite una cobertura amplia y una rápida identificación de los incendios, aunque no siempre es precisa en cuanto a la localización exacta del fuego, ayudando así a prevenir su propagación y minimizar su impacto en el medio ambiente y la sociedad (NASA, 2021).

A continuación, se muestra una lista de algunos satélites y/o sensores útiles (Tabla 3) para la detección de fuegos relacionados a la vegetación.

**Tabla 3***Satélites para detección de incendios relacionados a la vegetación*

<b>Satélites</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación para incendios forestales</b>
Landsat	El primer Landsat se lanzó en el año 1972; es un equipo multiespectral con píxeles de 30 metros con una banda pancromática de 15 metros y, con un tiempo de revisita de 16 días.	*Humedad de la vegetación: NDWI y el Índice de estrés evaporativo. *Extensión y tipos de vegetación: Clasificación de la cobertura terrestre
Sentinel-2	El primer sentinel-2 fue lanzado el año 2015; es un equipo multiespectral con bandas de píxeles de 10,20 y 60 metros y, con un tiempo de revisita de 2 a 5 días.	*Etapa y Salud de la Vegetación: Variedad de índices de vegetación, incluyendo NDVI, EVI, SAVI
MODIS	El MODIS cuenta con una resolución espacial de 250m, 500m y 1km; asimismo, la resolución temporal es diaria, cada 8 días, 16 días, mensual o anual. La cobertura espectral que posee es de 36 bandas.	*Estructura de la Vegetación: Índice de Área Foliar *Extensión y tipo de vegetación: Clasificación de la cobertura terrestre. *Salud y Etapa de la Vegetación: NDVI, EVI, Fenología de Alta Resolución Temporal.

Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)	Este satélite fue lanzado en el año 2012 el cual recolecta imágenes visibles e infrarrojas. Cuenta con una resolución temporal diaria y de cobertura global; en la resolución espacial cuenta con 5 bandas de alta resolución de 375m y 16 bandas de resolución moderada de 750m.	*Salud de la Vegetación: El producto VIIRS de la salud de la vegetación incluyen el Índice de la condición de la vegetación, Índice de la condición de la temperatura y el Índice de la Salud de la Vegetación. *Etapas de la Vegetación: Índices de Vegetación incluyen NDVI y EVI
SMAP	El primer equipo de este satélite fue lanzado en enero del 2015. Mide la humedad en los 5cm superiores del suelo mundialmente cada 3 días.	*Muestra la información sobre sequías también puede identificar áreas con combustible seco. *Humedad de la Vegetación: La humedad del suelo sirve de proxy para la humedad de la vegetación y el estrés evaporativo.
Sentinel-1	Los satélites Sentinel-1 son de la Agencia Espacial Europea (ESA) y su primer lanzamiento fue en abril del 2014. Cuenta con una resolución de 5x20m	*Tipo y extensión de la vegetación: Clasificación y mapeo del suelo. *Estructura de la Vegetación: Densidad y Altura. *Humedad de la Vegetación: Contenido húmedo y sequedad del combustible.

**Fuente:** NASA (2021)

Muchos sensores, tanto satelitales como aéreos, poseen utilidades valiosas en la evaluación del riesgo de incendios forestales. Estos dispositivos incluyen una variedad de fuentes de información, como datos multiespectrales, hiperespectrales, lidar y radar. Es relevante subrayar que los resultados de estos datos, así como productos específicos relacionados con incendios, están

disponibles en plataformas como EarthExplorer, GloVis, NASA Earthdata y AppEEARS para su utilización posterior.

2. **GPS y SIG:** El uso de sistemas de posicionamiento global (GPS) y sistemas de información geográfica (SIG) permite la geolocalización de los incendios forestales, lo que facilita la identificación y la evaluación de la extensión y el impacto del fuego. Primeramente, el GPS puede ser utilizado para crear mapas precisos de la ubicación de los incendios forestales en tiempo real. Estos datos se pueden utilizar para calcular la propagación del fuego y dirigir los esfuerzos de extinción en consecuencia. Por otro lado, los SIG pueden ser utilizados para recopilar y analizar información sobre las características del terreno y las condiciones meteorológicas que pueden contribuir a la propagación de los incendios forestales. Los mapas digitales basados en SIG pueden integrar información de diversas fuentes, como imágenes satelitales y datos climáticos, para ayudar a identificar áreas de riesgo y prevenir la propagación de los incendios (Seco, 2010).
3. **Torres de vigilancia:** De acuerdo a Tapia & Catillo (2014), las torres de vigilancia son estructuras elevadas que permiten la detección temprana de los incendios forestales desde una posición elevada para posteriormente reportarlo. Esta técnica es bastante útil para la detección de los incendios, aunque su cobertura es limitada y no es adecuada para la detección de incendios en áreas remotas. Es necesario contar con un enfoque integral que combine diversas tecnologías y técnicas de vigilancia, como el uso de aviones y drones, sensores remotos, y patrullas terrestres
4. **Sensores de humo:** Los sensores de humo son dispositivos electrónicos que detectan la presencia de humo y emiten una señal de alarma. Estos sensores pueden ser instalados en áreas vulnerables a los incendios forestales, como edificios y bosques urbanos; sin embargo, no son una herramienta común para la detección de incendios forestales debido a que estos incendios suelen ocurrir al aire libre, lo que significa que la detección temprana puede ser más desafiante en comparación con la detección en interiores (García & Muñoz, 2025).
5. **Estaciones meteorológicas:** Las estaciones meteorológicas representan una herramienta útil para la detección y prevención de incendios forestales, ya que miden una serie de variables como la temperatura, la humedad, la velocidad del viento y la dirección del viento, con el cual se puede identificar

si las condiciones favorables para la ocurrencia de incendios forestales. Estos datos pueden ser utilizados para predecir la propagación de los incendios y apoyar en la toma de decisiones en la gestión de los incendios forestales (Morocho & Ríos, 2021).

6. **Imágenes aéreas:** Las imágenes aéreas son un caso particular de la teledetección que se obtienen con ayuda de drones o satélites, aviones, tripulados y helicópteros, y estas puedan ser utilizadas para diferentes fines; uno de estos fines es la identificación y monitoreo de los incendios forestales, estas permitirán una visión detallada de la extensión y el comportamiento del fuego en áreas remotas y de difícil acceso, lo cual facilitará la planificación y el control de los incendios forestales en tiempo real (NASA Earthdata, 2025). Del mismo modo, es posible utilizar imágenes aéreas para mapear las áreas que han sido afectadas por un incendio forestal (Muñoz et al. 2007). Esto puede ser útil para evaluar el impacto del incendio en la flora y fauna, planificar la recuperación de las áreas afectadas y desarrollar medidas preventivas para evitar la ocurrencia de futuros incendios forestales.

#### 2.2.6. Causas de los incendios forestales

El Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR, 2018) informó que el 95 % de los incendios forestales se originan por causas antrópicas, ante el descontrol producido por la quema de residuos agrícolas, habilitación de áreas de cultivo, cambio de uso de suelos, entre otros.

De acuerdo al estudio de diagnóstico realizado por González-Cabán (2015), en el Perú se distinguen diferentes causas de los incendios forestales y que las podemos ubicar por regiones, como se describe a continuación:

- **Región amazónica**

Actualmente, en la Amazonía se tiene un alto nivel de crecimiento en el sector agrícola comercial, particularmente los cultivos extensivos de palma africana y frutales, que demandan la apertura de tierras boscosas para ampliar la actividad agrícola y el consecuente cambio de uso del suelo. Del mismo modo, la apertura de nuevas vías terrestres como ejes de conexión para el desarrollo económico, también conlleva al incremento de la agricultura migratoria; en el afán de iniciar nuevas siembras en las áreas deforestadas, se realizan quemas que, al no poder ser controladas adecuadamente terminan convirtiéndose en incendios forestales. Cabe

precisar que todo tipo de quema está prohibido de acuerdo con la Ley N° 29763, legislación forestal y de fauna silvestre vigente.

En todas las actividades donde se practica la quema con restos de residuos generados por la remoción vegetativa, ocasionalmente se sale de control y afecta áreas de bosques u otros ecosistemas.

- **Región andina**

En ecosistemas andinos, donde la composición de la vegetación facilita la propagación del fuego, los incendios forestales pueden adquirir proporciones significativas. En estas áreas, donde los pastizales son una fuente crucial de alimento para la ganadería, es común llevar a cabo quemas como parte de la rotación del uso del suelo. Sin embargo, si estas prácticas no son supervisadas adecuadamente, pueden desencadenar incendios, resultando en la pérdida extensa de formaciones vegetales. Estos incendios forestales tienen un impacto directo en la población y en los servicios ecosistémicos, y en muchos casos alcanzan niveles de desastre. Esto afecta tanto a las comunidades humanas como a la amplia gama de beneficios proporcionados por el bosque.

Especies exóticas, como eucalipto y pino, son ampliamente utilizadas en plantaciones ubicadas hasta los 3 800 m. s. n. m; estas especies acumulan hojarasca de difícil descomposición, facilitando la expansión de los incendios forestales (SERFOR, 2018). Esta condición afecta mucho durante periodos de sequía que se dan eventualmente en el sur del país. Asimismo, cabe resaltar que, en los humedales alto andinos, existe una fuerte incidencia de incendios provocados por la quema de la totora de los humedales, por ejemplo, en el lago Titicaca, trayendo como consecuencia la pérdida de la flora y hábitat de fauna silvestre.

- **Región interandina**

Esta región está dada por la transición entre la región Andina y la Amazonía, es decir por la ceja de selva. Aquí las zonas de bosque de niebla y otros tipos de asociaciones se ven amenazadas por el uso del fuego para el manejo de las “chacras”, por lo que esta actividad es una de las más importantes en estas condiciones de terreno (SERFOR 2018).

- **Región norte**

Para esta zona, los incendios forestales son ocasionados principalmente por personas llamadas “mieleros”, dedicados a recolectar miel de abejas silvestres, para lo cual efectúan quemas a la altura de la base del árbol para ahuyentar a las abejas (SERFOR 2018); esta acción causa incendios forestales en el bosque seco. En la

región Lambayeque los incendios se asocian a la quema de rastrojos y pastos para la preparación del terreno para las campañas agrícolas; así también, ocurren incendios cuando se queman residuos sólidos en los botaderos informales. En las Áreas Naturales Protegidas (ANP), entre las causas de los incendios forestales, se tiene un 50% por cambio de uso del suelo, 41% por la quema de pastos como actividad ancestral, 3% por la quema para obtener leña y 3% por negligencia (Ministerio de Desarrollo e inclusión Social [MIDIS], 2023).

### **2.2.7. Consecuencias de los incendios forestales**

Los incendios forestales traen una serie de consecuencias en el suelo, agua, flora, fauna. También contaminan la atmósfera lo cual tiene un alto impacto negativo en el cambio climático. A continuación, se muestran algunas consecuencias (SERFOR, 2018):

#### **a) Sobre suelo y agua**

Después de un incendio forestal es común que se dé la desaparición de la materia orgánica existente, generándose cambio de hábitats para muchos invertebrados, Asimismo, al ser quemada la capa orgánica, humus, tanto el nitrógeno (N) como el azufre (S) se volatilizan, mientras que los demás elementos minerales del suelo se hacen solubles por lo tanto son arrastrados con el agua de escorrentía, perdiéndose la fertilidad y provocando la erosión del suelo. Para el agua, al darse las pérdidas de cobertura forestal en las cabeceras de cuenca generan la desaparición de fuentes de agua.

#### **b) Sobre la flora y fauna**

Los incendios generan cambios en las estructuras de los bosques y la cobertura general de los ecosistemas, así como en su composición florística; esto tiene un impacto negativo en la economía de las poblaciones circundantes ya que muchos dependen de la comercialización de la madera. También se da el debilitamiento de los árboles, dejándolos susceptibles al ataque de enfermedades y plagas.

En el caso de la fauna, provoca la migración de animales a otros espacios, también produce mortandad de animales y se da la aparición de plagas y enfermedades con mayor intensidad.

#### **c) Sobre la atmósfera y la salud**

Los incendios traen un incremento de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y disminución de oxígeno (O<sub>2</sub>) en el aire y los vientos pueden arrastrarlos hacia las ciudades, contaminando la atmósfera en los espacios cercanos. El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>),

generado por los incendios forestales, es un gas de efecto invernadero y tiene un alto impacto negativo en el cambio climático.

Para la salud, el humo causado por el incendio forestal suspendido puede provocar enfermedades en las vías respiratorias, dolores de cabeza, fiebre y enrojecimiento de la vista.

**d) Socioeconómicos**

Luego de un incendio se observa claramente un deterioro del paisaje, por ejemplo: suelos pobres, abandonados y sin cobertura vegetal, reduciendo su belleza escénica y valor económico. Algo importante a recalcar es que se genera daños, lesiones y fallecimiento de combatientes, como los pobladores, bomberos, guarda parques y policías, quien en su prestación de servicio a la sociedad pierden la vida.

## CAPÍTULO III

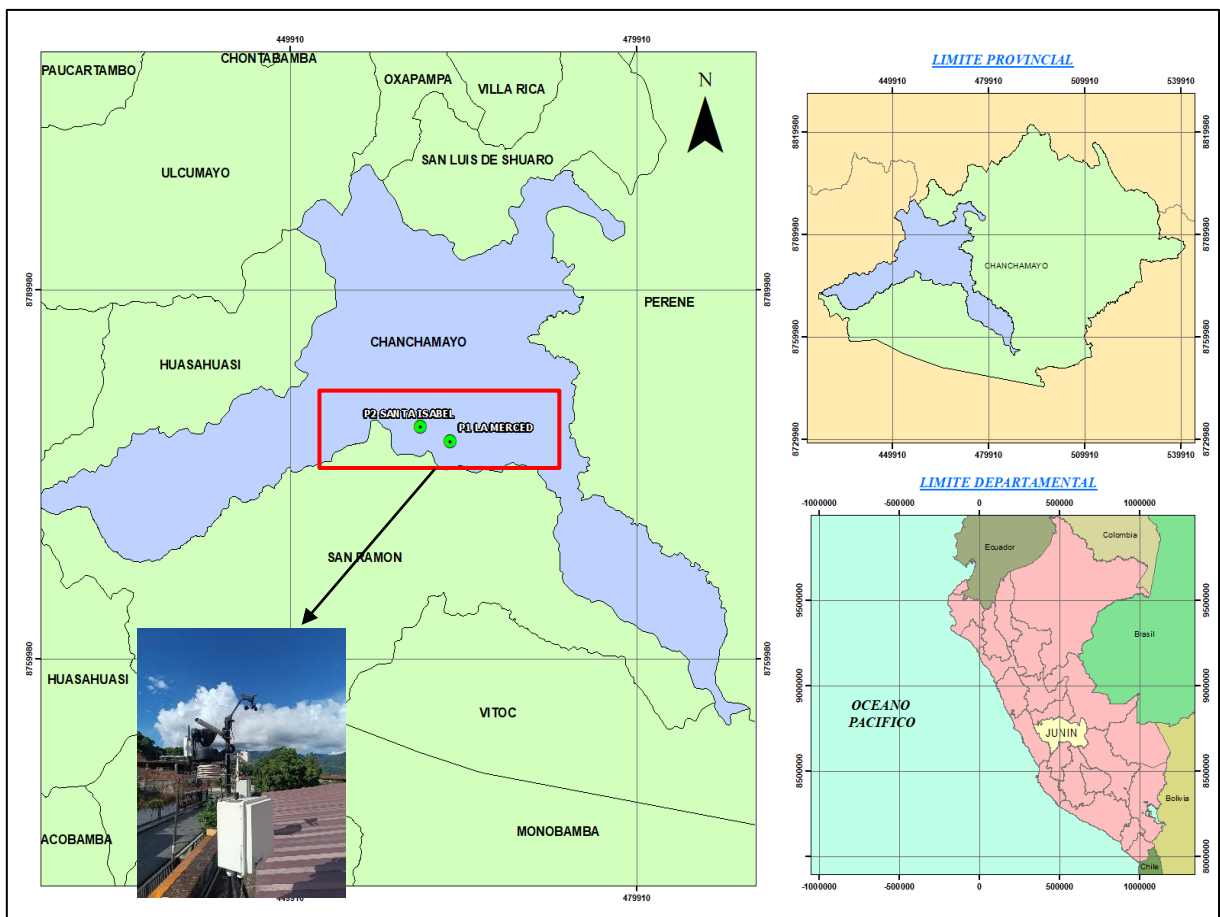
### METOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. **Ámbito de estudio**

Estuvo comprendida por el distrito de Chanchamayo, Junín; este espacio se ubica en la zona centro del Perú a 751 m. s. n. m. con un clima tropical; durante el periodo de verano la temperatura máxima media alcanza los 30°C, mientras que en invierno descienden hasta los 18°C; asimismo, las precipitaciones en el lugar llegan hasta 2, 000 m.m (Giacomotti et al., 2021).

#### **Figura 6**

*Mapa de ubicación del distrito de Chanchamayo*



#### 3.2. **Tipo, nivel y diseño de investigación**

##### 3.2.1. **Tipo de investigación**

De acuerdo a lo referido por Tamayo (2003), el trabajo de investigación que se realizó es de tipo básico, puesto que se generó nueva información sobre el comportamiento del carbono negro y la relación con los incendios forestales con el objetivo de incrementar el conocimiento de una realidad concreta.

### 3.2.2. Nivel de investigación

Según el grado de estudio con el que se aborda el objeto de estudio, el nivel de investigación corresponde al tipo descriptivo correlacional; descriptivo porque describe el comportamiento de las variables y es correlacional debido a que busca establecer una correlación entre ambos comportamientos de las variables (Hernandez-Sampieri et al., 2014)

**Tabla 4**

*Nivel de investigación*

<b>Criterio</b>	<b>Nivel de investigación</b>
El grado de relación entre el comportamiento del carbono negro, PM <sub>2.5</sub> y los focos de incendios forestales en la selva central.	Descriptivo correlacional

### 3.2.3. Diseño de investigación

El diseño de investigación es no experimental longitudinal, ya que se recolectó observaciones de carbono negro e incendios forestales, tal como se dan en la realidad; asimismo, es longitudinal porque se realizaron observaciones durante la temporada de estiaje que corresponde al rango de cuatro meses.

## 3.3. Población y muestra

### 3.3.1. Población

La población está constituida por las emisiones atmosféricas de BC, PM<sub>2.5</sub> y los incendios forestales que están presentes en el distrito de Chanchamayo, en la región Junín.

### 3.3.2. Muestra

El tipo de muestreo que se realizó corresponde al no probabilístico; se tomaron datos como unidad de análisis del equipo ObservAir que monitorea partículas de BC presentes en el aire con la estación de monitoreo en época de estiaje (julio, agosto, setiembre y octubre) del 2023.

**Tabla 5***Ubicación de equipos de muestreo*

Coordenadas	Equipo	Zona
-11.056529, -75.331998	ObservAir	La merced
-11.056548, -75.332021	PurpleAir PA-II	La Merced
-11.046147,-75.355240	PurpleAir PA-II	Santa Isabel

### 3.4. Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

#### 3.4.1. Procedimientos

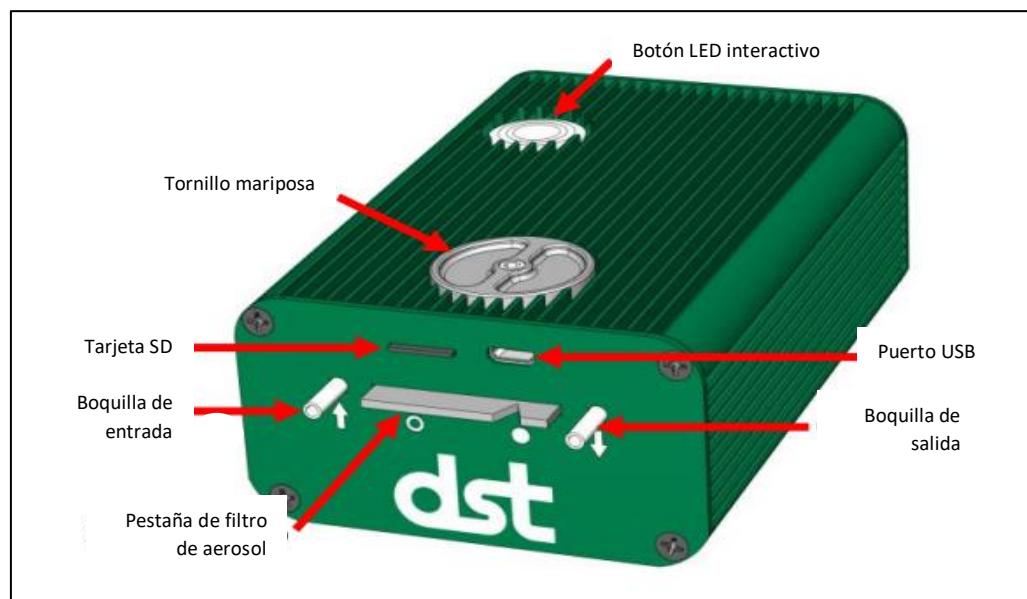
##### 3.4.1.1. Carbono Negro

###### a) Equipo ObservAir

Se empleó el sensor ObservAir, un equipo que monitorea diversos contaminantes, centrándose en el sensor de carbono negro, y, opcionalmente, registra contaminantes gaseosos como CO, NO, NO<sub>2</sub>, COV, etc.

#### Figura 7

*Partes del sensor de carbono negro ObservAir*

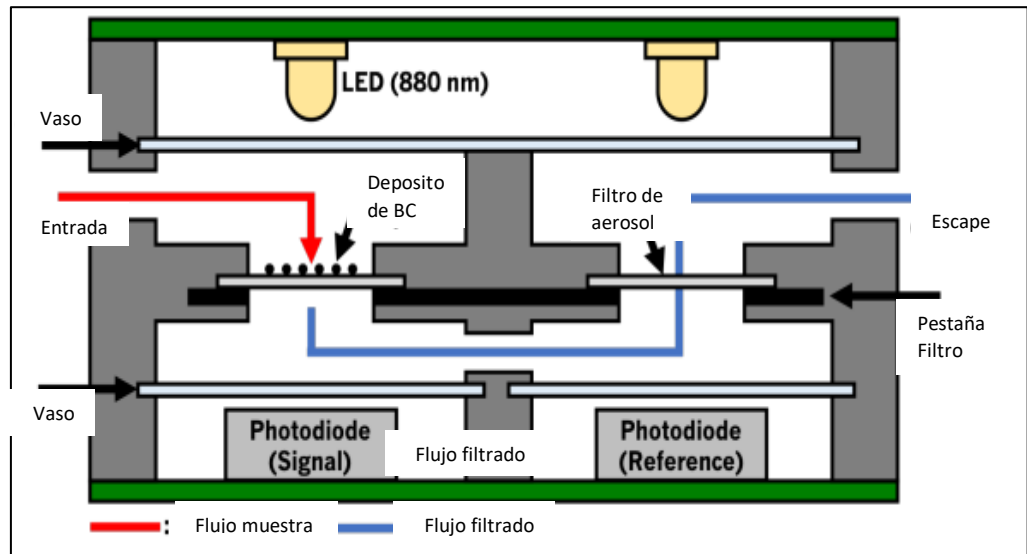


**Fuente:** DST (2023)

El principio de funcionamiento se basa en un fotómetro de absorción de aerosol configurado para medir concentraciones de BC. La microbomba del equipo inicia su funcionamiento atrayendo el aire hacia la entrada, lo cual atraviesa a través de un filtro de aerosol fibroso a medida que el material ingrese, este procede a acumularse registrándose en tiempo real en la memoria micro SD que viene implementado al equipo.

### Figura 8

Esquema de la tecnología de medición del carbono negro mediante el equipo ObservAir



Fuente: DST (2023)

#### b) Monitoreo

Para el monitoreo se empleó el sensor de BC, el cual se encuentra instalado en la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa, ubicado en el Jr. Los Cedros N° 144 en las coordenadas -11.056529, -75.331998 a 3 metros de altura aproximadamente. La frecuencia de registro de datos fueron las 24 horas diarias con un intervalo de 3 segundos, mientras que el recojo de datos fueron los días sábados cada dos semanas durante 4 meses (julio - octubre del 2023).

#### 3.4.1.2. Incendios

##### a) Plataforma Fire Information for Resource Management System (FIRMS)

Para la obtención de datos de los incendios ocurridos en Chanchamayo se hizo uso de la plataforma <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/> desarrollada por la NASA, el cual proporciona información en tiempo real sobre los focos de incendios y actividad de calor en todo el mundo. La plataforma FIRMS combina datos de diferentes sensores y satélites, como el sensor MODIS con resolución espectral: 250m, 500m y 1km y el sensor VIIRS con resolución espectral: 375m y 50m; ambos sensores miden la radiación infrarroja emitida por los incendios y las áreas calientes, permitiendo monitorear y rastrear la evolución de los incendios en tiempo real

### b) Descarga de datos

La descarga de datos se realizó de manera remota mensual a través de su página web <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>, en el cual una vez solicitado los datos se procede a la descarga para su posterior análisis y correlación

#### 3.4.1.3. PM<sub>2.5</sub>

##### a) PurpleAir PA-II

Se empleó un contador óptico de partículas que permite monitorear la concentración de contaminantes de partículas atmosféricas, como el PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> expresado en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  como unidad y medidas en exteriores o interiores.

### Figura 9

*Características del Sensor PurpleAir*

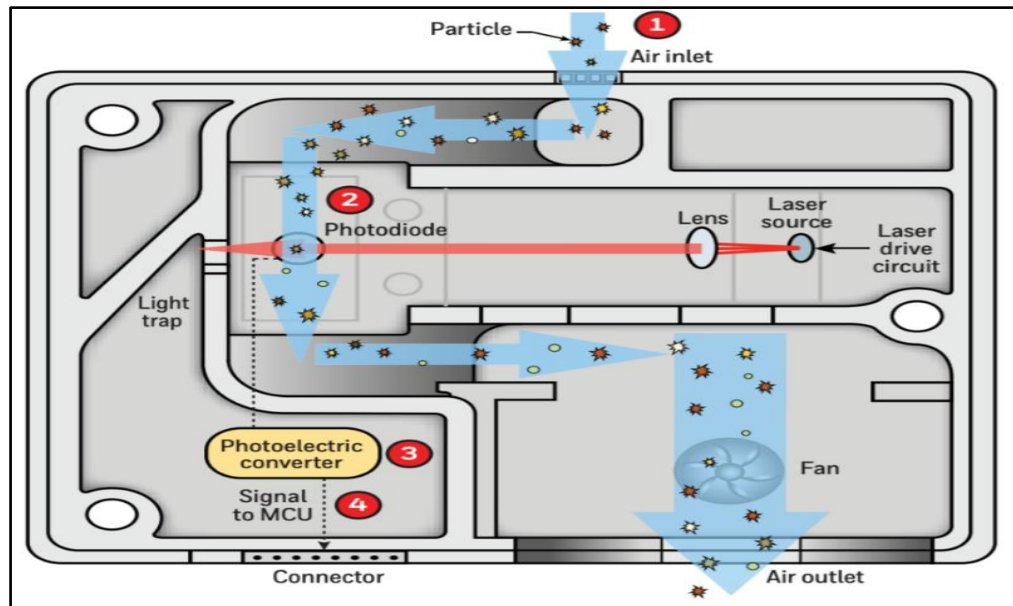


**Fuente:** AQ-SPEC (2015)

El sensor de PurpleAir PA-II utiliza el contador de partículas láser Plantower PMS5003, su principio de funcionamiento se basa en el uso de un láser para irradiar partículas en suspensión en el aire. Luego, la luz dispersada se recoge en un cierto grado y, finalmente, se obtiene la curva de cambio de la luz dispersada con el tiempo. Al final, el microprocesador puede calcular el diámetro de partícula equivalente y el número de partículas con diferente diámetro por unidad de volumen basándose en la teoría MIE.

**Figura 10**

*Esquema de la tecnología de medición del  $PM_{2.5}$  mediante el sensor PurpleAir*



**Fuente:** Especificaciones técnicas de Atmotube (ATMO, 2023)

#### b) Monitoreo

Para el monitoreo del  $PM_{2.5}$  se emplearon dos sensores de PurpleAir PA-II, el cual uno se encuentra instalado en el fundo “Santa Isabel” en las coordenadas -11.046258,-75.355240 a 3 metros de altura, mientras el otro en las inmediaciones de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Juan Santos Atahualpa con coordenadas -11.056548, -75.332021 en el distrito de Chanchamayo. La frecuencia de registro de datos es por minutos durante las 24 horas continuas, mientras la descarga de datos se realizó de manera mensual a través de su portal en línea durante los 4 meses de estudio.

#### 3.4.2. Técnicas e instrumentos

Para la evaluación de los datos se empleó la técnica de observación directa, puesto que se estudió directamente al fenómeno de estudio desde el sensor con el fin de terminar su concentración. Asimismo, se utilizó el sensor ObservAir como instrumento de medición, mientras que para el registro se emplearon instrumentos de fichas de recolección, tal como se detalla en el Anexo 4.

### 3.5. Análisis de datos

#### 3.5.1. Carbono Negro

##### 3.5.1.1. Base de datos

Los datos recopilados superaron el 1 millón, por lo que se procedió a organizarlo de manera secuencial en tablas del programa Microsoft Excel, donde los datos se ordenaron en columnas, tanto las fechas y el valor de la concentración registrada, seguido a eso, se eliminaron las concentraciones negativas y/o por encima del rango establecido ( $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), así como los valores que presentaron anomalías identificados con pruebas de intervalo de confianza del 95%. Una vez realizado el tratamiento de datos en el programa, se derivó al software R, donde se llamaron a distintas funciones para mostrar la variabilidad mediante gráficos; asimismo, aplicando el percentil 90 se determinaron los días pico de BC.

##### 3.5.1.2. Relación del carbono negro y los incendios forestales

Se aplicó la prueba no paramétrica, en la que se rechaza la hipótesis nula; donde, con el apoyo del software R mediante la prueba de Rho de Spearman, se calculó el coeficiente de correlación “r”, y determinó si la variable de concentración de carbono negro mantiene relación con los incendios forestales, asimismo, se obtuvo los gráficos para su respectivo análisis.

##### Ecuación N°1: Spearman

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum D^2}{n(n^2 - 1)}$$

- $r_s$ : Correlación de rango de Spearman.
- D: La diferencia de los rangos correspondientes.
- n: Número de observaciones

##### 3.5.1.3. Comportamiento del carbono negro

Se realizó un análisis de variación horaria, diaria y mensual de la concentración de carbono negro en la merced, donde se evaluó su comportamiento y picos en las horas y los meses.

##### 3.5.1.4. Estimación de aporte de fuentes locales y externas

Para la identificación de las fuentes de BC se analizó la influencia de masas de aire de áreas distantes sobre la variabilidad del carbono negro, según el periodo de estiaje del 2023; para ello, se empleó el Modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory - HYSPLIT). Se utilizaron datos

meteorológicos archivados de REANALYSIS (Global 1948-present) del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP) y Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) a una resolución 2.5°.

- **Primer paso:** Se ordenaron los datos de los días picos de BC en hojas Excel con la columna fecha y sus valores numéricos de concentración.
- **Segundo paso:** Una vez organizado los datos en hojas de Excel, se procedió a realizar las retrotrayectorias con el modelo HYSPLIT en <https://www.ready.noaa.gov/hypub-bin/trajasrc.pl>.
- **Tercer paso:** Las corridas realizadas se descargaron en formato KMZ y fueron derivadas al programa ArcGis para su visualización de recorrido a escala departamental y su posterior análisis; donde, las que se transportaron a escala local, se asociaron a fuentes locales, más de lo contrario, los que recorrieron por la zona norte o sur, o a las afueras del país, se asociaron a fuentes externas.

Asimismo, una vez analizado las retrotrayectorias en el ArcGIS, también se analizaron las corridas para todo el periodo agrupándolos en clúster, para así determinar qué zona o sector es el que mayor porcentaje (%) atribuye en cuanto al BC.

### 3.5.2. Incendios forestales

#### 3.5.2.1. Análisis de datos de focos de incendios

- **Primer paso:** Se accedió a la plataforma FIRMS para la descarga de datos de los focos de incendios en formato shapefile a nivel de Sudamérica.
- **Segundo paso:** Se importaron los shapefile descargados al área de trabajo del programa ArcGis, una vez descargado, se sectorizo (E, O, N, S, NE, NW, SE, SO), delimitó y seleccionó los focos de incendios a escala regional y distrital (Chanchamayo).
- **Tercer paso:** Los atributos de los focos de calor obtenidos se exportaron en formato CSV, el cual se importó a una tabla Excel para organizarlas y, llevarlas al software R, donde mediante distintas funciones se realizaron gráficos de variabilidad en las 4 escalas ya mencionadas.
- **Cuarto paso:** Finalmente, en el mismo Excel lo relacionaremos con la variable de carbono negro para evaluar su comportamiento y su correlación.

### 3.5.3. $PM_{2.5}$

#### 3.5.3.1. Fluctuación del $PM_{2.5}$ en el periodo de estiaje

Para el análisis de la fluctuación, se realizó la descarga de datos de la plataforma <https://www2.purpleair.com/> para el periodo de estiaje 2023. Esta plataforma permitió obtener los datos en tiempo real del material particulado fino a través de los sensores instalados en Chanchamayo, región Junín. Una vez descargados los datos se procedió a trabajarlos en el programa Microsoft Excel, ordenando en columnas y eliminando los valores que superen el rango establecido, que de acuerdo al D.S. N° 003-2017-MINAM, (2017) el cual establece el Estándar de Calidad Ambiental para Aire (ECA), es  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio de 24 horas.

Por último, se realizaron los gráficos de análisis de variación horaria, semanal y mensual, y así evaluó el comportamiento teniendo en cuenta los picos más altos y los más bajos registrados durante todo el periodo.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

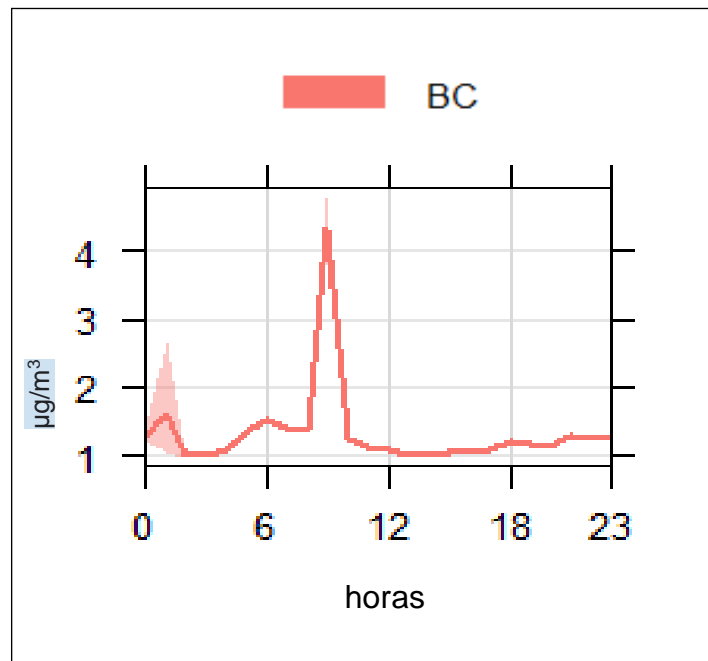
#### 4.1. Presentación de resultados y discusiones

##### 4.1.1. Variabilidad del carbono negro en Chanchamayo

Los resultados reportados para el análisis de variabilidad horaria respecto a las concentraciones del BC, muestran un pico moderado a las 24:00 a 1:00, y un pico máximo a las 8:00 hasta las 10:00; el primer pico registrado en horas de la madrugada no corresponden al comportamiento propio de la ciudad, sino más bien, está relacionado a las fuentes externas que, por medio de las masas de aire transportan las partículas de BC; el segundo pico registrado en horas de la mañana está relacionado con la influencia del parque automotor, puesto que durante esas horas las personas tienden a transportarse a sus centros de trabajo o a sus centros de estudios; asimismo, esto puede estar ligado a un fenómeno denominado inversión térmica, puesto que durante horas de la mañana se observa altas concentraciones de BC debido a que el aire se encuentra frío, provocando que las partículas no se dispersen y se acumulen en mayor concentración, no obstante, a medida que transcurren las horas del día el aire va calentándose las partículas de aire tienden a liberarse provocando su dispersión, lo cual resulta favorable, ya que permitió a que no se registraron picos de concentraciones elevados de BC durante horas de la tarde (Figura 11).

#### Figura 11

*Comportamiento horario del BC en Chanchamayo durante periodo de estiaje, 2023.*

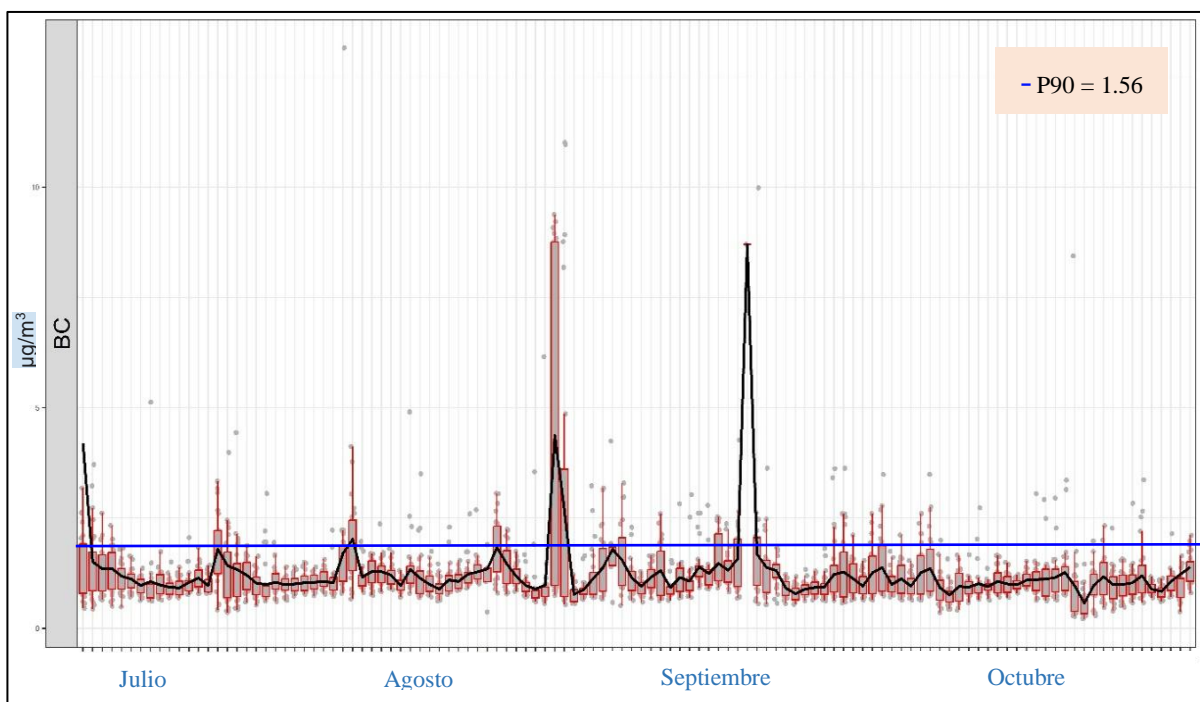


Este comportamiento igualmente fue observado en un estudio realizado en Brasil (Krecl et al., 2016) donde señalaron que la variación horaria de la concentración de BC presenta dos picos máximos en días laborables (lunes a viernes), el primer pico se presenta por la mañana de 07:00 a 08:00 y el segundo pico por la tarde de 18:00 a 19:00, los cuales se asocian con fuentes como el parque automotor y actividades industriales.

Por otro lado, el comportamiento diario de las concentraciones evaluadas durante el periodo seco, corresponde a  $0.57 \pm 8.70$  (promedio, desviación estándar) (Figura 12), cuyos resultados variaron entre 0.21 a  $13.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (rango). Asimismo, aplicando el percentil 90 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), se determinaron 12 días picos, estos fueron  $4.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (2 de julio),  $1.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (22 de julio),  $1.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (4 de agosto),  $2.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (5 de agosto),  $1.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (20 de agosto),  $4.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (26 de agosto),  $2.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (27 de agosto),  $1.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (1 de septiembre),  $1.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (2 de septiembre),  $1.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (14 de septiembre),  $8.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (15 de septiembre) y  $1.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (16 de septiembre), donde los días que presentaron mayor concentración corresponden a agosto y septiembre, lo cual coincide con lo reportado por Suarez-Salas et al., (2017).

### Figura 12

*Comportamiento diario y mensual del BC en Chanchamayo en periodo de estiaje*



## 4.1.2. Variabilidad del $\text{PM}_{2.5}$

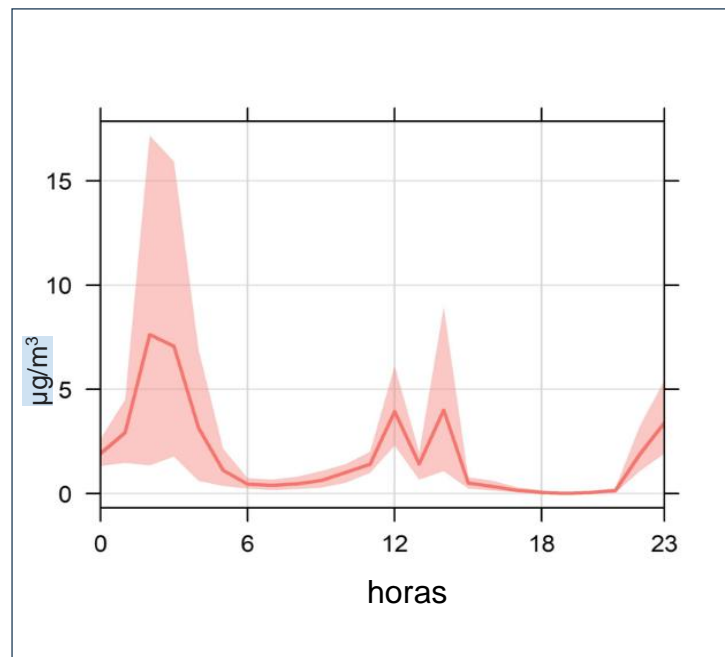
### 4.1.2.1 Variabilidad del $\text{PM}_{2.5}$ en Chanchamayo

La variación horaria respecto a la concentración del  $\text{PM}_{2.5}$  monitoreado en el centro urbano de Chanchamayo (Figura 13), mostro tres picos durante el periodo seco

el primer ascenso inicia a las 24:00 horas alcanzando su pico a las 3:00, esto se debe a la inversión térmica nocturna, el cual provoca que los contaminantes no se dispersen, causando su pico (Conde-Oria & Rasilla, 2024). El segundo pico se registra a las 12:00 y a las 14:00, lo cual se atribuye a las fuentes de actividades propias de la zona, puesto que durante esta hora la afluencia vehicular es notable debido a que las personas salen de su centro de trabajo, asimismo, durante estas horas hay mayor actividad industrial por parte de los comercios. Por último, también se observa un descenso mínimo a las 21:00, y seguidamente un nuevo incremento de concentración de  $PM_{2.5}$ ; este registro se debe al inicio del fenómeno de la inversión térmica nocturna, tendiendo a manifestarse aún más en horas de la madrugada.

### Figura 13

*Comportamiento horario del  $PM_{2.5}$  en Chanchamayo en periodo de estiaje, 2023*



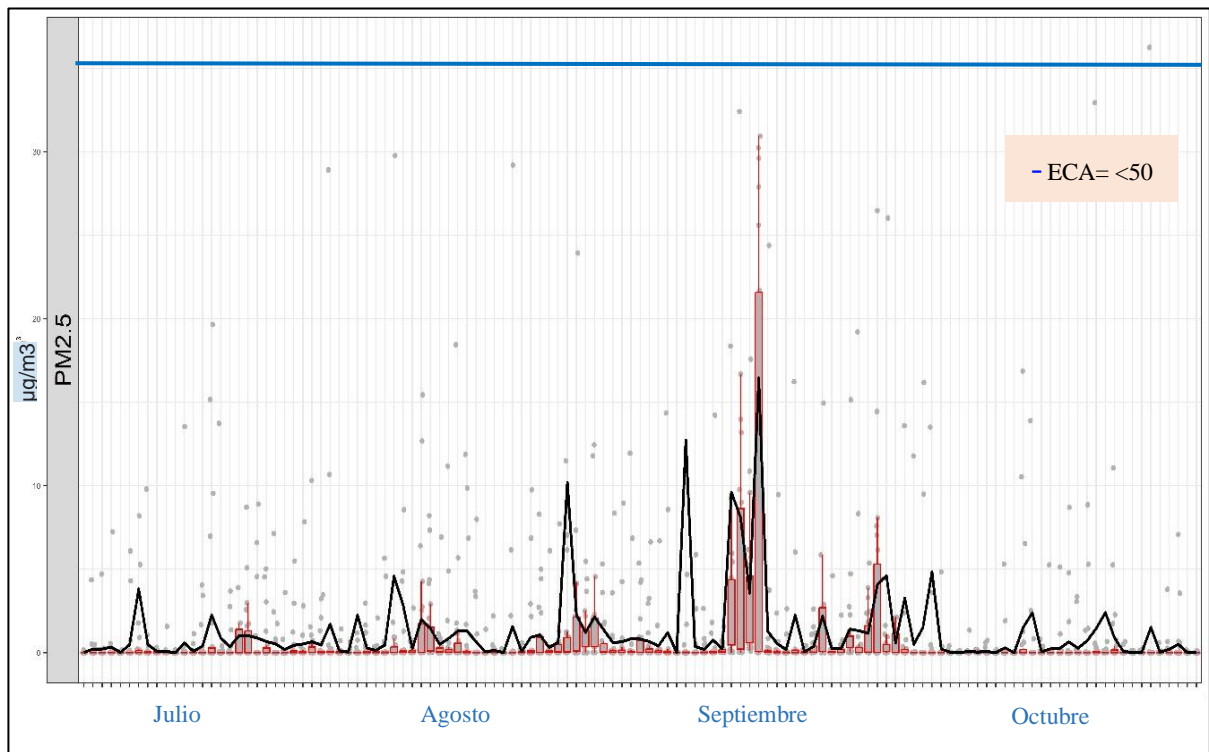
Estudios como el de Castro (2025) coinciden con estos resultados, donde mediante 18 estaciones distribuidas en la ciudad de Bogotá en zonas urbanas, evaluó el comportamiento horario del  $PM_{2.5}$  encontrando concentraciones altas a las 3:00-7:00 y el segundo de 11:00-16:00 para 12 estaciones (Carvajal, Centro de alto rendimiento, Fontibón, Guaymaral, Kennedy, Ministerio de Medio Ambiente, Móvil, Puente Aranda, San Cristóbal, Suba, Tunal y Usaquén), mientras que para las otras 5 estaciones restantes (Las ferias, Usme, Bolivia, Bosa y Jazmín) se encontraron picos a partir de las 5:00-9:00 y el segundo a partir de las 11:00-16:00 teniendo una gran influencia en la estabilidad atmosférica de los sectores. Por lo tanto, la coincidencia de estos resultados

con otros estudios realizados en diferentes ciudades del mundo refuerza la idea de que el patrón de variación horaria de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  es un fenómeno común en áreas urbanas. Sin embargo, es importante destacar que la magnitud y la duración de estos picos pueden variar en función de las características específicas de cada ciudad, como su tamaño, topografía, clima y fuentes de emisión, por lo que es importante tener en cuenta estos factores al momento de establecer medidas para mejorar la calidad de aire (Huaroto & Mendoza, 2025).

Por otro lado, de acuerdo con la variabilidad diaria de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  medidos en periodo seco en el centro urbano de Chanchamayo (Figura 14), muestran un promedio  $1.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con valores que varían entre  $0.0024 - 16.453 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con comportamiento variable y con diferencias de dos tendencias.

**Figura 14**

*Comportamiento diario del  $PM_{2.5}$  en Chanchamayo en periodo de estiaje, 2023*



Tal como se evidencia, los primeros días de julio la concentración es relativamente baja con respecto al ECA peruano; sin embargo, en los días posteriores se visualiza una tendencia de incremento de concentraciones con  $0.003 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , para los días 7 de junio ( $3.82 \pm \text{sd} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 4 de agosto ( $4.59 \pm \text{sd} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 23 de agosto ( $10.19 \pm \text{sd} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y 5 de septiembre ( $12.72 \pm \text{sd} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Pese al aumento que se iba registrando, a partir del 10 de septiembre la concentración de partículas tienden a disminuir iniciando con  $9.61 \pm \text{sd} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 11 de septiembre ( $8.09 \pm \text{sd} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y 12 de septiembre ( $3.56 \pm \text{sd} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ); seguido a esto, la concentración aumenta nuevamente de manera moderada el

día 13 de septiembre llegando alcanzar el pico más alto en todo el periodo evaluado con  $16.45 \pm \text{sd } \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En los días posteriores las concentraciones tendieron a bajar alcanzando  $4.08 \pm \text{sd } \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $4.61 \pm \text{sd } \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $3.26 \pm \text{sd } \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el 26, 27 y 29 en lo que respecta a septiembre y  $4.82 \pm \text{sd } \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el 2 de octubre respectivamente.

No obstante, recalcar que estas concentraciones registradas en esta ciudad periurbana no superaron los niveles establecidos en DS 003-2017-MINAM, donde se establece el ECA ( $<50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (SINIA, 2017).

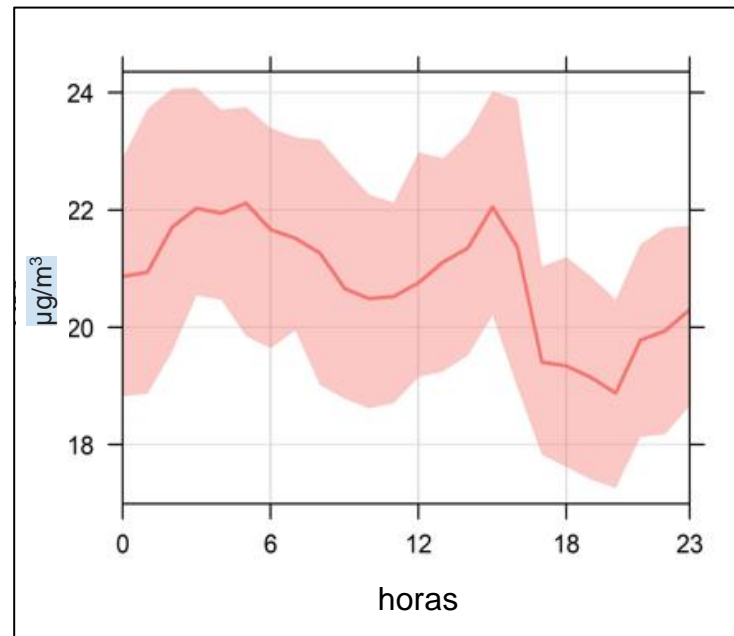
#### **4.1.2.2 PM<sub>2.5</sub> en Santa Isabel**

El comportamiento del PM<sub>2.5</sub> a las afueras de la zona urbana del distrito de Chanchamayo, específicamente en el fundo Santa Isabel, mostro mayor variabilidad con respecto a sus concentraciones horarias registradas. El primer ascenso se manifiesta a partir de la 1:00 hasta las 5:00, esto se debe a un fenómeno denominado inversión térmica nocturna, lo cual explica que durante horas de la noche las temperaturas suelen bajar, provocando que haya menor circulación de aires y en consecuencia menor dispersión de partículas atmosféricas de PM<sub>2.5</sub> durante las horas de la madrugada (Figura 15); esto genera un aumento de las concentraciones, sobre todo en áreas rurales como representa Santa Isabel, donde la vegetación y la humedad contribuyen a la estabilidad atmosférica (Pérez & Rodas, 2017). El segundo incremento de concentración se registra a partir de las 11:00 alcanzando su pico máximo a las 15:00, esto se encuentra ligado al calentamiento de aire que se da durante el día, el cual causa movimientos de convección que levantan partículas desde la superficie y la mantienen en suspensión en la atmosfera incrementando las concentraciones de PM<sub>2.5</sub>; cabe destacar que las brisas locales también son responsables de este aumento.

Posteriormente después de alcanzar su pico máximo a las 15:00, se observa un descenso logrando alcanzar su valor mínimo a horas de las 19:00, esto se da por inversión térmica, puesto que la presencia de radiación solar provoca la dispersión de partículas, y como resultado menor concentración.

**Figura 15**

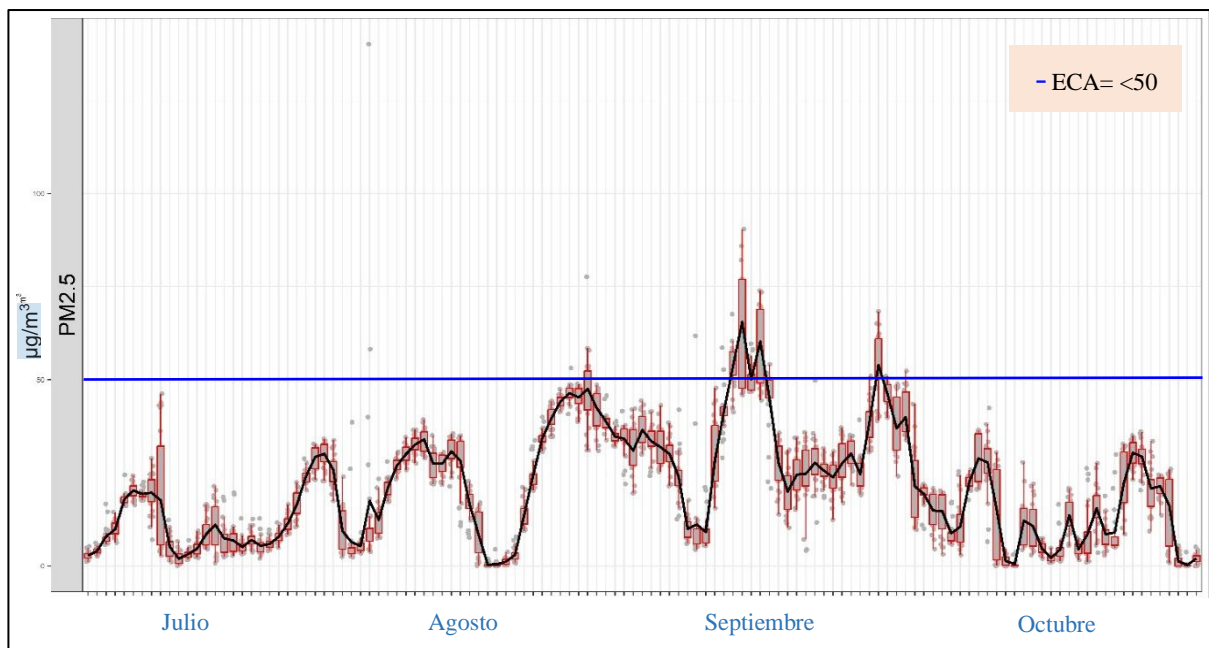
*Comportamiento horario del PM<sub>2.5</sub> en Santa Isabel en periodo de estiaje, 2023*



Por otra parte, con respecto a la variabilidad diaria del PM<sub>2.5</sub> para Santa Isabel, se encontró un  $20.94 \pm 14.73$  con una variación entre 0.22 a  $65.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , tal como se manifiesta en la Figura 16.

**Figura 16**

*Comportamiento diario y mensual del PM<sub>2.5</sub> en Santa Isabel en periodo de estiaje, 2023*



Las concentraciones monitoreadas desde los primeros días en este punto iniciaron con concentraciones promedio, no obstante, según trascurrían los días de

registros, estas empezaron a incrementarse llegando a sobrepasar el ECA ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ); dando inicio a partir del día 26 de julio ( $29.25 \pm \text{sd} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 27 de julio con ( $30.08 \pm \text{sd} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y 28 de julio ( $25.73 \pm \text{sd} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) respectivamente. Para el mes de agosto, se presentó mayor número de días con concentraciones altas iniciando desde el día 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 y 31 con registros de 26.97, 30.02, 32.56, 33.95, 27.41, 27.42, 30.75, 28.17, 34.33, 39.58, 44.13, 46.36, 45.22, 47.54, 42.37, 38.86, 34.72, 34.18, 30.90 y 36.50 medidos en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Para el mes de septiembre las concentraciones seguían yendo en aumento desde el 1, 2, 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 19, 22, 23, 25, 26, 27, 28 y 29 con concentraciones de 33.44, 31.89, 30.06, 28.29, 41.70, 53.71, 65.51, 50.11, 60.21, 44.89, 27.65, 27.67, 25.55, 27.54, 30.11, 38.62, 53.94, 46.08, 36.91 y 39.96  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. Por último, el mes de octubre tampoco paso desapercibido, puesto que mostro 4 días con registros altos, siendo estos el 7 ( $28.84 \pm \text{sd} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 8 ( $27.80 \pm \text{sd} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 24 ( $30.38 \pm \text{sd} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y 25 ( $29.29 \pm \text{sd} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). No obstante, recalcar que los días que presentaron mayor concentración corresponden a los meses de agosto (20) y septiembre (20), lo cual se compara con los resultados obtenidos por Parra & Orosco (2005), en su estudio donde se monitoreo  $\text{PM}_{2.5}$  durante 8 meses (abril-diciembre), en la que las concentraciones del mes de agosto superaron los 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que para septiembre la concentración más alta fue de 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Los días de alta concentración registrados en Santa Isabel fueron comparados con el ECA nacional (Tabla 6), donde establece que el estándar de calidad ambiental para aire es  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para un valor promedio diario (24 horas); por ende, al comparar estos datos se encontró que el mes de septiembre registro 5 días picos de  $\text{PM}_{2.5}$ . La siguiente tabla muestra a detalle los días y sus respectivos valores de concentración registrados; la última columna refleja el valor porcentual que supera el valor registrado con respecto a del valor del ECA.

**Tabla 6**

*Días pico que superaron el Estándar de Calidad Ambiental del aire y sus valores porcentuales respectivamente*

<b>PM<sub>2.5</sub> SANTA ISABEL</b>		
<b>Fecha</b>	<b>ECA &lt;50µg/m<sup>3</sup></b>	<b>50 µg/m<sup>3</sup>&lt;%</b>
<b>10/09/2023</b>	53.71125	1.15
<b>11/09/2023</b>	65.51091935	1.62
<b>12/09/2023</b>	50.11973958	1.04
<b>13/09/2023</b>	60.2150625	1.42
<b>26/09/2023</b>	53.94178125	1.16

No obstante, las concentraciones altas registrados estos días de septiembre se debe a que Chanchamayo es un distrito con gran afluencia turística y durante esta semana se realizan distintas actividades festivas por su aniversario de creación política, lo cual causa que haya mayor incremento del parque vehicular y el flujo de personas, haciendo que la demanda de servicios se incrementa, lo que conlleva a un mayor consumo energético y emisiones de contaminantes a la atmósfera (Cerde, 2024). Asimismo, distintos investigadores familiarizados con este estudio coinciden con lo mismo, entre ellos Nadal & Miera (2010), ya que señalan que las actividades turísticas que se dan en distintas partes del país, generan ingresos económicos de país, pero a su vez provocan el congestionamiento de vehículos provocando el aumento de niveles de concentración de PM; por ende, esta actividad se sitúa como un determinante más de los niveles de contaminación registrados en los últimos años. Además, de acuerdo a un reporte dado el 2023, se diagnosticó 12 regiones con mala calidad del aire, dentro de ellas la ciudad de Arequipa era las más alarmante puesto que registro 145 µg/m<sup>3</sup>, triplicando el Estándar de Calidad Ambiental ECA establecido por la OMS para PM<sub>2.5</sub> (45 µg/m<sup>3</sup>) y quintuplicando al ECA establecido en la normativa peruana (50 µg/m<sup>3</sup>), seguido de Ica (117,6 µg/m<sup>3</sup>) y Trujillo (145 µg/m<sup>3</sup>); en esta lista de ciudades contaminadas por PM no se registró la región de Junín, pero si se destacó su presencia entre las regiones más contaminadas por SO<sub>2</sub>, el cual viene influenciado por las actividades industriales a altas temperaturas (Alencastre, 2023).

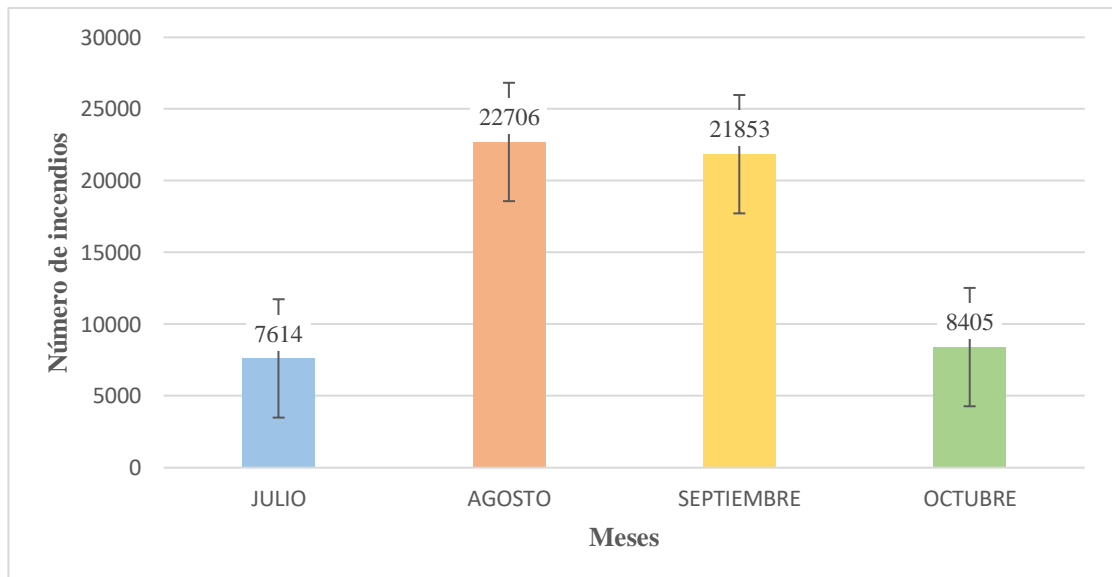
### 4.1.3. Variabilidad de los incendios forestales

#### 4.1.3.3. Variabilidad de los incendios forestales

El gráfico de barras presentado en la Figura 17 muestra la distribución temporal del número de incendios forestales registrados durante los meses de julio, agosto, septiembre y octubre a escala de la región Junín. Cada barra representa un mes específico, y la altura de cada barra indica el conteo total de incendios forestales ocurridos en ese período, es así que, a través del análisis, se evidencia una clara tendencia en estos eventos, con un mínimo en julio con 7614 IF (12.56%), seguido a esto se muestra la barra de agosto, donde los IF alcanzaron su pico máximo con 22706 IF (37.48%), posteriormente le sigue octubre que oscilo casi en el mismo rango que el mes anterior con 21853 IF (36.07%), mientras que para el mes de octubre si se mostró un notable descenso, ya que su registro total fue de 8405 IF (13.87%). Pese a esto, al comparar estos resultados obtenidos con lo reportado por el Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN), mencionan que para el 2024 a región más afectada es Cusco, con 31 incendios registrados, seguida de Huancavelica con 21, y Huánuco con 17; destacando que la región Junín estuvo entre las regiones parcialmente menos afectadas (Universidad Cesar Vallejo [UCV], 2024).

**Figura 17**

*Comportamiento mensual de los incendios forestales en Junín*

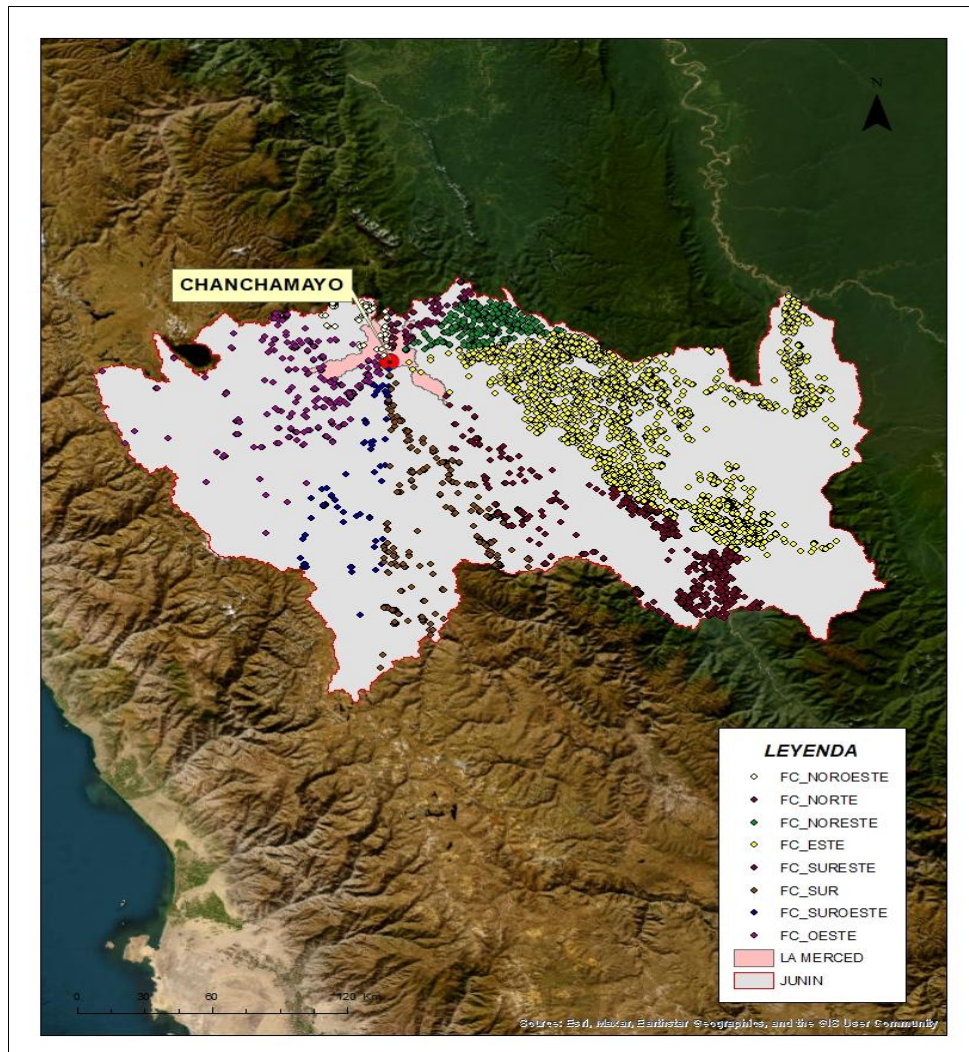


La Figura 18 muestra una marcada tendencia en la distribución espacial de los IF en la región de Junín. En primera instancia se evidencia que la zona norte fue la de mayor incidencia, concentrando el 39.74% del total de IF y destacando por la alta densidad de focos en la provincia de Chanchamayo; le sigue la zona noroeste, con el 23.8% de los IF, principalmente distribuidos en la provincia de Chanchamayo.

La zona este también presentó una proporción significativa de IF (18.96%), dispersos en las provincias de Satipo y Chanchamayo, siendo esta última la de mayor incidencia en esta zona. Por último, la zona sureste registra el 10.79% de los IF, distribuidos en las provincias de Chanchamayo, Satipo y Huancayo; no obstante, los demás sectores también registraron actividades de IF, pero menores al 5% del total registrado.

### Figura 18

*Distribución espacial de los incendios forestales en Chanchamayo*

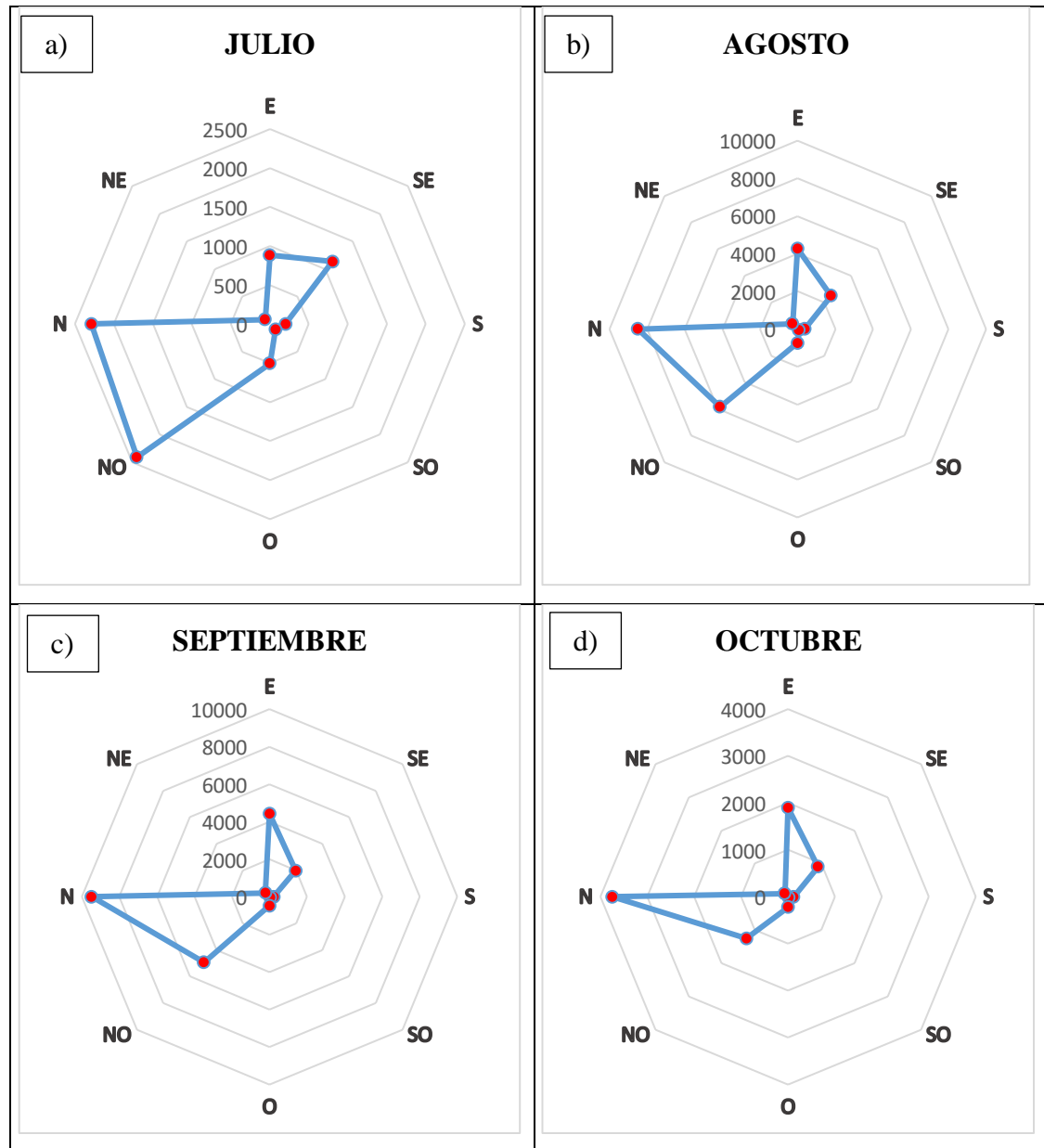


Estudios como el de CENEPRED (2021) difieren con estos resultados, ya que identifican a las provincias de Tarma, Huancayo, Jauja y Junín como las de mayor riesgo por incendios. Esta discrepancia podría atribuirse a diversos factores, como diferencias en la metodología empleada o la temporalidad de los datos; sin embargo, es fundamental considerar que la distribución espacial de los incendios forestales es influenciada por una combinación de factores biofísicos y socioeconómicos, incluyendo el clima, la vegetación, la topografía, las prácticas agrícolas y la densidad poblacional (Mora, 2020).

Por otro lado, la Figura 19 describe el análisis de variabilidad sectorizada para los IF durante desde un plano regional, es decir, toda el área que involucra la región Junín. La Figura 19a muestra variaciones consideradas en la zona noroeste y norte en el mes de julio, con picos altos para los días 23 (223IF) y 26 (192IF) de julio respectivamente. El mes de agosto presento comportamientos relativamente moderados por las zonas norte (718 IF) y noroeste (496IF) para los días 30 de agosto, 24 de agosto y 20 de agosto respectivamente, tal como se muestra en la figura 19b. Del mismo modo, el mes de septiembre presento picos altos por la zona norte (852IF) y noroeste (453IF), para el día 25 de septiembre y el 9 de septiembre, este último coincidiendo en el día con registros picos para estas últimas ambas zonas; esto se corrobora en la figura 19c. Por último, la figura 19d muestra el comportamiento sectorizado para el mes de octubre, este mes, a diferencia de los demás, muestra menor registro de IF; no obstante, las zonas que más destacaron con actividad de IF, fueron las zonas de este (243IF) y norte (578IF), para los días 6 y 7 del mismo mes.

**Figura 19**

*Comportamiento sectorizado de los incendios forestales en Chanchamayo durante periodo de estiaje*



*Nota:* a) Comportamiento sectorizado de IF-julio, b) Comportamiento sectorizado de IF-agosto, c) Comportamiento sectorizado de IF-septiembre y d) Comportamiento sectorizado de IF-octubre.

Los resultados concuerdan con los hallazgos del Zubieta et al., (2019), quienes reportaron una marcada tendencia en la ocurrencia de incendios forestales en la Amazonía peruana, con picos durante el periodo de estiaje. Sin embargo, a diferencia de esta investigación, el SENAMHI, encontró que la influencia de El Niño en la frecuencia de incendios son más pronunciadas en las zonas de baja altitud, por ello se sugiere tomar mayor atención a la influencia de factores locales, como el tipo de

vegetación, el uso del suelo y la densidad poblacional, así como también a los patrones meteorológicos, tales como: temperaturas elevadas, baja humedad relativa, días consecutivos sin lluvias, cantidad de precipitación, dirección y velocidad de viento (SENAMHI, 2018).

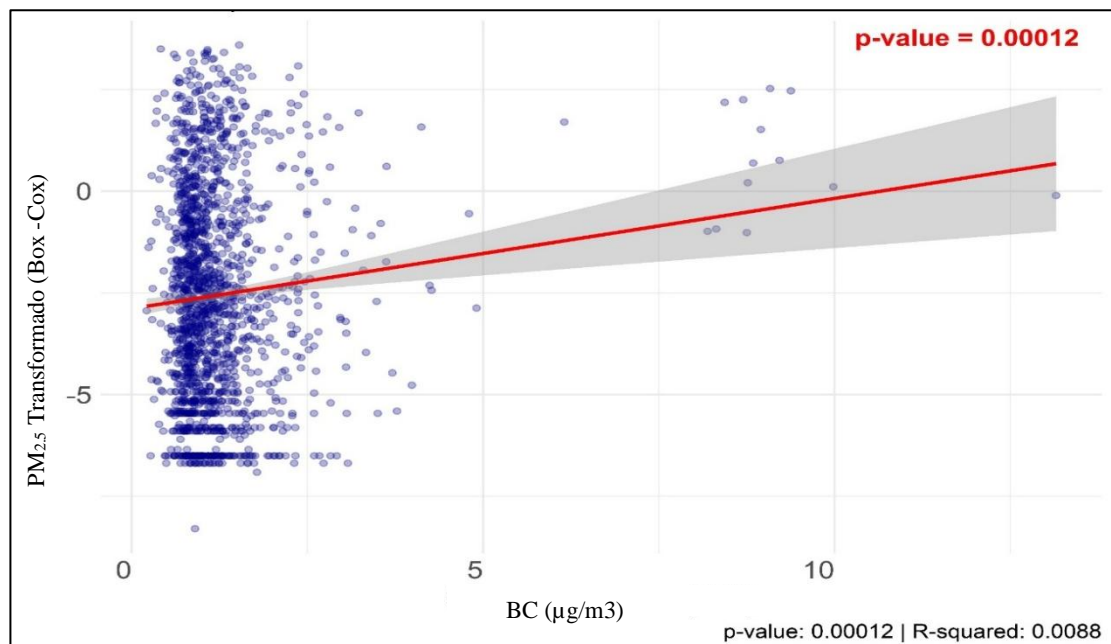
#### 4.1.4. Relación de carbono negro, $PM_{2.5}$ e incendios forestales

##### 4.1.4.1. Relación de BC y $PM_{2.5}$

En la Figura 20 se presenta la relación lineal entre el BC y el  $PM_{2.5}$  mediante la aplicación de una transformación Box-Cox sobre la variable dependiente, con la finalidad de corregir la asimetría y la heterocedasticidad presentes en los datos originales obtenidos en la estación de monitoreo de Chanchamayo. Para ello, se empleó un valor óptimo de  $\lambda = -0.1$ , permitiendo mejorar el ajuste estadístico del modelo de regresión lineal; el modelo ajustado, definido como  $PM_{2.5}$  transformado  $\sim$  BC, consideró 1668 grados de libertad y evidenció una pendiente positiva de 0.27078, indicando una relación directa entre ambas variables; asimismo, el valor de  $p = 0.00012$  ( $p < 0.001$ ) confirmó que dicha relación es estadísticamente significativa. Por otro lado, el coeficiente de determinación obtenido ( $R^2 = 0.008774$ ) indica que el modelo explica únicamente el 0.88 % de la variabilidad total del  $PM_{2.5}$  transformado, evidenciando una baja capacidad explicativa del BC debido a la naturaleza multifactorial de este contaminante atmosférico. No obstante, los resultados confirman que el BC constituye un componente relevante dentro de la fracción fina del material particulado asociado a procesos de combustión incompleta.

#### Figura 20

Correlación con transformación Box-Cox de BC y  $PM_{2.5}$  en Chanchamayo



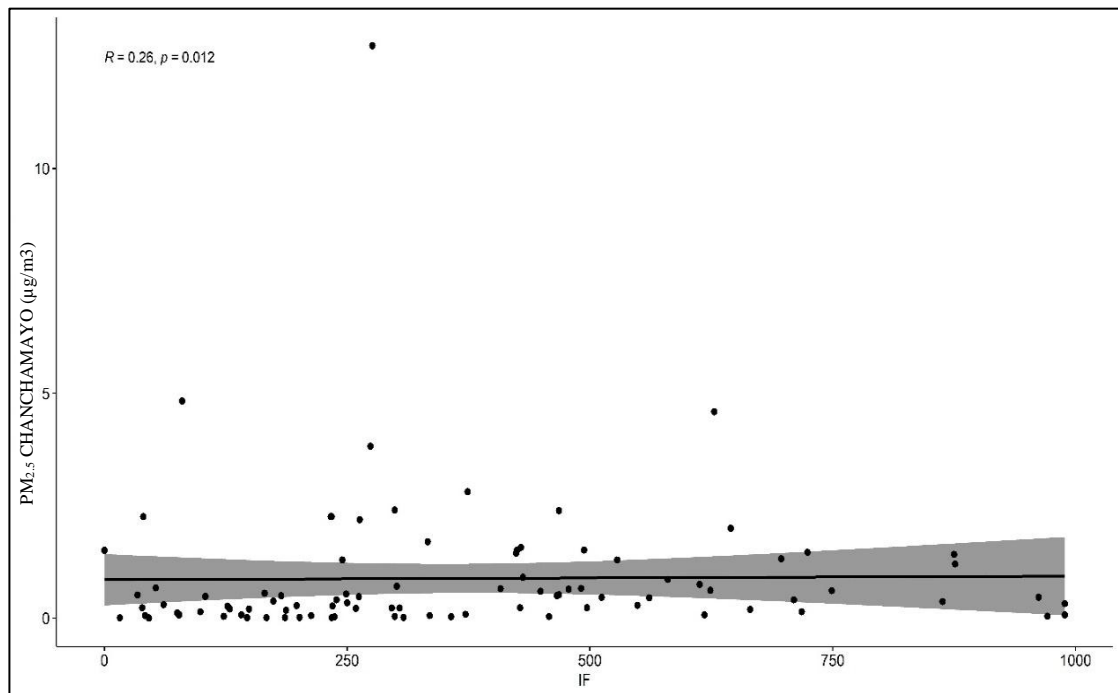
Estos resultados guardan relación con lo reportado por Choomanee et al., (2024), en un estudio que realizaron en una ciudad urbana en Bangkok, donde reportaron que las concentraciones de BC aumentaron significativamente durante periodos de bruna, llegando a representar más del 25 % de la masa total del PM<sub>2.5</sub> lo que demuestra la estrecha relación entre ambos contaminantes y su origen asociado a procesos de combustión incompleta. En ese sentido, los resultados obtenidos en Chanchamayo evidenciaron una relación estadísticamente significativa entre el BC y el PM<sub>2.5</sub> transformado ( $p < 0.001$ ), confirmando que el BC influye sobre la dinámica del material particulado fino. Sin embargo, el bajo coeficiente de determinación obtenido ( $R^2 = 0.008774$ ) indica que el PM<sub>2.5</sub> presenta una naturaleza multifactorial, influenciada además por otras fuentes de emisión y condiciones atmosféricas locales. Esto sugiere que, aunque el BC constituye un componente relevante del PM<sub>2.5</sub>, no representa la única fuente responsable de la variabilidad de este contaminante en el área de estudio

#### **4.1.4.2. Relación de PM<sub>2.5</sub> e incendios forestales**

La Figura 21 muestra una relación débilmente positiva entre las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en Chanchamayo y los incendios registrados durante el periodo seco. Estos resultados arrojaron un  $r = 0.13$ ,  $p = 0.012$ ; lo que indica una ausencia de relación entre ambas variables. La alta dispersión de los datos y la presencia de algunos outliers sugieren que otros factores intervinieron en la variabilidad de concentraciones de PM<sub>2.5</sub>, como las condiciones meteorológicas, actividades comerciales y las emisiones vehiculares y/o vehículos motorizados, estarían influyendo en las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> de manera más significativa que los incendios forestales, tal como lo manifiesta Zamora & Azanza (2020) en su estudio realizado en una provincia de Cuba.

**Figura 21**

*Correlación de PM<sub>2.5</sub> e incendios forestales en Chanchamayo*

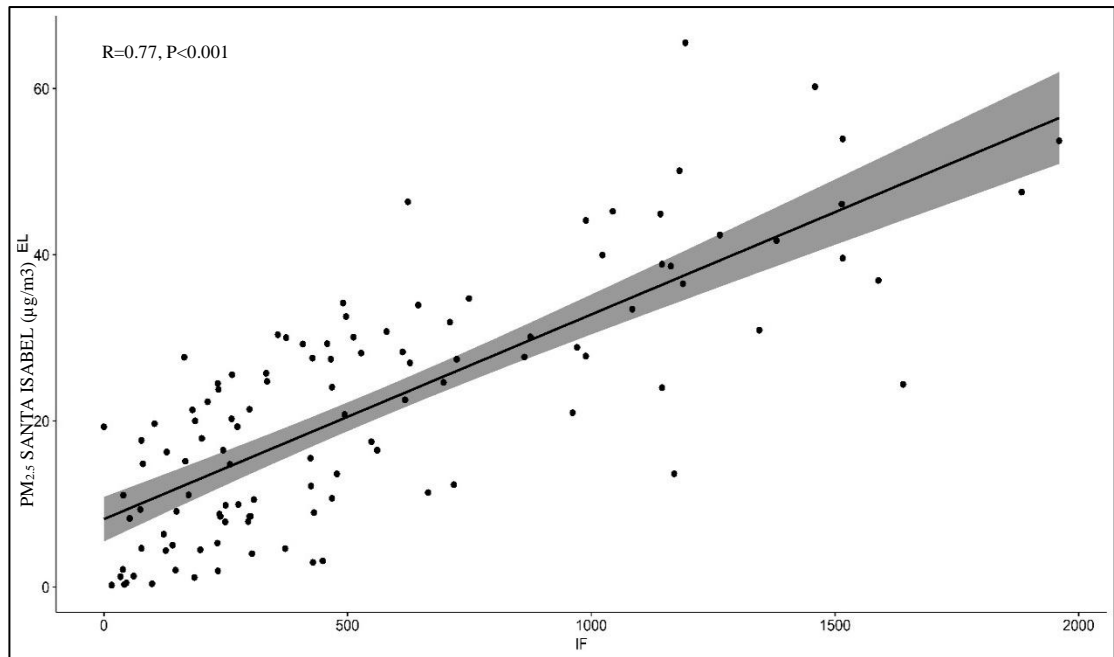


Los resultados difieren con investigaciones previas realizadas en otras ciudades colombianas, como las reportadas por Ibarra et al., (2022). Estas últimas evidencian un deterioro de la calidad del aire en ciudades urbanas durante la temporada seca, atribuido en parte a la quema de biomasa en regiones como la Amazonía y la Orinoquia, a pesar de la distancia geográfica; asimismo, es importante considerar que los factores que influyen en la calidad del aire son complejos y varían según las características geográficas, climáticas y socioeconómicas de cada región. Esto sugiere que a pesar de la baja correlación de PM<sub>2.5</sub> e IF para esta investigación, se debe considerar los efectos a largo plazo y los impactos acumulativos de la exposición a múltiples contaminantes atmosféricos sobre la salud de la población Galvis et al. (2021).

Por otro lado, en Santa Isabel se refleja una fuerte correlación positiva entre las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> y los incendios forestales registrados en la temporada seca; donde el coeficiente de correlación de Pearson ( $r = 0.77$ ,  $p < 0.001$ ) indica una relación lineal significativa entre ambas variables (Figura 22). Esta relación indica que a medida que aumenta la frecuencia de incendios, también aumentan las concentraciones de PM<sub>2.5</sub>, lo cual sugiere una contribución significativa de las partículas de hollín emitidas por los incendios a la contaminación del aire. Sin embargo, es importante considerar que otros factores, como las condiciones meteorológicas y las emisiones de fuentes locales, también pueden influir en las concentraciones de material particulado PM<sub>2.5</sub>.

**Figura 22**

*Correlación de PM<sub>2.5</sub> e incendios forestales en Santa Isabel*



Este resultado difiere de la correlación explicada en la Figura 21, debido a que esta se atribuye a la combinación de topografía y las condiciones sinópticas de la zona de medición, Santa Isabel, donde al ser una zona con niveles topográficos bajos y susceptible a sufrir este tipo de eventos, los transportes a larga distancia de aerosoles por las masas de aire son las responsables del incremento en las concentraciones de partículas de PM<sub>2.5</sub>, como consecuencia de los incendios producidos en la amazonia y centro de Brasil (Martins et al., 2018).

Asimismo, otro estudio donde evaluaron la relación de partículas atmosféricas con quemadas de biomasa mediante modelos matemáticos, señala que el territorio peruano es afectado, tanto por partículas generadas por incendios dentro del país, como por partículas provenientes de incendios ocurridos en países vecinos, como Brasil y Bolivia, este último con una contribución muy baja, por lo que confirma la importancia de evaluar los patrones sinópticos en medios de bajas latitudes para este tipo de estudios (Moya-Álvarez et al., 2017).

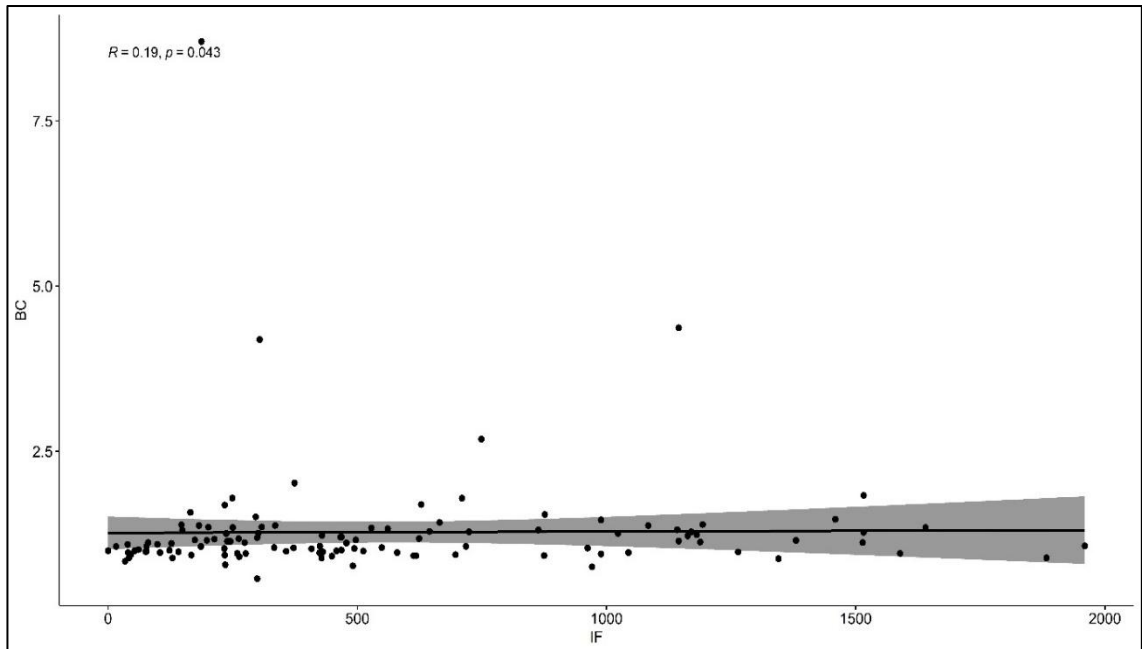
#### **4.1.4.3. Relación del carbono negro y los incendios forestales**

Dado que se encontraron concentraciones altas de BC y cantidad de IF con registros altos, se aplicó la prueba de Rho de Spearman, para así determinar si las concentraciones de BC fueron influenciadas por los IF. Los resultados mostraron una correlación positiva débil con un  $R= 0.19$  (Figura 23);  $P \text{ value} =0.043$ ; lo cual indica

que la concentración de partículas de BC, en su mayoría, no son provenientes de los IF, sino de otras fuentes adyacentes a la zona de monitoreo.

### Figura 23

*Correlación de incendios forestales y carbono negro*



No obstante, la topografía del lugar influye para que la correlación de BC e IF sea débil, puesto que el lugar de monitoreo se encuentra en una zona donde los cerros a su alrededor presentan relieves altos, lo cual resulta favorable porque impide que las partículas carbonáceas provenientes de la zona exterior al distrito, no ingresen. Sin embargo, también resulta desfavorable, ya que las partículas que se están generando dentro de la zona de monitoreo, no salgan al exterior, lo cual hace que la ciudad presente niveles de concentraciones altos de BC provenientes de fuentes antropogénicas mismas de la ciudad, tal como lo manifiesta Flores et al., (2014), donde encontraron que las fuentes móviles contribuyen con 94 %, las fijas con 5 %, y la quema de biomasa con menos de 1%.

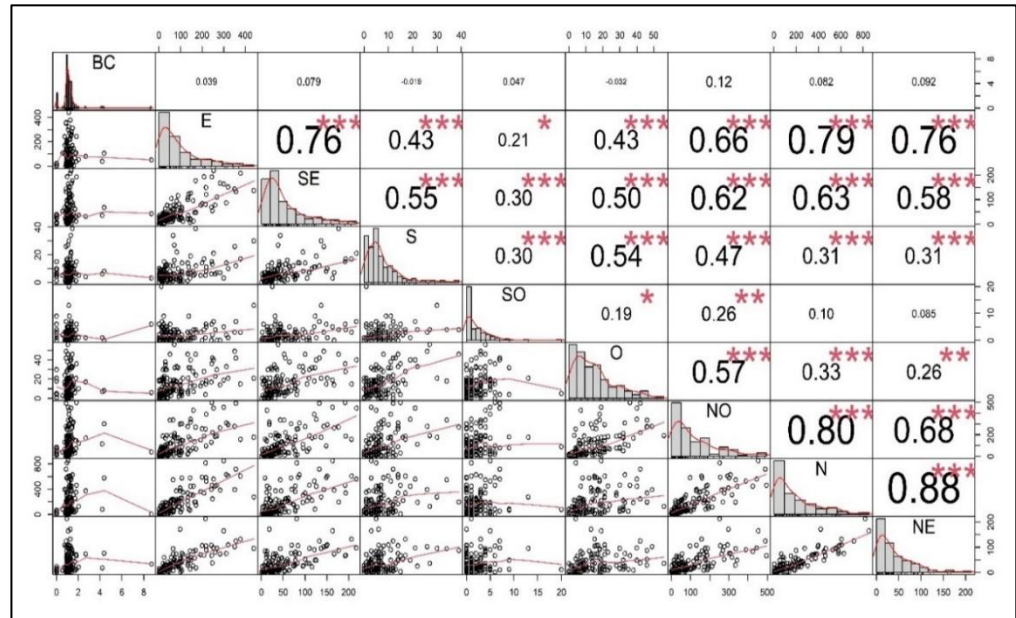
#### 4.1.4.2.1. Correlación multivariada del carbono negro e incendios forestales

Se aplicó la correlación multivariada para asociar la relación de las concentraciones de BC con el número de IF generados en los sectores de E, SE, S, SO, O, NO, N y NE a nivel de todo el Perú, donde, de acuerdo a lo obtenido se observa que el BC está mayor influenciado por la zona E ( $p=0.039$ ;  $p<0.05$ ) y SO ( $p=0.047$ ;  $p<0.05$ ) tal como se observa en la Figura 24. Teniendo en cuenta que en la zona E del Perú se encuentra la Amazonía peruana y la de Brasil, es bastante probable que estas concentraciones están asociadas a IF producidos por

los agricultores en estos meses para la limpieza y preparación de sus terrenos agrícolas tal como lo manifiesta Rocha & Huacho (2022).

**Figura 24**

*Comportamiento horario del BC*



Sin embargo, estos resultados también revelan una correlación baja proveniente de la zona SO, lugar donde se encuentra la ciudad costera (Lima) y el océano pacífico. Si bien es cierto, en este sector no se generan IF como parte de contribución al aumento de BC, pero si existe mayor transición de fuentes móviles, ya que diversos estudios señalan que el parque automotor es una de las principales fuentes del BC (Moretti-Villegas, 2023). Asimismo, es demostrable que las corrientes masas de aire generadas en el océano pacífico, también conocida como efecto Coriolis, hayan influido para que la dispersión de BC, por acción de la fuerza del viento, se transporten por esta zona marítima (Britannica, 2025). Asimismo, no se descarta la probabilidad de que la manifestación de BC en estos espacios también se deba al transporte marítimo, ya que los barcos utilizan enormes cantidades de petróleo para desplazarse, emitiendo cerca de 1.000 millones de toneladas de GEI, entre ellos las partículas de BC, afectando a la salud poblacional costeras, especialmente a los que viven cerca a los puertos o de otras actividades que se realizan cerca al lugar (Climate & Clean Air Coalition [CCAC], 2019).

#### 4.1.5. Estimación de porcentaje de aportes de fuentes de carbono negro

##### 4.1.5.1. Retrotrayectorias de incendios forestales para días picos de carbono negro

En los resultados de la evaluación de BC se encontraron 13 días picos que superaron el percentil 90. Estos fueron:

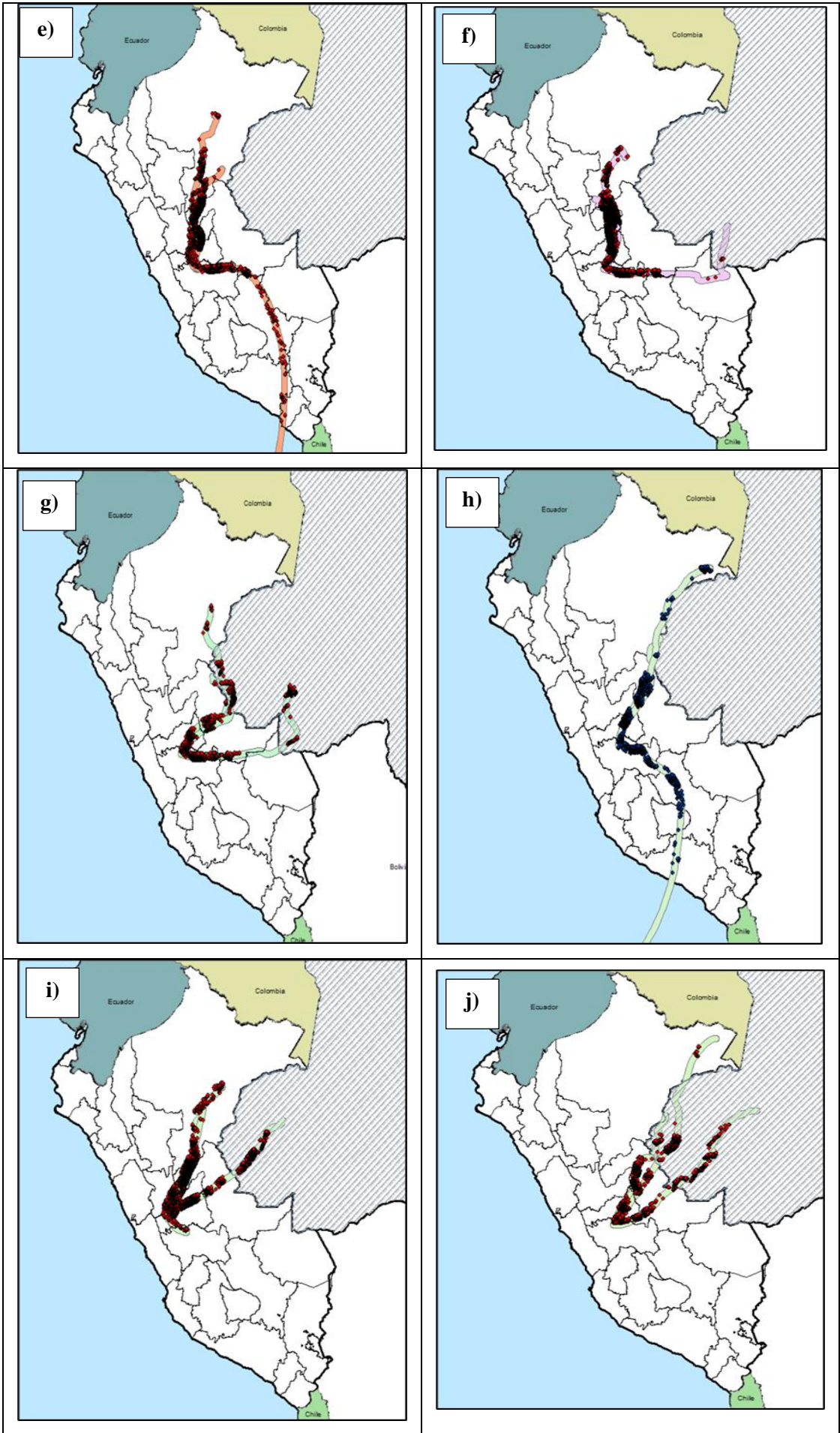
**Tabla 7**

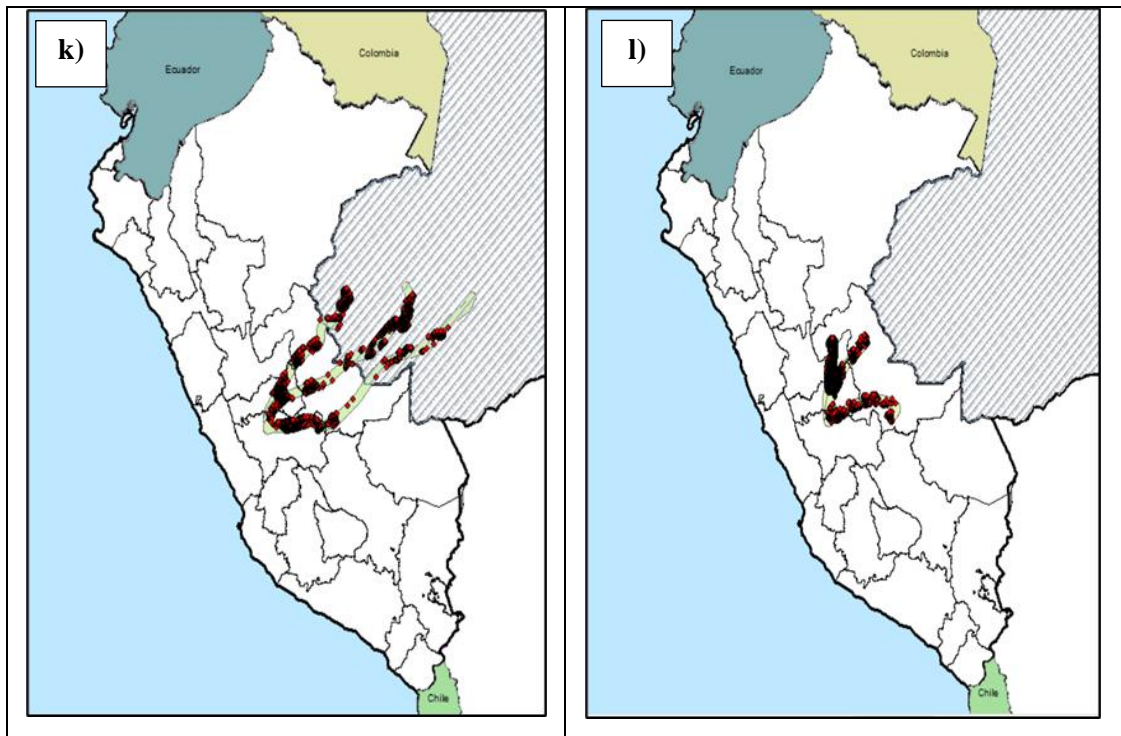
*Días pico de carbono negro que superaron el percentil 90*

Nº	Fecha
1	02/07/2023
2	22/07/2023
3	04/08/2023
4	05/08/2023
5	20/08/2023
6	26/08/2023
7	27/08/2023
8	01/09/2023
9	02/09/2023
10	14/09/2023
11	14/09/2023
12	16/09/2023

Donde, para un análisis más exhaustivo, se realizaron las retrotrayectorias de masas de aire a 72 horas atrás por cada día pico desde el punto de monitoreo, y así evaluar la coincidencia de incendios (Figura 25).







*Nota.* 25a) retrotrayectoria del 2 de julio, 25b) retrotrayectoria del 22 de julio, 25c) retrotrayectoria del 4 de agosto, 25d) retrotrayectoria del 5 de agosto, 25e) retrotrayectoria del 20 de agosto, 25f) retrotrayectoria del 26 de agosto, 25g) retrotrayectoria del 27 de agosto, 25h) retrotrayectoria del 1 de septiembre, 25i) retrotrayectoria del 2 de septiembre, 25j) retrotrayectoria del 14 de septiembre, 25k) retrotrayectoria del 15 de agosto, 25l) retrotrayectoria del 16 de agosto, todos los días pertenecientes al periodo seco del 2023.

la Figura 25a muestra la trayectoria para el día 02/07/2023 donde revela que para ese día las masas de aire provinieron de la zona sureste, atravesando por las regiones de Cuzco, Ucayali, Madre de Dios y la amazonia de Bolivia, llegando a coincidir con 6851IF para ese día. Para el caso de la figura 25b se observa las retrotrayectorias para el día 22/07/2023, donde revela que mayormente provinieron de la zona este circunvalando por las regiones de Junín, Pasco, Ucayali y la selva de Brasil-Bolivia; llegando interceptar con 8288 incendios ocurridos.

La Figura 25c refleja el comportamiento de retrotrayectorias para el día 04/08/2023, siendo este aún más variado, puesto que estas se orientaron más a la zona sur atravesando por las regiones de Junín, Pasco, Huánuco y San Martín, y por el este con la región de Ucayali y la Amazonia boliviana. Por otro lado, en la Figura 25d revela las retrotrayectorias para el día 05 de agosto, donde muestra que estas dan paso por el suroeste y sureste desde el punto de monitoreo, intercediendo por las regiones de Junín,

la costa Limeña, Ucayali, Madre de Dios y la Amazonía de Bolivia, coincidiendo con un total de 6255 incendios.

Sin embargo, a diferencia del día 05/08/2023, las retrotrayectorias para el día 20/08/2023 revelo un comportamiento inverso de sur a norte, donde las que se dirigieron al sur dieron paso por las regiones de Junín, Cusco y Arequipa, mientras las que se dirigieron al norte atravesaron por Pasco, Huánuco, la zona noroeste de Ucayali y Loreto, todas estas trayectorias generadas para este día coincidieron con un total de 9514 incendios (Figura 25e). Por otro lado, la Figura 25f refleja el comportamiento de retrotrayectorias para el 26/08/2023, donde mostro un comportamiento de retrotrayectorias similar al de la Figura 25e, no obstante, estas atravesaron por regiones ubicadas al noreste del punto de monitoreo, como Junín, Pasco, Ucayali y la zona suroeste de Loreto, mientras que por la zona sureste atravesó por la región de Cuzco y Madre de Dios, llegando a interceptar con 5314 incendios.

La Figura 25g refleja el comportamiento de trayectoria de masa de aire para el día 27/09/2023, en la cual se observa que sus trayectorias circunvalaron mayormente por las regiones de Junín, Pasco, Ucayali, Loreto y la Amazonia Brasileña, coincidiendo con un total de 11376 incendios forestales generados. No obstante, las retrotrayectorias de la Figura 25h para el día 01/09//2023, revelan un comportamiento similar al de la Figura 25e (norte-sur), atravesando por Arequipa, Cusco y Junín con dirección al sur, mientras que la zona norte dio paso por las regiones de Pasco, Huánuco, Ucayali y Loreto, logrando interceptar con un total de 4946 incendios.

Del mismo modo, la Figura 25i representa el comportamiento de las trayectorias para el día 02/09/2023, donde revela un comportamiento similar al de la Figura 25g, orientado al este y noreste, dando paso por las regiones de Junín, Pasco, Huánuco, Ucayali, Loreto y la Amazonia Brasileña, interceptando con 12898 incendios que, en su mayoría se produjeron en la selva peruana. Para el caso del día 14/09/2023, Figura 25j, las trayectorias presentaron un comportamiento similar al de la Figura 25g, donde en su mayoría venían dirigidos por la zona noreste y este, atravesando gran parte de la región Junín, Ucayali, Loreto y la Amazonia Brasileña, estas interceptaron con un total de 6119 incendios forestales y que, en su mayoría se alojaron en los departamentos de Junín y Ucayali.

La Figura 25k muestra el comportamiento de las trayectorias, donde claramente se puede definir las 3 escalas (100, 1000 y 3000m) para el día 15/09/2023, no obstante, estas 3 trayectorias en su mayoría provinieron orientados por la zona este, amazonia brasileña, atravesando por los departamentos de Ucayali, Pasco y Junín, coincidiendo

con un total de 7109 incendios forestales, alojados en su mayoría en la selva de Brasil y la selva central peruana. Por último, la Figura 251 muestran un comportamiento no tan variado en sus retrotrayectorias, a comparación de las anteriores fechas, puesto que en su mayoría estas retrotrayectorias circunvalaron la zona centro del Perú, abarcando las regiones de Junín, Pasco, Huánuco y Ucayali, y coincidiendo con un total 5386 incendios y que, en su mayoría estuvieron alojados en los departamentos de Pasco y Huánuco.

Para la mayoría de las gráficas presentadas se observa que más del 50% coinciden en que las trayectorias provienen de la zona este y noreste, lo cual se vería influenciado por los patrones sinópticos, que propician las intrusiones de partículas generadas por quema de biomasa en la zona este y centro de la Amazonia brasileña (Huerta, 2019). Por otro lado, un estudio realizado por Portillo (2022) en las cuencas atmosféricas de los valles de México y Toluca, reveló que dentro de los valles suelen darse conglomerados de trayectorias, el cual se atribuye a emisiones locales, fuentes aledañas y a la misma topografía que sigue el recorrido de las trayectorias.

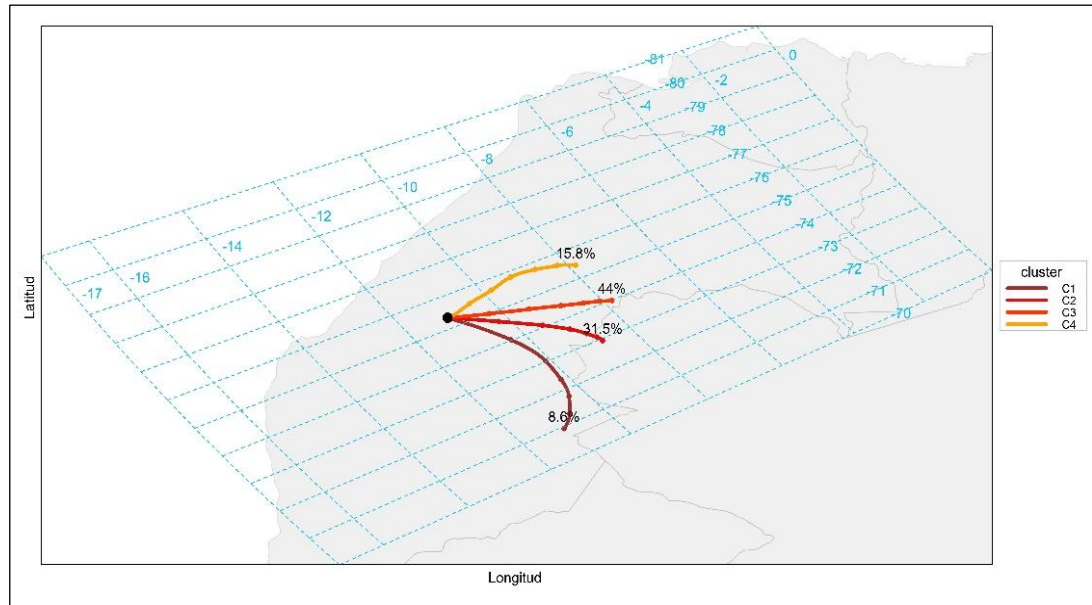
Asimismo, es importante recalcar que estas trayectorias de masas de aire no solo transportan partículas carbonáceas provenientes de quema, sino también cantidades de polvo de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Esto ha sido evidenciado por Moreira et al. (2020), quienes, en un estudio realizado en una región semiárida del sureste de España, señalan que los flujos de aire provenientes del suroeste transportan grandes cantidades de polvo de origen africano, incrementando significativamente las concentraciones de estos contaminantes y deteriorando la calidad del aire.

#### **4.1.5.2. Clústeres de retrotrayectorias de masas de aire**

Los resultados de los clústeres analizados se centran en evaluar analizar la distribución espacial de las retrotrayectorias de masas de aire a escala de 100, 1000 y 3000m desde el punto de monitoreo en Chanchamayo, donde revelan en su mayoría una predominancia de la zona este. La Figura 26 muestra el análisis de clúster de trayectorias a escala 100m, lo cual muestra que el mayor porcentaje (%) provino de la dirección noreste con 44% (C3), seguido del segundo mayor % proveniente de la zona este con 31.5 % (C2), mientras los otros dos clústeres <50% estuvieron direccionados por la zona noreste y sureste

**Figura 26**

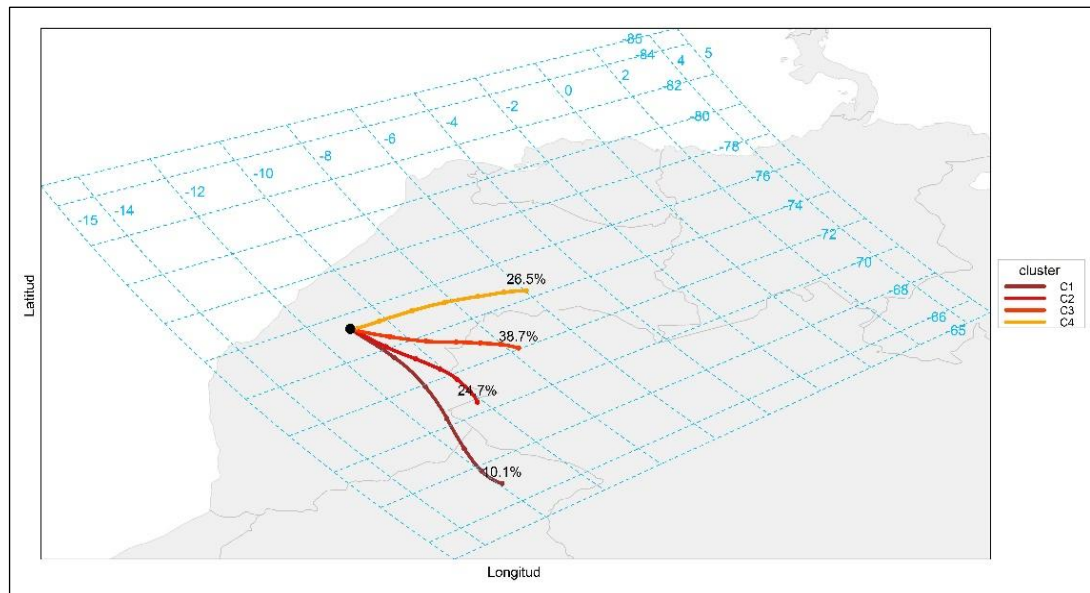
*Clúster de retrotrayectorias a escala de 100m*



Por otro lado, la Figura 27 muestra los resultados para los clústeres a escala de 1000m, los cuales revelaron que el mayor % vino dirigido por la zona este con 38.7 % (C3), seguido de la zona noreste con 26.5% (C2), no obstante, los otros dos clústeres <30% vinieron dirigidos del sureste (C4 y C1).

**Figura 27**

*Clúster de retrotrayectorias a escala de 1000m*

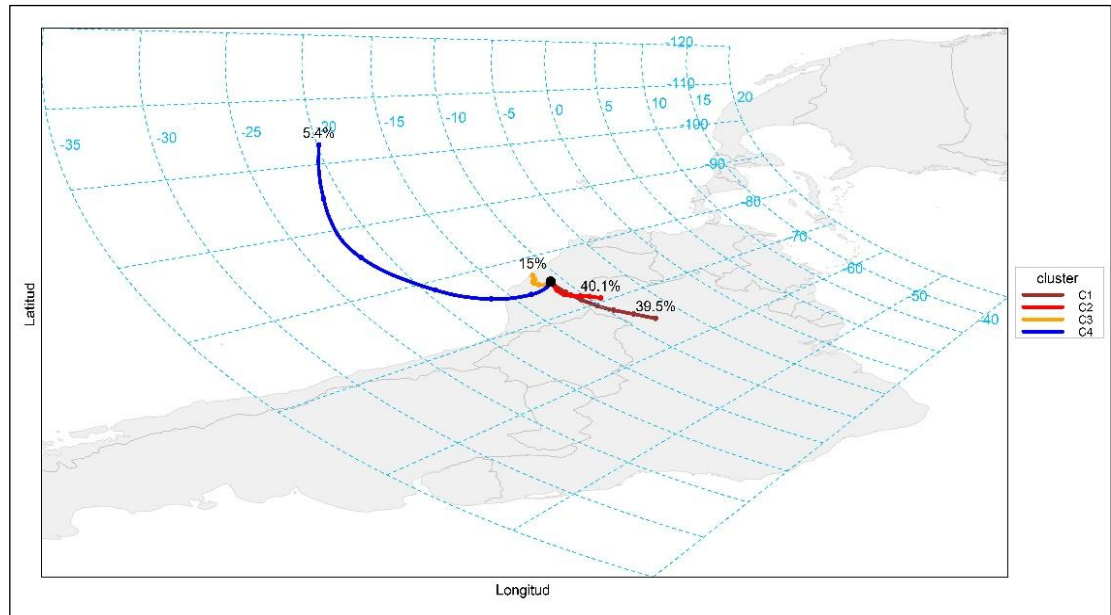


Finalmente, la Figura 28 refleja el análisis de los resultados que fueron evaluados a escala sobre los 3000m, estos indican que la durante todo el periodo evaluado estos provinieron de la zona este con 40.1% (C2), seguido de la zona sureste con 39.5% (C1); no obstante, a esta escala se observa que los otros dos clústeres

provinieron de la zona oeste y suroeste, este ultima, con 5.4% (C4), estuvo asociado a los vientos alisios generados sobre las corrientes marinas.

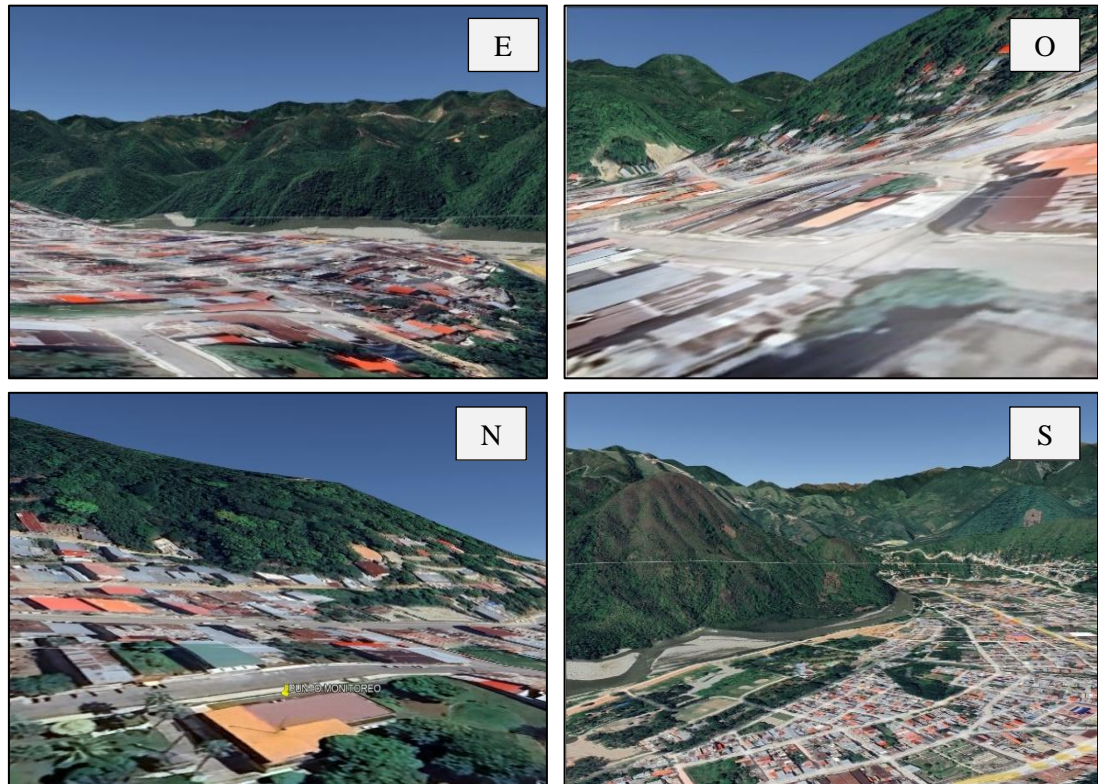
### Figura 28

*Clúster de retrotrayectorias a escala de 3000m*



#### 4.1.5.3. Relieve de Chanchamayo

Es importante recalcar la influencia de la topografía para este estudio, puesto que el distrito de Chanchamayo se caracteriza por ser una meseta con una topografía de altos relieves montañosos sobre los 1500m de altura; en la zona norte del punto de monitoreo se observa un mínimo número de casas, a comparación de los otros tres sectores, predominando mayormente un alto relieve de montañas cubierto de una considerable cobertura vegetal (Figura 29). Por otro lado, la zona este refleja un mayor número de casas, entre ellos, restaurantes, tiendas, instituciones, terminales terrestres y otros que realizan actividad comercial, y más al fondo se ubica el río Chanchamayo al pie de predominantes montañas con una considerable altitud.

**Figura 29***Topografía del lugar de estudio*

Por la zona sur del punto de monitoreo, se encuentran centros de salud, centros educativos y también tiendas comerciales; asimismo por esta dirección se ubica el distrito de San Ramon y la carretera principal que sirve como medio para conectar los distritos adyacentes al distrito de Chanchamayo. La zona sur respecto al punto de monitoreo también refleja viviendas aledañas y actividades comerciales, sin embargo, a unos kilómetros más se deja ver una considerable cantidad de montañas con una altitud sobre los tres mil.

Diversos estudios, como el de Portillo (2022) señala que los valles en las ciudades urbanas influyen para que se dé la aglomeración de trayectorias recirculación, en consecuencia, la acumulación de contaminantes de  $PM_{2.5}$  asociados a fuentes locales como parque automotor, emisiones de industrias, quema de pastizales, entre otros. Por otro lado, otro estudio realizado por Álvarez -Tolentino & Suarez-Salas (2020), donde evaluaron el aporte cuantitativo de las fuentes de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en sitios urbanos del Valle del Mantaro, encontraron cinco fuentes principales que influyen en la calidad del aire en sitios urbanos, tales como: polvo de suelo, quema de biomasa, vehículos, combustible-aceite y fundición. De esta manera, aunque la calidad del aire en

Chanchamayo muestre una apariencia buena, las condiciones topográficas repercuten en la concentración de partículas generadas dentro del mismo distrito.

#### 4.2. Prueba de hipótesis

**Hipótesis general:** Existe una relación directa significativa entre el comportamiento del carbono negro y los focos de incendios forestales.

Para realizar el análisis estadístico, lo primero fue evaluar si los datos siguen una distribución normal para ello se aplicó la prueba de Normalidad de Kolmogorov–Smirnov con  $\alpha = 0.05$  debido a que los datos superaron el tamaño de 35 ( $n \geq 35$ ) (Malhotra, 2008), cuya fórmula se expresa en la ecuación 2:

**Ecuación N°2:** Spearman

$$S = \max | F_n(x) - F(x) |$$

- KS: Estadístico de prueba de Kolmogorov-Smirnov
- $F_n(x)$ : Función de distribución acumulada empírica
- $F(x)$ : Función de distribución acumulada teórica

Para ello se utilizó el programa Rstudio 4.2.3 partiendo de los siguientes supuestos:

- **H0**= Los datos analizados de carbono negro,  $PM_{2.5}$  e incendios forestales siguen una distribución normal.
- **H1**= Los datos analizados de carbono negro,  $PM_{2.5}$  e incendios forestales no siguen una distribución normal.

No obstante, ya que presentaron una distribución no normal, se rechazó la H1 y se aceptó la H0, dando paso a la prueba de correlación de Spearman (Ecuación 1). Una vez obtenido el coeficiente de correlación se procedió a comprobar la hipótesis partiendo de los siguientes supuestos:

- **H0**= Existe una relación directa significativa entre el comportamiento del carbono negro y los focos de incendios forestales
- **H1**= No existe una relación directa significativa entre el comportamiento del carbono negro y los focos de incendios forestales

Significancia estadística en p: Se rechaza la hipótesis nula si  $p < 0,05$ ; se acepta la hipótesis nula si  $p > 0.05$ .

**Tabla 8**

*Coefficiente de correlación y Pvalue para las variables BC,  $PM_{2.5}$  e IF*

Lugares de estudio	Variables		R	Pvalue
Chanchamayo	BC	IF	0.19	0.043
	$PM_{2.5}$		0.13	0.012

<b>Santa Isabel</b>	PM <sub>2.5</sub>	IF	0.77	< 0.01
---------------------	-------------------	----	------	--------

## CONCLUSIONES

La variabilidad diaria de las concentraciones BC evaluadas en Chanchamayo en este estudio es considerable ( $0.57 \pm 8.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en comparación con otros estudios, ya que se identificaron 12 días con picos que superaron el percentil 90. Asimismo, el comportamiento horario del BC presentó incrementos entre las 12:00 y 1:00 h, así como un pico máximo entre las 8:00 y 10:00 h. El primer incremento se atribuye a la llegada de aerosoles provenientes de fuentes externas, mientras que el pico máximo estaría asociado principalmente a la influencia de emisiones locales.

Respecto al comportamiento de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> se encontraron diferencias significativas entre la misma ciudad de Chanchamayo y Santa Isabel (Pvalue <0.05). En el distrito de Chanchamayo varían entre 0.0024 -16.453  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , no obstante, ninguno de los días superó el ECA<50. Mientras que para Sanata Isabel las concentraciones van desde 0.22 a 65.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , llegando a alcanzar días que superaron el ECA para PM<sub>2.5</sub>.

En la evaluación de la fluctuación de incendios, se determinó que durante el periodo de estiaje los meses con mayor número de registro de quemas son los meses de agosto y septiembre, llegando alcanzar hasta los 22706 IF. Las regiones que registraron mayor frecuencia de IF fueron Junín, Pasco, Huánuco, Ucayali, San Martín, y el sur de la región de Loreto.

Por otro lado, se encontró una correlación baja entre BC y PM<sub>2.5</sub> en Chanchamayo, indicando que la variabilidad de concentración de PM<sub>2.5</sub> se atribuye a otro tipo de partículas, generadas en el mismo distrito. Asimismo, se evaluó la correlación de PM<sub>2.5</sub> en incendios forestales, donde se encontró una correlación directa positiva, determinándose la influencia de las partículas de hollín, ya sea adyacentes o transfronterizas, en la mala calidad del aire. Sin embargo, cuando se determinó la correlación de BC e IF, se obtuvo una correlación positiva débil, lo cual indica que las partículas de BC, en su mayoría, no son provenientes de IF, sino de otras fuentes adyacentes a la zona de monitoreo.

Por último, también se realizaron se analizaron las retrotrayectorias para los días picos de BC donde se observó que en estos días las trayectorias coinciden con los IF, sin embargo, pese a la coincidencia se observa una baja correlación entre BC e IF, esto se vería asociado por los patrones sinópticos y la aglomeración de valles que sigue la trayectoria en su recorrido. Asimismo, el relieve de la misma ciudad de estudio se caracteriza por presentar montañas altas

a sus alrededores, influenciando en la concentración de partículas de fuentes puntuales, y afectando la calidad del aire del distrito.

## RECOMENDACIONES

Es necesario establecer una red de monitoreo atmosférico integral a escala local y regional, equipada con sensores de alta precisión para medir concentraciones de partículas finas BC PM<sub>2.5</sub> y otros contaminantes atmosféricos, y así identificar las fuentes de emisión predominantes, cuantificar su contribución a la calidad del aire y evaluar la efectividad de las medidas de mitigación implementadas.

Paralelamente, a los futuros investigadores se propone desarrollar un modelo de dispersión atmosférica que permita simular la trayectoria y concentración de los contaminantes, considerando las condiciones meteorológicas locales y la topografía de la zona. Este modelo será una herramienta fundamental para la predicción de episodios de contaminación y la evaluación de escenarios futuros en Chanchamayo.

Asimismo, elaborar un plan de contingencia integral que incluya la implementación de un sistema de alerta temprana basado en el monitoreo de variables meteorológicas, índices de combustibilidad y detección remota de puntos calientes. Además, es necesario fortalecer la capacidad de respuesta de las brigadas contra incendios a través de la provisión de equipamiento adecuado y la realización de simulacros de emergencia.

Por último, tener en cuenta la calibración de los equipos de monitoreo y la alimentación de fuente eléctrica cuando se realiza el monitoreo en el periodo seco, puesto alteraciones en estos aspectos terminan afectando los resultados de la investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abanto, R., Arnott, P., Carabali, G., Castro, T., Paredes, G., Peralta, O., Ruiz, L., Salcedo, D. (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*, (26), 68-76. <https://revistas.unjbg.edu.pe/index.php/cyd/article/view/934>
- AIDA & IEMA. (2016). *Contaminantes Climáticos de Vida Corta*. Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente (AIDA); Instituto de Energía e Medio Ambiente (IEMA), [https://www.aida-americas.org/sites/default/files/featured\\_pubs/reporte\\_ccvc.pdf](https://www.aida-americas.org/sites/default/files/featured_pubs/reporte_ccvc.pdf)
- Alas, HD, Stöcker, A., Umlauf, N., Senaweera, O., Pfeifer, S., Greven, S., & Wiedensohler, A. (2022). Exposición peatonal a carbono negro y emisiones de PM<sub>2.5</sub> en zonas urbanas críticas: nuevos hallazgos mediante técnicas de medición móviles y modelos de regresión bayesiana flexibles. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 32 (4), 604-614. <https://www.nature.com/articles/s41370-021-00379-5>
- Alencastre Rocha, I. (2023). *Determinación del costo de mortalidad atribuible a la contaminación atmosférica por material particulado con diámetro menor a 10 y 2.5 micras en Arequipa Metropolitana en el Período 2010-2019*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/f648cbcf-4f3d-4568-b2b0-087bbb9ad7c>
- Alvarez, D. & Suarez, L. (2020). Aporte Cuantitativo de las Fuentes de PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2.5</sub> En Sitios Urbanos del Valle del Mantaro, Perú. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36, 4, 2020. <https://doi.org/10.20937/RICA.53473>
- AQ-SPEC (2015). *Sensores - Contaminantes Criterios*. <https://www.aqmd.gov/aq-spec/sensors>
- ATMO. (2023). *Atmotube Technical Specifications*. <https://atmotube.com/atmotube-support/atmotube-technical-specification>
- Bloss, W. (2014). *Atmospheric particulate matter*. Royal Society of Chemistry. [https://www.rsc.org/images/environmental-brief-no-4-2014\\_tcm18-237725.pdf](https://www.rsc.org/images/environmental-brief-no-4-2014_tcm18-237725.pdf)
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., ... & Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of geophysical research: Atmospheres*, 118(11), 5380-5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- Bond, TC y Bergstrom, RW (2006). Absorción de luz por partículas carbonosas: una revisión de investigación. *Ciencia y tecnología de aerosoles*, 40 (1), 27-67. <https://doi.org/10.1080/02786820500421521>

- BRITANNICA. (28 de noviembre del 2025). *Fuerza de Coriolis*.  
<https://www.britannica.com/science/geostrophic-motion>
- Cachon, B., Firmin, S., Verdin, A., Ayi-Fanou, L., Billet, S., Cazier, F., Martin, P., Aissi, F., Corcout, D., Sanni, A., & Shirali, P. (2014). Proinflammatory effects and oxidative stress within human bronchial epithelial cells exposed to atmospheric particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>>2.5</sub>) collected from Cotonou, Benin. *Environmental pollution*, 185, 340-351. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026974911300554X>
- Cantillo, A. y Lozano, J. (2020). *Evaluación de las concentraciones de Black Carbón en la ciudad de Barranquilla Atlántico*. [Tesis de pregrado, Universidad de la costa CUC, Colombia]. <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/6296>
- Castillo, M., Pedernera, P. & Peña, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 9(3), 44-53. <https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Bosques-Ecosistemas/25.pdf>
- Castro Pico, J. P. (2025). *Descripción de la calidad del aire en la ciudad de Bogotá con respecto a la contaminación generada por fuentes fijas entre los años 2017 a 2021*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/67583>
- CCAC. (2019). *Carbono negro y transporte marítimo: el largo camino hacia la regulación de un contaminante climático de vida corta*. <https://www.ccacoalition.org/es/news/black-carbon-and-maritime-shipping-long-road-regulating-short-lived-climate-pollutant>
- CENEPRED. (2019). *Escenario de Riesgo por Incendios Forestales*. [https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//10471\\_escenario-de-riesgo-por-incendios-forestales.pdf](https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//10471_escenario-de-riesgo-por-incendios-forestales.pdf)
- CENEPRED. (2021). *Escenario de Riesgo por Incendios Forestales de la Región Junín*. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/11464>
- Cerda, C. A. (2024). *Análisis de la dispersión de partículas PM 2.5 en la ciudad de Guanajuato*. [Tesis de pregrado, Universidad de Guanajuato]. <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/13250>
- Choomanee, P., Bualert, S., Thongyen, T., Rungratanaubon, T., Rattanapotanan, T., & Szymanski, WW (2024). Más allá de la evaluación común de la calidad del aire urbano: Relación entre PM<sub>2.5</sub> y carbono negro durante períodos de niebla y sin niebla en Bangkok. *Atmospheric Pollution Research*, 15 (2), 101992. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101992>

- Conde-Oria, F., & Rasilla Álvarez, D. F. (2024). *Inversiones térmicas y calidad del aire en la montaña cantábrica: estudio de caso en el valle de Campoo*. [Tesis de Pregrado, Universidad de Alicante]. <https://rua.ua.es/entities/publication/80818b3d-3bb7-41a7-ba26-45cb0a246327>
- Días, C. (2016). *Estudio del Carbono Negro (Black Carbón) contenido en partículas suspendidas en ambientes urbanos*. [Tesis de pregrado, Centro de Investigación en Materiales Avanzados]. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/2244>
- DST. (2023). *Principle of Operation: Black Carbon Aerosol*. [https://www.dstech.io/\\_files/ugd/18a7e0\\_a33afa7dbf694e51ad94277acb42c787.pdf](https://www.dstech.io/_files/ugd/18a7e0_a33afa7dbf694e51ad94277acb42c787.pdf)
- EPA. (2012). *Report to Congress on Black Carbon*. U.S. <https://19january2017snapshot.epa.gov/www3/airquality/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf>
- EPA. (2023a). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*. <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- EPA. (2023b). *Efectos sobre la salud y el medio ambiente de las partículas en suspensión (PM)*. <https://espanol.epa.gov/espanol/el-medioambiente-y-su-salud>
- EPA. (2025). *¿Qué es el PM, y cómo llega al aire?* <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- ESA. (2025). *La contaminación atmosférica*. [https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_Global\\_ES/SEMW8RLJ74G\\_0.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_ES/SEMW8RLJ74G_0.html)
- EUROFINS. (2024). *¿Qué son las partículas PM10?* <https://www.eurofins-environment.es/es/particulas-pm10-y-como-se-generan/>
- Fang, GC, Chang, CN, Chu, CC, Wu, YS, Fu, PPC, Yang, IL y Chen, MH (2003). Caracterización de elementos particulados metálicos de TSP, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>2.5-10</sub> aerosoles en un sitio de muestreo en una granja en Taiwán, Taichung. *Ciencia del Medio Ambiente Total*, 308 (1-3), 157-166. [https://www.academia.edu/28777655/Characterization\\_of\\_particulate\\_metallic\\_elements\\_of\\_TSP\\_PM2\\_5\\_and\\_PM2\\_5\\_10\\_aerosols\\_at\\_a\\_farm\\_sampling\\_site\\_in\\_Taiwan\\_Taichung](https://www.academia.edu/28777655/Characterization_of_particulate_metallic_elements_of_TSP_PM2_5_and_PM2_5_10_aerosols_at_a_farm_sampling_site_in_Taiwan_Taichung)
- Flores, O., Fabela, M., Blake, C., Vázquez, D., & Hernández, R. (2014). Regulación de emisiones contaminantes de los motores de combustión interna. *Instituto Mexicano del Transporte*, 1, 149. <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=396&IdBoletin=149>

- Frandsen, WH (1987). La influencia de la humedad y del suelo mineral sobre los límites de combustión del mantillo forestal humeante. *Revista Canadiense de Investigación Forestal*, 17 (12), 1540-1544. <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/x87-236>
- Galvis-Vizcaíno, S. A., León-Barraza, I. R., Padilla-Urueta, K. D. S., Pombo-Navas, M. Y., Rada-Carrillo, M. B., Vera-Brand, J., & Rebolledo-Cobos, R. C. (2021). Material particulado y trastornos de los sistemas cardiovascular y respiratorio en trabajadores de diferentes áreas: una revisión narrativa. *Revista de la Asociación Española de Especialistas en Medicina del Trabajo*, 30(3), 362-372.
- García Candela, D. X., & Muñoz Vera, A. A. (2025). *Implementación de un sistema de detección de incendios con sensores de humo y temperatura*. [Tesis de pregrado, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí]. <https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/9901>
- Giacomotti, J., Reynel, C., Fernandez-Hilario, R., Revilla, I., Palacios-Ramos, S., Terreros-Camac, S., ... & Linares-Palomino, R. (2021). Diversidad y composición florística en un gradiente altitudinal en Chanchamayo, selva central del Perú. *Folia Amazónica*, 30(1), 1-14. <https://revistas.iiap.gob.pe/index.php/foviaamazonica/article/view/533>
- Gobbo, A., Costa, L., Cota, K., & Pompeo, L. (2016). Fine particulate matter estimated by mathematical model and hospitalizations for pneumonia and asthma in children. *Revista Paulista de Pediatría*, 34, 18-23. <https://www.scielo.br/j/rpp/a/JKn7xt8nykSwLc6YsnPTVcc/?lang=en>
- González Gaudiano, É. J. (2012). La representación social del cambio climático: una revisión internacional. *Revista mexicana de investigación educativa*, 17(55), 1035-1062. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S140566662012000400003&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S140566662012000400003&script=sci_arttext)
- González-Cabán, A., & Sánchez, J. J. (2019). Memorias del quinto simposio internacional sobre políticas, planificación y economía de los incendios forestales: servicios ambientales e incendios forestales. *Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-261, (Español)*. Albany, CA: Departamento de Agricultura de los EE. UU., Servicio Forestal, Estación de Investigación del Pacífico Suroeste. 267 p., 261. <https://research.fs.usda.gov/treearch/57742>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación (6ta ed.)*. México D.F.: McGRAW-HILL / Interamericana Editores,
- Huaroto Arango, M. S., & Mendoza Asencio, N. T. (2025). *Monitoreo y modelamiento de la calidad de aire en la capital de la provincia de Huanta–Ayacucho, 2023*. [Tesis de

- pregrado, Universidad Continental].  
<https://repositorio.continental.edu.pe/item/5f5d7335-b919-4dbf-8539-5022a947c8f2>
- Huerta, A. (2019). *Determinación de patrones meteorológicos sinópticos que propician intrusiones de polvo sahariano en la Comunidad Valenciana y la influencia de éstas sobre el PM10*. [Tesis de grado, Universidad Miguel Hernández de Elche].  
<https://dspace.umh.es/bitstream/11000/27011/1/TFG.%20Ariadna%20Huerta%20Viso.pdf>
- Ibarra-Espinosa, S., da Silva, GAM, Rehbein, A., Vara-Vela, A., & de Freitas, ED (2022). Efectos atmosféricos de la contaminación del aire durante los períodos secos y húmedos en São Paulo. *Environmental Science: Atmospheres*, 2 (2), 215-229.
- ICCT. (2016). *Métodos de medición de carbono negro y factores de emisión de los barcos*  
[https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources//16Jan2017\\_Black-carbon-measurement-methods-and-emission-factors-ships-Final\\_ICCT.pdf](https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources//16Jan2017_Black-carbon-measurement-methods-and-emission-factors-ships-Final_ICCT.pdf)
- IGSD. (2008). *Reducing Black Carbon May Be Fastest Strategy for Slowing Climate Change*.  
<https://www.ccacoalition.org/short-lived-climate-pollutants/black-carbon#:~:text=Measures%20to%20reduce%20black%20carbon,yields%2C%20and%20prevent%20premature%20deaths.>
- INAIGEM. (2018). *Impacto del carbono negro en los glaciares de la Cordillera Blanca*.  
<https://www.inaigem.gob.pe/2018/05/23/impacto-del-carbono-negro-en-los-glaciares-de-la-cordillera-blanca/>
- INAIGEM. (2023). *CARBONO NEGRO: Partículas atmosféricas contaminantes que amenazan a los glaciares del Perú*.  
<https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/c528cf52-282d-4d52-b07c-0276c79ff937>
- INDECI. (2025). *Preparados ante Incendios Forestales – Campañas*.  
<https://www.gob.pe/institucion/indeci/campa%C3%B1as/110563-preparados-ante-incendios-forestales>
- Invernizzi, G., Ruprecht, A., Mazza, R., Marco C. De, Mocnik, G., Sioutas, C. & Westerdahl, D. (2011). Medición de la concentración de carbono negro como indicador de los beneficios para la calidad del aire de las políticas de restricción del tráfico dentro de la zona del ecopass en Milán, Italia. *Atmospheric Environment*.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.04.008>
- Jeong, H. & Park, D. (2018). Características de las concentraciones máximas de carbono negro encontradas por niños de escuela primaria. *Ciencia del Medio Ambiente Total*, 637, 418-430. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.399>

- Krecl, P., Créso, A., Wiese, L., Ketznel, M., & Corrêa, M. (2016). Screening of short-lived climate pollutants in a street canyon in a mid-sized city in Brazil. *Atmospheric Pollution Research*, 1022-1036. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.06.004>.
- Manta, M. & León, H. (2004). Los incendios forestales en el Perú: grave problema por resolver. *FLORESTA*, 179-186, <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/2392/2001>
- Martins, L. D., Hallak, R., Alves, R. C., de Almeida, D. S., Squizzato, R., Moreira, C., Beal, A., Da Silva, I., Rudke, A. & Martins, J. (2018). Long-range transport of aerosols from biomass burning over southeastern South America and their implications on air quality. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(7), 1734-1745. <https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.2017.11.0545>
- Mcgraw, H. (2009). *Contaminación atmosférica*. <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448169816.pdf>
- MIDIS. (2023). *Plan de Gestión del Riesgo de Desastres del Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social (2023 - 2025)*. [https://www.juntos.gob.pe/wp-content/uploads/2023/03/RM\\_061\\_2023\\_MIDIS.pdf.pdf](https://www.juntos.gob.pe/wp-content/uploads/2023/03/RM_061_2023_MIDIS.pdf.pdf)
- MINAM. (2011). *Memoria descriptiva del mapa de vulnerabilidad física del Perú: Herramienta para la gestión del riesgo*. <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/402>
- MINAM. (2014). *INFORME NACIONAL DE LA CALIDAD DEL AIRE 2013-2014*. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/Informe-Nacional-de-Calidad-del-Aire-2013-2014.pdf>
- Mora, J. E. G. (2020). INCENDIOS FORESTALES: causas e impactos. *El Antoniano*, 6(1), 68-113. <https://revistas.unsaac.edu.pe/index.php/anto/article/view/866>
- Morand C. y Maesano I. (2004). *Contaminación del aire: de las fuentes de emisiones a los efectos sobre la salud*. <https://breathe.ersjournals.com/content/breathe/1/2/108.full.pdf>
- Moreira, I., Linares, C., Follos, F., Sánchez-Martínez, G., Vellón, J. M., & Díaz, J. (2020). Short-term effects of Saharan dust intrusions and biomass combustion on birth outcomes in Spain. *Science of the Total Environment*, 701, 134755.
- Moretti-Villegas, L. F., Tafur-Anzualdo, V. I., & Valiente-Saldaña, Y. M. (2023). Contaminación del aire en la ciudad de Lima, Perú. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 8, 822-830. [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2542-30882023000400822](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2542-30882023000400822)
- Morocho Barros, E. F., & Ríos Barrera, J. W. (2021). *Implementación de un sistema de monitoreo y posicionamiento geográfico para la prevención de incendios forestales*

- mediante una red sensorial* (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).  
<https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/10513>
- Moya Álvarez, AS, Arredondo, RE, & Yuli Posadas, R. Á. (2017). Determinación de la presencia de partículas (PM 10) en Perú producidas por quema de biomasa con ayuda de modelos numéricos. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33 (1), 99-108.
- Muñoz, C., Acevedo, P., Salvo, S., Fagalde, G., & Vargas, F. (2007). Detección de incendios forestales utilizando imágenes NOAA/16-LAC en la Región de La Araucanía, Chile. *Bosque* (Valdivia), 28(2), 119-128.  
[https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-92002007000200004](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002007000200004)
- Murray, F. & McGranahan, G. & Murray, F (2003). *La contaminación del aire y la salud en los países en rápido desarrollo: el contexto*. Exploración terrestre.  
<https://researchportal.murdoch.edu.au/esploro/outputs/991005544584807891>
- Nadal, J. R., & de Miera, Ó. S. (2010). La influencia de la actividad turística sobre la contaminación atmosférica: El caso de Mallorca. *Cuadernos de Turismo*, (25), 147-163.  
<https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/245965>
- NASA. (2021). *Observaciones Satélites y Herramientas de la NASA para el Monitoreo de Incendios Activos, Humo y Evaluación Post-Incendio*. NASA
- NASA. (2024). *Los efectos del cambio climático*. <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/los-efectos-del-cambio-climatico/>
- NASA. (2025). *Observaciones Satélites y Herramientas de la NASA para el Monitoreo de Incendios Activos, Humo y Evaluación Post-Incendio*.  
<https://www.earthdata.nasa.gov/es/learn/trainings/observaciones-satelitales-y-herramientas-de-la-nasa-para-el-monitoreo-de-incendios>
- Niu, H., Kang, S., Wang, H., Du, J., Pu, T., Zhang, G., ... y Shi, X. (2020). Impurezas que absorben la luz que aceleran el derretimiento de los glaciares en el sureste de la meseta tibetana. *Contaminación ambiental*, 257, 113541.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749119337054>
- OMS. (19 de noviembre del 2022). *Contaminación del aire ambiente. (exterior)*. Organización Mundial de la 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)
- Parra, A. Q., & Orozco, J. A. (2005). Monitoreo de material particulado-fracción respirable (PM 2.5) en Pamplona (Colombia). *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 3(2), 1-11.

- [https://www.researchgate.net/publication/26603109\\_Monitoreo\\_de\\_material\\_particula-do-fraccion\\_respirable\\_PM\\_25\\_en\\_Pamplona\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/26603109_Monitoreo_de_material_particula-do-fraccion_respirable_PM_25_en_Pamplona_Colombia)
- Pazos Perez, A. V. (2021). *Impacto del material particulado PM 2.5 en la fusión del glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco 2021*. [Tesis de Pregrado, Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe/item/f47c26b8-e245-4540-ab12-741f1063c185>
- Peña, I. (2014). *Determinación de Carbono Negro Atmosférico mediante Métodos Ópticos* [Tesis de Pregrado, Universidad Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2014/agosto/0716826/0716826.pdf>
- Pérez Rodríguez, F. G., & Rodas Monsefú, N. J. (2017). *Influencia de la inversión térmica en la contaminación atmosférica según los ECAS en el distrito de Cajamarca del 2013 al 2015*. [Tesis de Pregrado, Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/item/44f6d243-4e47-4d37-afc9-ed42d4694e1e//>
- Piñas, S. P. (2017) *Estudio del espesor óptico de los aerosoles generados por la biomasa y su influencia en el forzamiento radiativo terrestre para la ciudad de Huancayo*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/3374/3/IV\\_FIN\\_107\\_TE\\_Pi%C3%B1as\\_Sumalave\\_2017.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/3374/3/IV_FIN_107_TE_Pi%C3%B1as_Sumalave_2017.pdf)
- Piñas-Sumalave, P. R. (2017). *Estudio del espesor óptico de los aerosoles generados por la biomasa y su influencia en el forzamiento radiativo terrestre para la ciudad de Huancayo*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/3374/3/IV\\_FIN\\_107\\_TE\\_Pi%C3%B1as\\_Sumalave\\_2017.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/3374/3/IV_FIN_107_TE_Pi%C3%B1as_Sumalave_2017.pdf)
- Portillo, A. K. (2022). *Estudio sobre el transporte de partículas PM<sub>2.5</sub> entre las cuencas atmosféricas de los Valles de México y Toluca durante el proyecto: CCA-PT17*. [Tesis de maestría]. <https://ru.d.unam.mx/bitstream/20/TES0100082/3/0823978.pdf>
- Pörtner, HO, Roberts, DC, Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E. y Weyer, NM (2019). El océano y la criosfera en un clima cambiante. *Informe especial del IPCC sobre el océano y la criosfera en un clima cambiante*, 1155, 10-1017. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2022/03/00\\_SROCC\\_Frontmatter\\_FIN\\_AL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2022/03/00_SROCC_Frontmatter_FIN_AL.pdf)
- Reist, P. (1993) *Ciencia y tecnología de aerosoles*. <https://dspace.enu.kz/bitstream/handle/data/9631/aerosol-science.pdf?sequence=1>
- Rocha Condor, A. G., & Huacho Chavez, J. (2022). Análisis del espesor óptico de aerosol debido a incendios forestales en la amazonia de Perú, Ecuador, Colombia, Brasil y

- Bolivia. *Perfiles*, 1(28), 90-101. [http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S2477-91052022000100090&script=sci\\_arttext](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S2477-91052022000100090&script=sci_arttext)
- S.A. DE C.V. <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- Seco, R. (2010). *Aplicación de un sistema de información geográfica al análisis de los datos de incendios forestales en España*. <https://oa.upm.es/3454/>
- SENAMHI. (2025). *Fenómeno el Niño*. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=fenomeno-el-nino>
- SENAMHI. (2020). *Contaminación del aire*. <https://web2.senamhi.gob.pe/?p=calidad-de-aire-aprendiendo>
- SERFOR. (2018). *Plan de Prevención y Reducción de Riesgos de Incendios Forestales*. <https://www.serfor.gob.pe/portal/wp-content/uploads/2018/12/Plan-de-prevenci%C3%B3n-y-reducci%C3%B3n-de-riesgos-de-incendios-forestales.pdf>
- SINIA. (2017). *Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias*. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-aire-establecen-disposiciones>
- Suárez, L., Castillo, L., Marín, M., Carrillo, G., Rimac, L., Pomalaya, J., & Menacho, R. (2006). Estudio de la variación estacional de ozono troposférico y aerosoles del Perú relacionado a las quemadas de vegetación en la Amazonía. *Mosaico Científico*, 3(3), 36-41. [https://www.researchgate.net/publication/275033085\\_Estudio\\_de\\_la\\_variacion\\_estacional\\_de\\_ozono\\_troposferico\\_y\\_aerosoles\\_del\\_Peru\\_relacionado\\_a\\_las\\_quemas\\_de\\_vegetacion\\_en\\_la\\_Amazonia](https://www.researchgate.net/publication/275033085_Estudio_de_la_variacion_estacional_de_ozono_troposferico_y_aerosoles_del_Peru_relacionado_a_las_quemas_de_vegetacion_en_la_Amazonia)
- Suárez-Salas, L., Álvarez Tolentino, D., Bendejú, 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://revistas.sqperu.org.pe/index.php/revistasqperu/issue/view/20>
- Tamayo, M. (2003). *El proceso de la investigación científica (4ta ed.)*. México, D.F: Editorial Limusa S.A. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/227860/El\\_proceso\\_de\\_la\\_investigacion\\_cientifica\\_Mario\\_Tamayo.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/227860/El_proceso_de_la_investigacion_cientifica_Mario_Tamayo.pdf)
- Tapia, G., & Castillo, M. (2014). Propuesta de diseño de un sistema de torres de detección de incendios forestales: aplicación a la región Metropolitana de Chile central. *Bosque (Valdivia)*, 35(3), 399-412. [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-92002014000300014&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-92002014000300014&script=sci_arttext)

- Trabaud, L. (1992). *Incendios forestales: mecanismos, comportamiento y medio ambiente*. Aubervilliers: selección de Francia. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=11854671>
- UCV. (16 de septiembre 2024). *Incendios forestales en Perú: urgencia de concientizar y prevenir para salvar el futuro ambiental*. <https://www.ucv.edu.pe/noticias/incendios-forestales-en-peru-2024>
- Watson, J. G., & Chow, J. C. (2000). *Reconciling urban fugitive dust emissions inventory and ambient source contribution estimates: Summary of current knowledge and needed research*. <https://www3.epa.gov/ttn/chief/efdocs/fugitivedust.pdf>
- Zamora Fernández, M. D. L. Á., & Azanza Ricardo, J. (2020). Influencia de factores meteorológicos en la generación de incendios en la provincia de las Tunas. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 8(3), 519-534.
- Zárate L.G. (2004). *Estudio de las características físicas y geométricas de la llama en los incendios forestales*. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya], <http://hdl.handle.net/2117/93747>
- Zegarra M. B. (2019) *Determinación de fuentes de emisión de carbono negro mediante el análisis de retrotrayectorias de masas de aire sobre el Nevado Coropuna, Arequipa*. [Tesis pregrado, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa], <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/4021a7f1-d9e0-4db3-94da-fe14beabe21a>
- Zhang, Y., Wang, J., Wu, N., Ouyang, X., Li, G., Cheng, Y., ... & Su, H. (2025). The Contribution of Black Carbon-Containing Particles to PM<sub>2.5</sub>: variability, drivers, and impacts. *Environmental Science & Technology*, 59(10), 5155-5163. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.5c00675>
- Zubieta, R., Ccanchi, Y., Martínez, A., Saavedra, M., Norabuena, E., Alvarez, S., & Ilbay, M. (2023). The role of drought conditions on the recent increase in wildfire occurrence in the high Andean regions of Peru. *International Journal of Wildland Fire*, 32(4), 531-544. <https://www.publish.csiro.au/WF/WF21129>
- Zubieta, R., Prudencio, F., Alarco, G., & Reupo, J. (2019). Ocurrencia de incendios forestales en el Perú durante eventos El Niño. *Boletín Técnico El Niño Instituto Geofísico del Perú*, 6(5). <https://repositorio.igp.gob.pe/items/7450d933-5794-47ba-8bbc-d1099581f664>

## ANEXOS

### Anexo 1. Matriz de consistencia

Formulación del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables, dimensiones e indicadores	Metodología de la investigación
<b>Problema general</b>	<b>Objetivo general</b>	<b>Hipótesis general</b>		
¿Cuál es la relación entre el comportamiento del carbono negro, PM <sub>2.5</sub> y los incendios forestales en el periodo de estiaje en Chanchamayo, 2023?	Evaluar la relación entre el comportamiento del carbono negro, PM <sub>2.5</sub> y los incendios forestales en el periodo de estiaje en Chanchamayo, 2023		<b>V1:</b> Carbono negro  <b>Indicadores:</b> *Concentración de carbono en la atmósfera *Porcentaje de aporte de Fuentes locales y externas de emisión de carbono negro	<b>Nivel de investigación:</b> Descriptivo <b>Tipo de investigación:</b> Básico <b>Diseño de investigación:</b> No experimental longitudinal
<b>Problemas específicos</b>	<b>Objetivos específicos</b>		<b>V2:</b> material particulado fino (PM <sub>2.5</sub> )  <b>Indicadores:</b> *Concentración del PM <sub>2.5</sub> en la Merced <b>V3:</b> Incendios Forestales  <b>Indicadores:</b> *Frecuencia de focos de calor en el periodo de estiaje	<b>Población y muestra:</b> <b>Población:</b> Constituida por el carbono negro y los incendios forestales presentes en la Merced. <b>Muestra:</b> No probabilístico; se tomarán datos como unidad de análisis del equipo ObservAir que monitorea partículas de carbono negro presentes en el aire durante el periodo de estiaje. <b>Técnicas e instrumentos de recolección de datos:</b> <b>-Carbono negro:</b> Se evaluó mediante el sensor ObservAir mediante la técnica espectroscopia <b>-Focos de incendios:</b> Se analizó los focos de incendios a través de la plataforma web FIRMS que a través de los satélites MODIS Y VIIRS miden la radiación infrarroja emitida por los incendios. <b>Análisis de datos:</b> <b>-Carbono negro:</b> Microsoft Excel y Software R <b>-Focos de incendios:</b> Microsoft Excel y QGIS
1.- ¿Cuál es la variabilidad del carbono negro en Chanchamayo? 2.- ¿Cuál es la fluctuación del PM <sub>2.5</sub> en el periodo de estiaje en Chanchamayo? 3.- ¿Cuál es la variabilidad de los incendios forestales en periodo de estiaje en Chanchamayo? 4.- ¿Cuál es la correlación entre el comportamiento del carbono negro, PM <sub>2.5</sub> e incendios forestales? 5.- ¿Cuál es el porcentaje de aporte de las fuentes locales y externas del carbono negro durante el periodo de estiaje?	1.- Analizar la variabilidad del carbono negro en Chanchamayo. 2.- Describir la fluctuación del PM <sub>2.5</sub> en el periodo de estiaje en La Merced. 3.- Determinar la frecuencia del número de incendios en Chanchamayo. 4.- Determinar la correlación entre el comportamiento del carbono negro, PM <sub>2.5</sub> e incendios forestales. 5.- Estimar el porcentaje de aporte de las fuentes locales y externas del carbono negro.	Existe una relación directa significativa entre el comportamiento del carbono negro, PM <sub>2.5</sub> y los focos de incendios forestales, donde la presencia de carbono negro está asociada con un aumento en la frecuencia y la intensidad de los incendios forestales.		

**Anexo 2.** *Sensor de carbono negro instalado en la escuela profesional de Ingeniería Civil-UNISCJSA*



**Anexo 3.** *Sensor de Purple Air Instalado en el fundo Santa Isabel-La Merced*





