



La investigación, su esencia y arte.

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y AMBIENTAL
TESIS

**“EFECTO DEL MATERIAL PARTICULADO SOBRE LA
TEMPERATURA DEL AIRE EN EL DISTRITO DE AHUAYCHA, 2024”**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Forestal y Ambiental

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Seguridad Ambiental y adaptación al cambio climático.

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE:

Acción por el clima.

CAMPO DE LA INVESTIGACIÓN Y EL DESARROLLO OCDE:

1.05.00-Ciencias de la Tierra y Ciencias Ambientales.

PRESENTADO POR:

Bach. CHAVEZ DE LA TORRE, Merly Yadira

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

Bach. ORELLANA REYES, Diana Estrella

(ORCID: [0000-0002-2078-6392](https://orcid.org/0000-0002-2078-6392))

ASESOR:

Dr. JULIO MIGUEL ÁNGELES SUAZO

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

Pampas - Perú

2025

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

Expediente N° 3-2025-UNAT/FI-EPIFA

Página 1 de 1

En esta acta, se hace constar que en el auditorium de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja "Daniel Hernández Morillo", ubicado en el distrito de Ahuaycha, provincia de Tayacaja, departamento Huancavelica, el día **08 de mayo del 2025**, a las **10:00** horas, se reunieron los miembros del Jurado Calificador designados con Resolución de Vicepresidencia Académica N° 003-2024-UNAT/CO-VPA de 03 de julio del 2024, con el propósito de llevar a cabo el **Acto de Sustentación** de la tesis de Titulación Profesional:

"EFECTO DEL MATERIAL PARTICULADO SOBRE LA TEMPERATURA DEL AIRE EN EL DISTRITO DE AHUAYCHA, 2024"

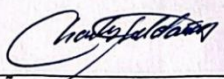

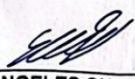
Dicha tesis ha sido presentada por las Bachilleres en Ingeniería Forestal y Ambiental **CHAVEZ DE LA TORRE MERLY YADIRA** y **ORELLANA REYES DIANA ESTRELLA** y asesorado por el docente Dr. ANGELES SUAZO JULIO MIGUEL adscrito al Departamento Académico de Ingeniería Forestal y Ambiental.

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

En consecuencia, el sustentante:

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

Siendo las 11:20 horas del mismo día, mes y año, se da por concluido el Acto de Sustentación, firmando a continuación los intervinientes, en señal de conformidad de lo acontecido y consignado.

	
Dr. SALDAÑA CHAFLOQUE CHARLES FRANK Presidente	Dra. CHAVARRIA MARQUEZ ESMILA YEIME Miembro
	
Dr. ANGELES SUAZO JULIO MIGUEL Asesor	

UNAT

Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo

"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

Ley de Creación N° 29716



CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 004-2025

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

HACE CONSTAR:

Que la tesis titulada: "EFECTO DEL MATERIAL PARTICULADO SOBRE LA TEMPERATURA DEL AIRE EN EL DISTRITO DE AHUAYCHA, 2024", desarrollado por los bachilleres de la Escuela profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental CHAVEZ DE LA TORRE MERLY YADIRA y ORELLANA REYES DIANA ESTRELLA, asesorado por el DR. JULIO MIGUEL ÁNGELES SUAZO, cumple con los requisitos de conformidad de originalidad mediante (*software Anti plagio Turnitin*), evidenciándose en el informe de originalidad un porcentaje de similitud de dieciocho (18%) el cual se encuentra dentro del parámetro establecido por la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo.

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

Pampas, 23 de mayo de 2025



Dr. Gino Paul Prieto Rosales
Director de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería

AGRADECIMIENTO

Queremos dedicar este espacio para expresar nuestra más sincera gratitud a todas las personas que nos acompañaron y apoyaron a lo largo de este proceso. En primer lugar, agradecemos a nuestras familias, por su paciencia, comprensión y amor incondicional. Gracias por ser nuestro pilar y motivación, brindándonos fuerzas cuando las cosas parecían complicarse.

A nuestro asesor de tesis, Julio Miguel Ángeles Suazo, le extendemos un agradecimiento especial por su constante orientación, apoyo y sabios consejos. Su experiencia y sugerencias fueron esenciales para que este trabajo alcanzara el nivel que tiene hoy.

Finalmente, queremos agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo por el proyecto de investigación FOCAM denominado “Calidad de aire por material particulado y su efecto en el balance de energía en Pampas/Tayacaja 2023-2025” aprobado con Resolución de comisión organizadora N° 295- 2023-CO-UNAT; por brindarme su apoyo para el desarrollo de esta investigación y estos resultados fueron posibles.

DEDICATORIA

La investigación va dedicada a mi querida madre Gloria, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios. Gracias por siempre creer en mí y por darme la fuerza para seguir adelante en cada paso de mi vida. A mis hermanos, Kiara, Alex, Luis, Guadalupe y mi hermosa sobrina Keysi, por su complicidad y por ser mi motivación diaria. Esta tesis es el resultado de todo lo que me han enseñado y el amor que me han brindado.

Diana Orellana.

La investigación va dedicada a mis queridos padres, Roberto y Dionicia, cuyo amor, paciencia y esfuerzo han sido mi mayor fuente de inspiración. Gracias por siempre estar para mí y darme fuerza para seguir adelante en cada paso de mi vida. A mis hermanos, Azumi y Ailan, por ser mi apoyo inquebrantable y por compartir siempre sus risas y consejos. Este logro es tanto mío como suyo, porque sin ustedes, no hubiera sido posible.

Merly Chavez.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTO	4
DEDICATORIA	5
TABLA DE CONTENIDO.....	6
ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE FIGURAS	10
RESUMEN.....	15
ABSTRACT	16
I.INTRODUCCIÓN	17
1.1. Planteamiento del problema	19
1.2. Formulación del problema	21
1.2.1. Problema general	21
1.2.2. Problemas específicos.....	21
1.3. Justificación e importancia.....	21
1.3.1. Objetivo general	22
1.3.2. Objetivos específicos	22
1.4. Formulación de hipótesis	23
1.4.1. Hipótesis general	23
1.4.2. Hipótesis específicas.....	23
II.MARCO TEÓRICO.....	24
2.1. Antecedentes	24
2.1.1. Antecedentes internacionales	24
2.1.2. Antecedentes nacionales	30
2.1.3. Antecedentes regionales.....	33
2.2. Bases teóricas y conceptuales.....	36
2.2.1.1. La atmósfera.....	36
2.2.1.1.1.Niveles de la atmósfera.....	36

2.2.1.2.	Contaminación atmosférica.....	37
2.2.1.3.	Repercusiones en el bienestar humano y en el ecosistema	38
2.2.1.4.	Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire	39
2.2.1.5.	Material particulado.....	39
2.2.1.6.	Aerosoles atmosféricos	40
2.2.1.7.	Repercusiones del material particulado en la salud.....	52
2.2.1.8.	Repercusiones del material particulado en el ambiente	53
2.2.1.9.	Efecto del material particulado en la temperatura	53
2.2.2.1.	Atmósfera	56
2.2.2.2.	Contaminación del aire	56
2.2.2.3.	Material particulado.....	57
2.2.2.4.	Material particulado (PM 2.5)	58
2.2.2.5.	Material particulado (PM 10).....	59
2.2.2.6.	Temperatura	60
2.2.2.7.	Estándares de Calidad Ambiental - ECA	60
2.3.	Base legal.....	60
2.3.1.1.	Ley General del Ambiente (Ley N°28611)- Decreto Supremo N° 002-2009-MINAM	60
2.3.1.2.	“Decreto Supremo N° 010-2019-MINAM, Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire”	61
III.	METODOLOGÍA.....	61
3.1.	Tipo de investigación.....	61
3.2.	Nivel de investigación	62
3.3.	Método de investigación.....	62
3.4.	Diseño de investigación	62
3.5.	Población, muestra y muestreo	63
3.5.1.	Población	63
3.5.2.	Muestra.....	64

3.5.3. Muestreo	64
3.6. Identificación y operacionalización de variables	64
3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	67
3.7.1. Técnicas	67
3.7.2. Instrumentos.....	68
3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	70
3.8.1. Trabajo en gabinete	70
3.8.2. Análisis de datos.....	70
3.9. Aspectos éticos y regulatorios	70
IV.RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
4.1. Resultados.....	71
4.2. Discusión	133
V.CONCLUSIONES.....	136
VI.RECOMENDACIONES.....	138
VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
VIII.ANEXOS	146
8.1. Matriz de consistencia	146
8.2. Panel fotográfico	149

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.....	39
<i>Estándares de Calidad Ambiental del Aire para PM10 y PM2.5</i>	39
Tabla 2.....	65
<i>Matriz de Operacionalización de las variables</i>	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	42
<i>Oxidación de los precursores (aerosoles)</i>	42
Figura 2	43
<i>El diámetro aerodinámico de una partícula</i>	43
Figura 3	45
<i>Absorción de luz</i>	45
Figura 4	46
<i>Dispersión de Rayleigh</i>	46
Figura 5	47
<i>Dispersión de Mie</i>	47
Figura 6	48
<i>Óptica geométrica</i>	48
Figura 7	50
<i>Interacciones entre aerosoles, radiación y nubes de aerosoles</i>	50
Figura 8	51
<i>Evaluación de los efectos de los contaminantes atmosféricos en el clima</i>	51
Figura 9	52
<i>Áreas donde se depositan las partículas en suspensión en el cuerpo humano</i>	52
Figura 10	53
<i>Emisiones biogénicas del bosque y de las industrias hacia la atmósfera</i>	53
Figura 11	58
<i>Análisis del diámetro aerodinámico de la partícula</i>	58
Figura 12	59
<i>Capacidad de que fragmentos de material particulado ingresen al sistema respiratorio</i>	59
Figura 13	63
<i>Mapa del distrito de Ahuaycha cambiar mapa</i>	63

Figura 14	69
<i>Estación meteorológica de marca Lufft- WS601-UMB</i>	69
Figura 15	69
<i>Medidor de material particulado Profiler Model 212</i>	69
Figura 16	72
<i>Relación entre el material particulado (PM10) y la temperatura (C°) en el mes de mayo-septiembre, 2024</i>	72
Figura 17	74
<i>Relación entre el material particulado (PM2) y la temperatura (C°) en el mes de mayo-septiembre, 2024</i>	74
Figura 18	75
<i>Variación diaria del material particulado (PM10) de mayo-septiembre, 2024</i>	75
Figura 19	77
<i>Variación diaria del material particulado (PM2) de mayo-septiembre, 2024</i>	77
Figura 20	78
<i>Variación diaria de la temperatura de mayo-septiembre, 2024</i>	78
Figura 21	79
<i>Variación diaria de la humedad de mayo-septiembre, 2024</i>	79
Figura 22	81
<i>Variación horaria del material particulado (PM10) del mes de mayo-septiembre, 2024</i>	81
Figura 23	83
<i>Variación horaria de material particulado (PM2) del mes de mayo-septiembre, 2024</i>	83
Figura 24	85
<i>Variación horaria de la temperatura del mes de mayo-septiembre, 2024</i>	85
Figura 25	87
<i>Variación horaria de la humedad del mes de mayo-septiembre, 2024</i>	87
Figura 26	88
<i>Análisis clúster del material particulado (PM10) de mayo a septiembre, 2024</i>	88

Figura 27	89
<i>Análisis clúster del material particulado (PM2) de mayo a septiembre, 2024</i>	<i>89</i>
Figura 28	91
<i>Análisis clúster de la temperatura de mayo a septiembre, 2024.....</i>	<i>91</i>
Figura 29	93
<i>Análisis clúster de la humedad de mayo a septiembre, 2024</i>	<i>93</i>
Figura 30	95
<i>Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM10) de mayo, 2024</i>	<i>95</i>
Figura 31	97
<i>Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM2) de mayo, 2024</i>	<i>97</i>
Figura 32	99
<i>Análisis clúster de la variación horaria de la temperatura de mayo, 2024.....</i>	<i>99</i>
Figura 33	101
<i>Análisis clúster de la variación horaria de la humedad de mayo, 2024.....</i>	<i>101</i>
Figura 34	103
<i>Análisis clúster del material particulado (PM10) de junio, 2024.....</i>	<i>103</i>
Figura 35	105
<i>Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM2) de junio, 2024.....</i>	<i>105</i>
Figura 36	107
<i>Análisis clúster de la variación horaria de la temperatura de junio, 2024</i>	<i>107</i>
Figura 37	109
<i>Análisis clúster de la variación horaria de la humedad de junio, 2024.....</i>	<i>109</i>
Figura 38	111
<i>Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM10) de julio, 2024.....</i>	<i>111</i>
Figura 39	113
<i>Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM2) de julio, 2024</i>	<i>113</i>
Figura 40	115

<i>Análisis clúster de la variación horaria de la temperatura de julio, 2024</i>	115
Figura 41	117
<i>Análisis clúster de la variación horaria de la humedad de julio, 2024</i>	117
Figura 42	119
<i>Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM10) de agosto, 2024</i> .	119
Figura 43	120
<i>Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM2) de agosto, 2024</i> ...	120
Figura 44	122
<i>Análisis clúster de la variación horaria de la temperatura de agosto, 2024</i>	122
Figura 45	124
<i>Análisis clúster de la variación horaria de la humedad de agosto, 2024</i>	124
Figura 46	126
<i>Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM10) de septiembre, 2024</i>	126
Figura 47	128
<i>Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM2) de septiembre, 2024</i>	128
Figura 48	130
<i>Análisis clúster de la variación horaria de la temperatura de septiembre, 2024</i>	130
Figura 49	132
<i>Análisis clúster de la variación horaria de la humedad de septiembre, 2024</i>	132
Figura 50	149
<i>Instalación de la estación meteorológica de marca Lufft- WS601-UMB</i>	149
Figura 51	149
<i>Instalación del medidor de material particulado Profiler Model 212</i>	149
Figura 52	150
<i>Recolección de datos del sensor de temperatura y material particulado</i>	150
Figura 53	150

<i>Procesamiento de datos</i>	150
Figura 54	151
<i>Presencia del parque automotor</i>	151
Figura 55	151
<i>Foto con los dos equipos utilizados para la investigación</i>	151

RESUMEN

La acumulación de material particulado, resultado de actividades humanas y naturales, puede alterar las condiciones ambientales, mientras que la temperatura influye en los patrones térmicos. **Objetivo:** Determinar la influencia del material particulado (PM2 y PM10) y la humedad sobre la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024. **Metodología:** La investigación es de tipo aplicado, nivel descriptivo, con un diseño no experimental, centrado en analizar la relación entre el material particulado (PM2 y PM10) y la temperatura durante mayo-septiembre 2024. **Resultados:** El análisis de la relación entre el material particulado, la humedad y la temperatura reveló variaciones significativas según las condiciones locales. Para PM10, los coeficientes de determinación (R^2) variaron entre 0.22 y 0.28, indicando una relación débil con la temperatura en la mayoría de los meses, pero una correlación extremadamente fuerte en septiembre ($R^2 = 0.99$). La humedad mostró un comportamiento inverso, con una disminución de la temperatura en condiciones de alta humedad, especialmente durante la mañana y la tarde. Para PM2, los coeficientes de determinación oscilaron entre 0.22 y 0.32, con una relación débil con la temperatura, aunque la humedad aumentó ligeramente la retención de calor en ciertos períodos del día. En general, se registraron concentraciones más altas de PM2 y PM10 y mayor humedad en las primeras horas del día y al anochecer. **Conclusiones:** El material particulado PM10 mostró una fuerte influencia sobre la temperatura en septiembre, especialmente bajo condiciones de alta radiación solar y baja humedad, mientras que el PM2 tuvo impactos más complejos.

Palabras claves: Material particulado, temperatura, aire y humedad.

ABSTRACT

The accumulation of particulate matter, resulting from human and natural activities, can alter environmental conditions, while temperature influences thermal patterns. Objective: To determine the influence of particulate matter (PM₂ and PM₁₀) and humidity on air temperature in the district of Ahuaycha in 2024. Methodology: This research is applied, descriptive in nature, with a non-experimental design focused on analyzing the relationship between particulate matter (PM₂ and PM₁₀) and temperature from May to September 2024. Results: The analysis of the relationship between particulate matter, humidity, and temperature revealed significant variations based on local conditions. For PM₁₀, the coefficients of determination (R^2) ranged from 0.22 to 0.28, indicating a weak relationship with temperature in most months, but an extremely strong correlation in September ($R^2 = 0.99$). Humidity exhibited an inverse behavior, with a decrease in temperature under high humidity conditions, especially in the morning and afternoon. For PM₂, the coefficients of determination ranged from 0.22 to 0.32, showing a weak relationship with temperature, although humidity slightly increased heat retention during certain times of the day. Overall, higher concentrations of PM₂ and PM₁₀, along with greater humidity, were recorded in the early hours of the day and at dusk. Conclusions: PM₁₀ showed a strong influence on temperature in September, particularly under conditions of high solar radiation and low humidity, while PM₂ had more complex impacts.

Keys words: Particulate matter, temperature, air, and humidity.

I. INTRODUCCIÓN

La variedad de contaminantes presentes en la atmósfera repercute tanto en el medio ambiente como en la salud humana, el material particulado (PM) es el más importante de estos contaminantes. Estas partículas pueden ser emitidas directamente a la atmósfera (primarias) o formarse a través de reacciones químicas (secundarias) (Cuadros, 2021).

La contaminación por partículas se clasifica en PM₁₀ (partículas inhalables de hasta 10 micrómetros de diámetro) y PM_{2,5} (partículas finas de hasta 2,5 micrómetros de diámetro). Las PM₁₀ pueden penetrar y acumularse en diferentes partes del tracto respiratorio, mientras que el PM_{2.5}, conocidas como partículas respirables, pueden llegar a las zonas más profundas de los pulmones, incluyendo los bronquiolos y la región alveolar (Chiarvetto et al., 2008).

La dispersión de partículas (PM_{2.5} y PM₁₀) perjudiciales está fuertemente influenciada por la velocidad del viento y la humedad relativa, y estos elementos tienen un impacto considerable en el clima, la química atmosférica, la biosfera y la salud humana. Además, afectan la formación de nubes, el ciclo del agua, la circulación atmosférica, diversas reacciones químicas en la atmósfera, la distribución y abundancia de gases, incluidos los gases de efecto invernadero y otras especies gaseosas altamente reactivas (Flores et al., 2023).

Además de alterar las propiedades de los materiales, las partículas repercuten en los ecosistemas acuáticos, el suelo y la vegetación. Las partículas más pequeñas pueden entrar en el sistema circulatorio o llegar al cerebro a través de los nervios olfativos, en general, las partículas más grandes se filtran durante la inhalación. Sin embargo, estos efectos más graves dependen de la estructura, concentración numérica, solubilidad y composición química de las partículas. Por ello, las partículas se consideran contaminantes atmosféricos y existen leyes que regulan la concentración de cada tamaño de partícula (López, 2020).

Una de las posibles soluciones a esta situación es gestionar eficazmente los resultados de esta investigación; por ejemplo, se puede tener en cuenta cuándo las condiciones meteorológicas favorecen la dispersión de partículas y otros contaminantes (Quijano et al., 2010).

Esta investigación examinó cómo el material particulado de 2 μ m y 10 μ m afectarían la temperatura atmosférica en el distrito de Ahuaycha en los meses de mayo a septiembre del año 2024, este estudio se llevó a cabo como estrategia inicial o exploratoria de metodología científica para obtener información precisa y fiable sobre la contaminación presente en la

zona. Para lograr este objetivo, de acuerdo a la RM N°181-2016-MINAM, se realizaron ensayos específicos, se analizaron las concentraciones de partículas y se determinaron ciertos índices de calidad del aire.

En la primera sección se aborda la identificación del problema, su formulación, las razones justificativas, los propósitos y las suposiciones. La segunda parte está dedicada al contexto de la investigación y a las bases teóricas y conceptuales que se reflejan en el modelo teórico. La tercera sección detalla el enfoque metodológico que se ha empleado, mientras que la cuarta expone los resultados, discusión y las conclusiones.

1.1. Planteamiento del problema

En los últimos años se ha producido una catástrofe aterradora para el planeta, y una de las amenazas más graves para la salud humana es la contaminación atmosférica. Alrededor de 259.000 muertes prematuras se atribuyen a la contaminación atmosférica, y el 88% de mortalidad se producen en países de bajos ingresos, según las organizaciones Organización Mundial de la Salud (OMS) y Organización Panamericana de la Salud (OPS) (Amoretti, 2021).

La contaminación del aire es un agravio capaz de causar daños en los ámbitos social, psicológico, económico y ambiental. Aunque los estudios indican una disminución global en los niveles de contaminantes atmosférica, el comportamiento de los contaminantes depende de la ubicación, y muchos sitios en todo el mundo muestran una tendencia al aumento de los contaminantes (Brum et al., 2024).

Uno de los orígenes del cambio climático es la contaminación atmosférica; otros parámetros climáticos incontrolados son la temperatura y la humedad. Por lo tanto, el material particulado (PM10) tienen un mayor impacto en la salud humana porque aumentan la mortalidad. Así pues, la relación entre los contaminantes atmosféricos y los parámetros climáticos ha atraído la atención en el contexto del cambio climático.

El material particulado, uno de los contaminantes atmosféricos más peligrosos, se componen de partículas finas (PM_{2,5}) con un diámetro inferior a 2,5 μm y partículas gruesas (PM₁₀) con un diámetro inferior a 10 μm . Asimismo, debido a su efecto de radiación térmica, también afectan directamente al clima, así, la capacidad del material particulado de absorber y dispersar la luz puede provocar fenómenos de enfriamiento o calentamiento atmosférico. Más allá de estos impactos directos, el material particulado ejerce efectos indirectos sobre el clima al alterar las propiedades físicas y radiactivas de las nubes. Estas perturbaciones pueden alterar los regímenes de precipitaciones y la formación de nubes, aumentando la dinámica climática (Lin et al., 2023).

Las partículas en suspensión (PM₁₀) son una combinación heterogénea de sustancias químicas y partículas de tamaño inferior a 10 μm a las que están expuestas regularmente las personas. Estos individuos son extremadamente sensibles a los cambios climáticos, caracterizados por cambios en la temperatura y la humedad relativa de la atmósfera (Amoretti, 2021). Por lo cual las partículas

(PM_{2,5}) pueden proceder de causas naturales, como la erosión y sedimentación del suelo, los incendios forestales y materiales biológicos (el polen, las bacterias y los residuos vegetales, etc.).

Estudios observacionales y de simulación han demostrado que las medidas de control y prevención de la contaminación atmosférica han reducido las concentraciones de PM_{2,5}, PM₁₀, dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de nitrógeno (NO₂) en un 22%, 21%, 53% y 5% de 2015 a 2019. Sin embargo, una investigación exhaustiva encontró que entre el 2015 y 2019, en 337 ciudades importantes de China, las concentraciones de ozono (O₃) aumentaron un 20,15 %. Además, debido a la importante disminución del tráfico de vehículos de motor y de los niveles de actividad industrial (Lin et al., 2023).

La temperatura, la humedad relativa (HR), la velocidad del viento (V), la precipitación (P) y la estabilidad atmosférica son algunos de los parámetros meteorológicos que pueden afectar significativamente al aumento o disminución de la concentración de masa del material particulado. La distribución del PM en la atmósfera tiene una implicación importante para el cambio climático, por eso es fundamental estudiar los parámetros meteorológicos en estudios relacionados a ello (Zeb et al., 2024).

El material particulado es sensible a la temperatura durante todas las estaciones, ya que incluye efectos sobre la partición de partículas de gas y la fotoquímica, los dos factores principales que influyen en el movimiento del aire y que repercuten en las partículas son la dirección y la velocidad del viento (V). La precipitación puede eliminar el material particulado y reducirla la distribución de la contaminación atmosférica, así como los cambios en las escalas temporales diurnas y estacionales, se ven afectados por la humedad relativa (HR). Los estudios informan que las concentraciones de PM son altas, durante condiciones meteorológicas estables marcadas por alturas bajas de la capa límite y baja velocidad del viento (Zeb et al., 2024).

Algunos estudios han demostrado que la interacción entre la temperatura y la contaminación del aire tiene efectos adversos sobre la salud; y que el cambio climático modificará las concentraciones y la dinámica de los contaminantes atmosféricos. Por lo tanto, es necesario explorar la interacción entre la temperatura ambiente y los contaminantes atmosféricos para el desarrollo de

alternativas que ayuden a minimizar el impacto negativo que ocasionarían al ambiente (Wang et al., 2023).

En el caso de Perú, si bien no es un emisor importante de gas en comparación con otros países, sí es vulnerable al cambio climático severo, lo que provoca una frecuencia normal de lluvias y, a su vez, inundaciones posteriores de corta duración, pero intensas (Chavez, 2023). Por otro lado, las heladas y la excesiva radiación solar alteran el funcionamiento del ecosistema.

De igual forma, en el 2021 el Perú se encontró en el puesto 33 en el ranking de países más contaminados del mundo, mientras que Lima ocupó el puesto 15 en América del Sur con una concentración promedio anual de PM10 de $19,7 \mu/m^3$, poniendo a sus habitantes en riesgo de sufrir diversas enfermedades cerebrovasculares, respiratorias y neoplásicas (Warren, 2018).

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

- ✓ ¿Cuál es la influencia del material particulado de $2\mu m$ y $10\mu m$ sobre la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024?

1.2.2. Problemas específicos

- ✓ ¿Cuál es la variabilidad temporal del material particulado de $2\mu m$ y $10\mu m$ sobre la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024?
- ✓ ¿Cuál es la variabilidad temporal de la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024?
- ✓ ¿Cuál es la relación entre material particulado y temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024?

1.3. Justificación e importancia

Con esta investigación pretendemos impulsar la responsabilidad ante cuestiones ambientales al igual que intensificar las actitudes y la conciencia ambiental, de forma que las medidas preventivas o actividades puedan disminuir la contaminación atmosférica.

Dado que el cambio climático y la contaminación atmosférica son cuestiones sociales y ambientales de creciente importancia en los últimos años, es importante reconocer el papel esencial de los factores meteorológicos y comprender el comportamiento de variables como la temperatura y su relación con el cambio

climático. Los resultados de este estudio permitirán a los ciudadanos e instituciones desarrollar estrategias para reducir la acumulación de partículas (PM10 y PM2), encontradas en el distrito de Ahuaycha para generar conciencia ambiental y promover medidas preventivas (Rojano et al., 2013).

La estabilidad atmosférica afecta a la dispersión y transmisión de los contaminantes atmosféricos debido a la naturaleza errática del medio ambiente. A lo largo del día, el aire cercano a la superficie terrestre suele ser más ligero y cálido que el aire de la atmósfera superior debido a la absorción de la radiación solar. Al ascender desde la superficie, el aire más ligero y cálido se combina con el aire más pesado y frío de la atmósfera superior, esto hace que el aire descienda. Este movimiento constante puede propagar el aire contaminado y crear condiciones inseguras; cuando hay poca o ninguna mezcla vertical, los contaminantes permanecen en el fondo y se producen mayores concentraciones (Ordoñez et al., 2018).

La velocidad del viento tiene el mayor impacto en la concentración de contaminantes; al igual que la temperatura ya que esta provoca la generación de viento a través de la presión atmosférica. Esto ocurre porque el aire frío es más denso que el aire caliente, creando áreas de alta presión (Querol, 2018).

La emisión de contaminantes atmosféricos en el distrito de Ahuaycha no ha sido estudiada a fondo en lo que concierne a su dinámica, en vista de que la determinación del nivel de partículas en la atmósfera es uno de las variables más importantes que controlan la calidad del aire, como consecuencia de sus efectos negativos sobre la vitalidad de las personas, el clima y la biodiversidad (Sotta, 2018).

1.3.1. Objetivo general

- ✓ Determinar la influencia del material particulado de 2 μ m y 10 μ m sobre la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024.

1.3.2. Objetivos específicos

- ✓ Determinar la variabilidad temporal del material particulado de 2 μ m y 10 μ m sobre la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024.
- ✓ Determinar la variabilidad temporal de la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024.

- ✓ Determinar la relación entre material particulado y temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024.

1.4. Formulación de hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

- ✓ Existe una alta influencia del material particulado de 2 μ m y 10 μ m sobre la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024.

1.4.2. Hipótesis específicas

- ✓ Existe variabilidad temporal del material particulado de 2 μ m y 10 μ m sobre la temperatura en el Distrito de Ahuaycha, 2024.
- ✓ Existe variabilidad temporal de la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024.
- ✓ Existe relación positiva entre material particulado y temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Arslan & Toltar, (2024) realizaron una investigación, en el que se estudió la relación espaciotemporal entre las concentraciones de PM 2,5 y PM 10 y los parámetros meteorológicos entre 2014 y 2020 en los distritos de Silivri y Ümraniye de Estambul. Para ello, se examinaron dos estaciones de evaluación de la calidad del aire y datos meteorológicos (velocidad y dirección del viento, precipitaciones, humedad relativa y temperatura) para los valores horarios de concentración de PM 2.5 y PM 10. La acumulación de PM fue más baja a las 06:00 hora local (LT), PM 2.5 y el PM 10 tiene valores máximos alrededor de las 09:00 y 19:00 LT tanto en Silivri como en Ümraniye, principalmente debido a actividades antropogénicas como los gases de los vehículos. emisiones. En perspectiva diaria, los valores más altos de PM se observaron los domingos de invierno en Silivri. Por otro lado, los valores máximos de material particulado se muestran los viernes en Ümraniye. Se descubrió que las fuentes de emisión locales durante vientos de baja velocidad causan las concentraciones más altas de PM 2.5 durante los meses de invierno y los vientos del sur que superan los 8 m/s aumentan los niveles de PM 10 en Silivri y Ümraniye. El análisis estadístico reveló que las concentraciones de PM 2.5 en Silivri y PM 10 tenían una correlación negativa con la velocidad del viento; en invierno, los coeficientes de correlación son de -0,56, mientras que en otoño es -0,47. La velocidad del viento está asociada negativamente con PM 2.5 ($r=-0,48$) y PM 10 ($r=-0,38$) en la temporada de invierno en Ümraniye. Además de esto, la humedad relativa mostró una relación negativa con las PM10 ($r=-0,43$) en primavera en Silivri, mientras que se encontró una correlación positiva entre las PM 10 ($r=0,40$) y las PM 2.5 ($r=0,38$) medidas en la temporada de verano. y la temperatura máxima. Además de los factores antropogénicos (por ejemplo, urbanización, transporte e industrialización) que disminuyen la calidad del aire de Estambul, los

parámetros meteorológicos locales y el transporte de la contaminación atmosférica son otros factores que contribuyen a la contaminación atmosférica.

Yan et al., (2023) en su estudio, mostraron que la mayor parte de las emisiones de material particulado generadas durante los proyectos de construcción se liberan significativamente durante las etapas de movimiento de tierras y cimientos. Para reducir y controlar estas emisiones es necesario disponer de datos fiables sobre sus características. Sin embargo, el material particulado de la construcción está mal caracterizadas porque su composición y depende de varios factores (por ejemplo, clima y medidas de reducción) y diversas actividades en el sitio cuyos efectos pueden interactuar. Para abordar estos desafíos, se realizó un estudio empírico cuantitativo a largo plazo utilizando métodos estadísticos avanzados en un proyecto de construcción real durante todas las etapas de movimiento de tierras y cimentación. Se utilizó el método contra el viento y a favor del viento para recopilar datos sobre las emisiones de PM durante todo el proceso de construcción de cimientos y movimiento de tierras, se utilizó análisis de correlación, prueba t de muestras pareadas y regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) para analizar las emisiones de las partículas en suspensión total (TSP), PM 10 y PM 2.5 y sus relaciones con diversos factores que influyen. Los resultados mostraron que tanto los movimientos de tierras como las construcciones de cimientos generan emisiones sustanciales de PM porque hubo diferencias con significancia estadística en los niveles de material particulado medidos a favor del viento y a favor del viento del sitio de construcción. Las emisiones de TSP y PM 10 se correlacionaron moderadamente con la humedad y la velocidad del viento. Sin embargo, la temperatura y la presión atmosférica no se correlacionaron significativamente con ninguna de las emisiones medidas. Las actividades principales responsables de las emisiones de PM durante las etapas de movimiento de tierras y construcción de cimientos fueron el apilamiento de martillos, el apilamiento de desechos y el transporte de materiales. Se descubrió que la pulverización de agua reducía eficazmente las emisiones de TSP y

PM 10, mientras que el uso de un cañón de niebla reducía más eficazmente las emisiones de PM 2.5. Asimismo, las partículas de construcción son una fuente importante de contaminación atmosférica en las ciudades, los hallazgos presentados en este documento proporcionan la piedra angular y el conocimiento para guiar los esfuerzos para reducir su impacto.

Enshaey et al., (2023) elaboraron un estudio donde el objetivo fue evaluar la caracterización, el análisis de proporciones y la evaluación del riesgo cancerígeno de compuestos de hidrocarburos aromáticos policíclicos limitados a PM 10 en el suroeste de Irán, donde se realizó 4 estaciones. En cada región, el dispositivo OMNI recolectó 20 muestras de aire y un total de 40 muestras en dos regiones. Según los resultados de este estudio, en la estación fría la concentración total promedio de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) fue mayor que en la estación cálida. El antraceno y el flúor con 4,70 y 4,25 ng/m³ en la estación fría y el naftaleno y el antraceno con 4,07 y 3,48 ng/m³ en la estación cálida fueron las concentraciones medias más altas entre otros compuestos orgánicos. Los resultados de los índices de diagnóstico también indicaron que el uso de combustibles fósiles y el uso de coches de gasolina son las principales fuentes de HAP en el aire de la ciudad de Shushtar. Los resultados mostraron que la cantidad media de HAP es mayor en la estación fría que en la cálida, y los efectos de la temperatura pueden empeorar estos contaminantes. Teniendo en cuenta que los HAP se producen principalmente como resultado del uso de combustibles fósiles y del transporte, es necesario prestar más atención a estos contaminantes y controlar las fuentes de su emisión. También es necesario crear una cultura en la sociedad para incrementar el uso del transporte público.

Kermani et al., (2022) es su estudio su objetivo fue identificar la concentración de partículas PM 2.5 y el efecto de los parámetros meteorológicos en 14 puntos seleccionados de la metrópoli de Ahvaz. El muestreo de PM2.5 se realizó en cuatro temporadas (invierno,

primavera, verano y otoño). El muestreo se realizó utilizando la guía del método TO-13A (EPA/TO-13A) de la Agencia de Protección Ambiental. Las muestras de partículas se recogieron en un filtro de fibra de vidrio con un tamaño de poro de 1 μm y un diámetro de 37 mm, asimismo, el equipo PHB-318 registró información sobre parámetros meteorológicos y finalmente, los datos obtenidos fueron analizados por SPSS. Se evidencian que la concentración de partículas PM 2.5 en la metrópoli de Ahvaz durante el período de estudio es 14 veces mayor que el valor que establece la Organización Mundial de la Salud (OMS). Además, la temperatura tuvo una relación perjudicial, a comparación de la presión y la humedad relativa, ya que tuvieron una relación directa y positiva con la concentración de partículas PM 2.5. Se encontró que las estaciones Zargan, Padadshahr 1 y 2, Saadi y 17 Shahrivar son los puntos más contaminados en comparación con las partículas PM 2.5. Por ello, es importante planificar estrategias apropiadas de control de la contaminación atmosférica para reducirla es importante y necesaria.

Lal et al., (2022) en su investigación, evaluaron estrategias para reutilizar el calor residual de las centrales eléctricas alimentadas con carbón y otras fuentes importantes y de qué manera impactarían la calidad del aire de PM_{2.5}, la salud humana y las emisiones de CO₂ en el 2015 y en un año futuro 2050, utilizando distintos niveles de adopción de políticas (regulaciones vigentes, políticas monosectoriales propuestas y estrategias ambiciosas para un solo sector). Se descubrió que la reutilización del calor residual industrial y de las centrales eléctricas como insumo para los sistemas de calefacción urbana (DHS), es una estrategia novedosa y multisectorial para reducir la quema de biomasa local de las emisiones de calefacción, puede compensar entre el 71,3% y el 85,2% de la demanda de calefacción residencial en comunidades cercanas a una central eléctrica. planta (9,3-12,4% de la demanda de calefacción a nivel nacional) con los mayores beneficios observados durante los meses de invierno en áreas con actividad industrial ubicada y mayores demandas de calefacción residencial (por ejemplo, Nueva

Delhi). La utilización del calor residual para generar electricidad a través de ciclos orgánicos de Rankine (ORC) puede generar 22 (11% de la capacidad total de generación a carbón), 41 (8%), 32 (13%) y 6 (5%) GW adicionales. de capacidad eléctrica en los escenarios de 2015, regulaciones vigentes para 2050, sector único para 2050 y sector único ambicioso para 2050, respectivamente. Las estimaciones de emisiones que utilizan estas estrategias se ingresaron al modelo GEOS-Chem, y las PM_{2.5} simuladas ponderadas por población mostraron pequeñas mejoras en los escenarios DHS (0.2-0.4%) y ORC (0.3-3.4%), donde las PM₂ mínimas de DHS El beneficio de 0,5 se atribuye a la pequeña contribución de la quema de biomasa para calefacción a las emisiones de PM_{2.5} a nivel nacional (gran parte de la actividad de quema de biomasa es para cocinar). Las reducciones de PM_{2.5} evitan entre 130 y 36 000 muertes por año entre los escenarios, observándose los mayores beneficios para la salud en los escenarios ORC.

Maleki & Molaei, (2021) en su investigación, evaluaron cómo afectaban los factores meteorológicos a los cambios en las concentraciones de PM 2.5. Se utilizó la versión 3.6.2 de R para el análisis estadístico entre la variable dependiente (Concentración de Material Particulado-PM 2.5) y las variables independientes (viento, precipitación, humedad y temperatura). Mediante los análisis estadísticos de correlación de Pearson y regresión lineal, este estudio examinó cómo los parámetros meteorológicos afectaban a las concentraciones de PM 2.5 en varias estaciones de Teherán en 2018. En los resultados se observó que no existía una correlación significativa entre el PM 2.5 y los parámetros meteorológicos, sólo durante el verano se observó una relación significativa entre la variable dependiente (velocidad del viento) y la variable independiente (valor $p=0,01$), así como una relación inversa ($r=-0,65$). El impacto de las variables independientes y dependientes se investigó mediante regresión lineal múltiple. Según los coeficientes de determinación de este modelo, el 47, 16, 45 y 20% del cambio de la variable dependiente en otoño, invierno, primavera y verano, respectivamente, puede explicarse por parámetros meteorológicos

(independientes). Debido al hecho de que la concentración de PM 2.5 en Teherán es superior a la norma nacional, por ello es necesario una mayor atención de los funcionarios para mejorar la calidad del aire en Teherán.

Kermani et al., (2020) en su estudio, tuvieron como objetivo investigar las consecuencias de los parámetros meteorológicos sobre la acumulación de partículas (PM 2.5) en el aire ambiente de la zona metropolitana de Karaj. En este estudio se empleó el método descriptivo transversal, en el cual se eligieron 17 puntos de muestreo en la ciudad de Karaj utilizando un software SIG. El muestreo de PM 2.5 se llevó a cabo durante 24 h utilizando el piloto de muestreo durante las cuatro estaciones en el aire de la ciudad de Karaj. El muestreo de PM 2.5 se realizó utilizando filtros de PTFE, una bomba periférica y un impactador modular personal. La concentración de partículas recogidas en el filtro se calculó mediante el método gravimétrico, durante el muestreo se registraron parámetros meteorológicos como temperatura, humedad, presión, tasa de cobertura de nubes, ultravioleta (UV) y punto de rocío mediante dispositivos portátiles. Por último, se utilizaron los programas SPSS y Excel para evaluar la relación entre la concentración de PM 2.5 y los parámetros meteorológicos. Las tendencias de variación estacional de las partículas PM 2.5 mostraron que las concentraciones máximas y mínimas anuales se han producido en las temporadas de otoño y primavera con un valor de 67,48 y 19,85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Además, los ciudadanos de Karaj están expuestos a contaminantes de PM 2.5 cuatro veces más que el estándar recomendado por la Agencia de Protección Ambiental (10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Además, los resultados de la investigación muestran una correlación positiva entre la temperatura, la humedad relativa, la presión y la concentración de partículas PM 2.5 ($P < 0,05$). Asimismo, se encontró una correlación negativa entre la concentración de partículas PM 2.5, la radiación ultravioleta, la nubosidad y el punto de rocío ($P > 0,05$). El mapa de dispersión de la concentración de partículas muestra que la región central, oriental y el norte de Karaj están más contaminadas que otras zonas, por lo tanto, para proteger la salud de los ciudadanos de Karaj, se deben adoptar políticas

y estrategias apropiadas para reducir la concentración de partículas y otros contaminantes en el aire ambiente de esta ciudad.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Warthon et al., (2025) llevaron a cabo un estudio con el objetivo de determinar los niveles de contaminación atmosférica, caracterizar la calidad del aire y desarrollar modelos predictivos. La investigación se realizó entre 2017 y 2020, evaluando sistemáticamente la contaminación por material particulado (PM) mediante un muestreador de alto volumen (HiVol ECOTEC 3000) instalado en 18 sitios de monitoreo en cinco distritos urbanos. Además, se desarrollaron y evaluaron modelos de regresión lineal múltiple (MLR) que incorporaron variables meteorológicas, estacionales y temporales, utilizando dos enfoques: lineal directo (Modelo 1) y transformación logarítmica (Modelo 2). La evaluación de los modelos se realizó con indicadores estadísticos como R^2 , RMSE, MAE, MAPE, IOA y CV. Los resultados mostraron concentraciones que superaron considerablemente los valores guía de la OMS, con PM_{2.5} variando entre $41.10 \pm 3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2020) y $82.01 \pm 5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2018), y PM₁₀ entre $45.07 \pm 2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2020) y $72.35 \pm 4.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2017). Se registró una notable disminución en 2020, atribuida a las restricciones impuestas por la pandemia de COVID-19. El Índice de Calidad del Aire (AQI) indicó niveles mayormente "No Saludables" y "Muy No Saludables" durante 2017-2018, mejorando a "No Saludable para Grupos Sensibles" en 2020. Los modelos MLR mostraron su máxima eficiencia con la transformación logarítmica, logrando un R^2 de 0.98 ($p < 0.001$) para PM_{2.5} en la temporada de lluvias de 2020 y R^2 de 0.44 ($p < 0.001$) para PM₁₀ en el modelo anual de 2018. Estos resultados evidencian relaciones no lineales entre los contaminantes y las variables predictoras en la cuenca atmosférica de Cusco.

Bedregal et al., (2023) en su estudio investigan la calidad del aire en la localidad de Carabaylo e identifican las posibles fuentes de contaminación, con la finalidad de tomar decisiones para mejorar la legislación y la calidad de vida de los habitantes. Asimismo, evaluaron

los componentes de aerosoles atmosféricos en el área urbana, esto se realizó mediante el monitoreo de PM_{2.5} y PM₁₀ para determinar la concentración de masa, y el análisis de PM₁₀ utilizando k0-INAA e ICP-MS para la cuantificación de metales, cromatografía iónica para aniones y el método NIOSH para determinar el carbono orgánico y elemental. Los resultados obtenidos de la concentración de masa de PM_{2.5} y PM₁₀ superaron el promedio anual permisible de 15 µg/m³ y 45 µg/m³ según las directrices de la OMS, respectivamente, lo que evidencia una calidad del aire poco saludable. Asimismo, utilizando el modelo de Factorización de Matriz Positiva, se definieron cinco fuentes de contaminantes: industria metalúrgica, sal marina, actividad industrial, polvo y emisiones no relacionadas con el desgaste y emisiones de vehículos.

Sánchez et al., (2022) investigan en su estudio que las emisiones de vehículos en ciudades urbanas, como Perú, son relevantes; sin embargo, no hay estudios publicados que analicen el impacto de estas emisiones en la formación de PM_{2.5} (material particulado fino). Por esta razón, su objetivo es evaluar cómo las emisiones de aerosoles de los automóviles contribuyen a la concentración de masa de PM_{2.5} en el Área Metropolitana de Lima y Callao (MALC), una de las ciudades más contaminadas de América Latina y el Caribe (LAC), conocida por sus altas concentraciones de PM_{2.5}. En febrero de 2018, llevaron a cabo dos simulaciones numéricas (control y sensibilidad) utilizando el modelo de Investigación y Pronóstico del Tiempo acoplado con Química (WRF-Chem). En la simulación de control, incluyeron tanto gases traza como emisiones de aerosoles del tráfico; en la simulación de sensibilidad, denominada "WithoutAerosol", consideraron gases sin emisiones de partículas de vehículos. La evaluación del rendimiento del modelo en el escenario de control se realizó mediante observaciones in situ de PM_{2.5}. Los resultados de la concentración predicha de PM_{2.5}, temperatura y humedad relativa a 2 m, junto con la velocidad del viento a 10 m, demostraron la precisión del modelo en este escenario. En el escenario WithoutAerosol, se encontró que las contribuciones de los gases trazan

de vehículos a las concentraciones de aerosoles secundarios de PM_{2.5} fueron del 12.7%; además, las emisiones de aerosoles del tráfico por carretera contribuyeron con $31.7 \pm 22.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las emisiones directas de aerosoles finos.

Steenland et al., (2022) en su estudio investigan el efecto de la temperatura sobre las asociaciones de mortalidad/morbilidad de PM_{2.5} en Lima, Perú. Se utilizó las regresiones de series temporales que relacionan el PM_{2.5}, la temperatura con la mortalidad y las visitas a la sala de emergencias (ER) durante 2010-2016. Los niveles diarios de PM_{2.5} (asignados a 40 distritos de Lima) y la temperatura máxima diaria (en todo Lima) se estimaron con base en monitores terrestres, sensores remotos y modelos. Se analizó la causa de la mortalidad, cardiovascular (códigos ICD I00-I99) y respiratoria (códigos ICD J00-J99), asimismo, las causas cardiovasculares y respiratorias de las visitas a urgencias. La concentración promedio de PM_{2.5} fue de $20,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (RIC 17,5–23,5), la temperatura máxima media diaria fue de $23,8 \text{ }^\circ\text{C}$ (RIC 20,8-26,9). El efecto de las PM_{2.5} sobre la mortalidad por enfermedades por todas las causas, respiratorias y circulatorias fue significativamente ($p < 0,05$) más fuerte a temperaturas superiores a la temperatura media máxima. Las proporciones de tasas por aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{2.5} para todas las causas, mortalidad respiratoria y circulatoria, respectivamente, fueron 1,03 (1,00–1,06), 1,04 (0,98–1,10) y 1,04 (0,98–1,10) a temperaturas inferiores a la mediana, frente a 1,08 (1,04–1,12), 1,11 (1,03–1,19) y 1,14 (1,05–1,25) cuando las temperaturas estaban por encima de la mediana. Los resultados fueron análogos para las visitas a urgencias por enfermedades respiratorias, pero no circulatorias, por ello, los efectos dañinos de las PM_{2.5} pueden ser peores a temperaturas más altas.

Cordova et al., (2021) en su investigación, evalúa y predice el comportamiento espacio-temporal de la calidad del aire en Lima Metropolitana, Perú, utilizando redes neuronales artificiales. Para la predicción horaria de PM₁₀ basada en los valores pasados de este contaminante y tres variables meteorológicas obtenidas de cinco

estaciones de monitoreo. Los modelos se validaron mediante dos esquemas: Hold-Out y Blocked-Nested Cross-Validation (BNCV). Los hallazgos de la simulación muestran que los períodos de concentración moderada de PM10 se predicen con alta precisión, mientras que, para períodos de alta contaminación, el rendimiento de ambos modelos, MLP y LSTM, disminuyó. Por otro lado, el rendimiento de la predicción mejoró ligeramente cuando los modelos fueron entrenados y validados con el esquema BNCV. Los resultados de la simulación mostraron que los modelos obtuvieron un buen desempeño para las estaciones de monitoreo CDM, CRB y SMP, caracterizados por un nivel de contaminación moderado a bajo. Sin embargo, los resultados muestran la dificultad de predecir este contaminante en aquellas estaciones que presentan episodios críticos de contaminación, como ATE y HCH. En conclusión, las redes neuronales artificiales recurrentes de LSTM con BNCV se adaptan con mayor precisión a episodios críticos de contaminación y tienen un mejor rendimiento de previsibilidad para este tipo de datos ambientales.

2.1.3. Antecedentes regionales

Quispe, (2024) llevó a cabo un estudio cuyo propósito fue identificar los niveles de concentración de material particulado fino (PM2.5) y grueso (PM10), con el fin de calcular el Índice de Calidad del Aire (INCA) en función del material particulado en la zona rural de Ahuaycha. Para ello, eligió un punto de monitoreo y recolectó muestras diarias durante los meses de noviembre y diciembre, utilizando fichas diseñadas para la recopilación de datos. Es así que, los resultados obtenidos indican que la concentración diaria de material particulado fue de 14,29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2,5 y 15,90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10. En cuanto al INCA del material particulado de fracción fina (PM2,5), se registraron valores de 40,43% en el turno mañana, considerado moderado; 62,22% en el turno tarde, clasificado como bueno; y 55,56% en el turno noche, catalogado como malo, lo que sugiere un riesgo para la salud de las personas debido a la posible aparición de diversas enfermedades por exposición. En

contraste, el INCA del material particulado grueso (PM10) se mantuvo en niveles buenos en todos los turnos.

Angeles et al., (2024) realizaron una investigación con el fin de demostrar que las partículas atmosféricas antropogénicas con un diámetro menor a $2.5 \mu\text{m}$ (PM2.5) y entre 2.5 y $10 \mu\text{m}$ (PM10) son los principales contribuyentes a la contaminación del aire y se han convertido en una grave amenaza ambiental en las regiones de Junín y Huancavelica, en Perú. Por ello, se analizaron los datos obtenidos con el sensor de bajo costo PA-II PurpleAir para medir el material particulado (fino y grueso) en la región de Junín (Chanchamayo, estación T, Huancayo, estación T1 y Chupaca, estación T3) y en Huancavelica (Pampas, estación T2). Asimismo, se utilizó el modelo Hysplit para cuantificar las trayectorias de viento transfronterizas desde la región amazónica de Brasil hacia la región de Junín en Perú. Los resultados mostraron que, durante la temporada de lluvias, las concentraciones máximas de PM2.5 y PM10 fueron de $151 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (estación T1) y $178 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (estación T1), respectivamente. Finalmente, los resultados del índice de calidad del aire (AQI) para PM2.5 permitieron clasificar las estaciones de Huancayo y Chanchamayo con una calidad del aire "muy mala" y "moderada a mala", respectivamente. Además, en Pampas y Chupaca, el AQI se clasificó como "muy insalubre" y "peligroso" en aproximadamente el 50% y 43% de los días, respectivamente.

Carbajal, (2021) realizó una investigación con el objetivo de evaluar la calidad del aire de la comunidad de Sacsamarca mediante la medición de la cantidad de material particulado en suspensión emitido en Huancavelica. La investigación se realizó con un diseño no experimental y una técnica científica; la metodología fue explicativa. Utilizando el enfoque de control del aire, eligieron siete puntos de control mediante muestreo no probabilístico. Para recoger los datos se utilizó un dispositivo Hi-vol de gran volumen con un caudal de $1,13 \text{ m}^3/\text{s}$ y hojas de recogida de datos, también se registraron las PM10 y PM2.5. Se utilizó la aplicación AQI-aire para calcular las concentraciones de

partículas en suspensión en el barrio de Sacsamarca. El AQI global también se obtiene utilizando las fórmulas del índice de calidad del agua. Según los resultados, el AGI total para el material particulado es de 158,3, 173,6, 173,6 y 188,4 g/m^3 , y las concentraciones de PM_{2,5} y PM₁₀ oscilan entre 11,7 y 93,5 g/m^3 y 29,2 y 163,7 g/m^3 , respectivamente. Se determina que la calidad de la comunidad de Sacsamarca se considera mala como resultado de las emisiones de PM_{2.5} y PM₁₀. La calidad del aire de la comunidad se califica como moderadamente mala, lo que significa que puede ser perjudicial para aquellos que son muy susceptibles a la contaminación.

Barrientos & Espinoza, (2021) llevaron a cabo un estudio con el propósito de analizar la calidad del aire afectada por la emisión de material particulado durante la construcción de pistas y veredas en el jirón Odonovan, Huancavelica. La investigación fue de tipo aplicada, con un nivel explicativo y diseño no experimental. Se establecieron cinco puntos de monitoreo siguiendo el protocolo correspondiente, utilizando el equipo Hi-Vol y balanzas analíticas para medir las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5}. Los resultados revelaron valores promedio de 101.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM₁₀ y 55.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5}, ambos por encima de los límites establecidos por los estándares de calidad ambiental. Según el Índice de Calidad del Aire (AQI), la calidad fue moderada para PM₁₀ y considerada no saludable para grupos sensibles en el caso de PM_{2.5}. En conclusión, la calidad del aire en la zona no es adecuada, siendo aceptable en términos generales, pero riesgosa para poblaciones vulnerables.

Paredes & Quispe, (2021) desarrollaron una investigación con el fin de analizar la relación entre el índice global de calidad del aire por material particulado y la aparición de enfermedades respiratorias en el centro poblado de Callqui Chico, ubicado en Huancavelica. El estudio fue de tipo aplicada, con un nivel correlacional y diseño no experimental. Se establecieron siete puntos de monitoreo mediante muestreo no probabilístico, siguiendo los lineamientos del protocolo de monitoreo de

aire. Para la recolección de datos se utilizó el equipo Hi-Vol con un flujo de 1.13 m³/s, junto con fichas y balanzas analíticas para medir las concentraciones de PM10 y PM2.5. El índice de calidad del aire (AQI) fue calculado mediante el aplicativo AQI-aire y las fórmulas correspondientes. Además, se obtuvo información sobre la incidencia de enfermedades respiratorias, registrándose 138 casos entre amigdalitis, bronquitis, faringitis e infecciones respiratorias agudas (IRA). Los resultados mostraron que el PM2.5 alcanzó niveles perjudiciales en tres puntos y el PM10 en uno, mientras que en dos ubicaciones la calidad del aire fue clasificada como buena. La investigación concluyó que existe una correlación positiva y significativa entre la calidad del aire y la prevalencia de enfermedades respiratorias en la zona.

2.2. Bases teóricas y conceptuales

2.2.1. Bases teóricas

2.2.1.1. La atmósfera

La atmósfera consiste en una combinación de gases que circulan alrededor de la Tierra y permanecen en su posición debido a la fuerza gravitacional, esta combinación de gases es necesaria para mantener las temperaturas adecuadas en la superficie terrestre y absorber los rayos ultravioletas del sol (Sotta, 2018). Alrededor del 75% de la masa total de la atmósfera se encuentra a una distancia de 11 kilómetros desde la Tierra, en una capa específica.

2.2.1.1.1. Niveles de la atmósfera

La capa más cercana a la superficie terrestre es la troposfera, que mide entre 10 y 15 kilómetros, aquí a medida que aumenta la altitud, la temperatura y la presión disminuyen (Warren, 2018).

La estratosfera es una capa que se extiende de 15 a 50 kilómetros desde la superficie de la Tierra y es más cálida en la parte superior que en la inferior, la temperatura en la parte inferior es constante, pero en la parte superior la temperatura aumenta porque el ozono absorbe los rayos del sol. Por tanto,

la situación de la temperatura es opuesta a la de la troposfera (Warren, 2018).

La mesosfera es una capa fría que disminuye con la altitud, su delgadez y su importancia de la atmósfera radican en su capacidad para realizar reacciones químicas e ionización dentro de esta capa (Warren, 2018).

La capa de la atmósfera situada entre la mesosfera y la exosfera de la Tierra se denomina termosfera o ionosfera, con una altura que se extiende desde 80 a 120 kilómetros sobre la superficie de la Tierra hasta 500 a 1000 kilómetros por debajo (Warren, 2018).

2.2.1.2. Contaminación atmosférica

La adición de sustancias no naturales, como partículas sólidas o líquidas, a la atmósfera terrestre se conoce colectivamente como contaminación del aire (Chavez, 2023).

Además, se refiere a una clase de contaminantes atmosféricos que reducen la esperanza de vida; entre ellos se incluyen las partículas en suspensión en el aire (PM), el ozono (O₃), los óxidos de azufre y nitrógeno (SO_x y NO_x) y el monóxido de carbono (CO) (Baena & Campos, 2020).

2.2.1.2.1. Fuentes fijas

Las fuentes fijas se dividen en:

Las fuentes puntuales proceden de la producción de energía y de procesos industriales relacionados con la fabricación de productos químicos, textiles, alimentos, madera, metales, metalurgia, transformación de productos vegetales y animales, entre otros (Chavez, 2023). Las partículas son el principal contaminante vinculado a la combustión (NO_x, SO₂, CO, CO₂ e hidrocarburos).

Las fuentes superficiales incluyen principalmente emisiones asociadas a actividades y procesos de solventes, aseo de superficies, maquinarias, recubrimientos

industriales de construcción, tintorería, artes gráficas, salones de briquetas de GLP, distribución y almacenamiento (Chavez, 2023). Además, incluye actividades que generan emisiones como, el tratamiento de aguas residuales, instalaciones de producción de compost, vertederos, etc.

Las emisiones de los volcanes, los mares, la vegetación, la suspensión del suelo, la descomposición anaeróbica y aeróbica de los sistemas naturales se consideran fuentes naturales. En particular, el biogás es una sustancia liberada por plantas, microorganismos en suelos y océanos, ello contribuye significativamente a la química de la troposfera al ayudar directamente a la creación de ozono (Chavez, 2023).

2.2.1.2.2. Fuentes móviles

La contaminación del aire causada por fuentes móviles proviene de compuestos orgánicos volátiles (COV) y monóxido de carbono (CO) emitidos por los vehículos (Chavez, 2023). Ejemplos de fuentes móviles incluyen automóviles, camiones y aviones.

2.2.1.3.Repercusiones en el bienestar humano y en el ecosistema

El material particulado se compone de numerosas sustancias sólidas y líquidas procedentes de distintas fuentes, como el polvo de la descomposición mecánica, el humo de la combustión, la niebla de la condensación del vapor y los aerosoles (Osimobi et al., 2019). Las partículas de diámetro grueso o aerodinámicas ($PM_{10} = 10 \mu m$) suelen contener una cantidad significativa de materia natural y son principalmente el contaminante que se genera por procesos mecánicos o evaporativos (Osimobi et al., 2019).

La principal fuente de partículas $PM_{2.5}$ es la actividad humana, destacándose las emisiones de vehículos diésel, que consisten

principalmente en partículas secundarias con componentes más tóxicos (Osimobi et al., 2019).

2.2.1.4. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire

Disponen máximos permisibles de concentración de contaminantes con la finalidad de proteger la vitalidad de los ciudadanos, especialmente los más vulnerables a la exposición (Valverde, 2015). Cualquier alteración en las proporciones de estos elementos que afecte a las propiedades fisicoquímicas del aire se examina bajo parámetros de la contaminación atmosférica.

Tabla 1

Estándares de Calidad Ambiental del Aire para PM10 y PM2.5

Parámetros	Periodo	Valor (ug/m ³)	Criterios de Evaluación	Método de análisis
Material Particulado (PM 2.5).	24 horas	50	NE más de 7 veces al año.	Separación de inercia y filtración (Gravimetría)
	Anual	25	Media aritmética anual.	
Material Particulado (PM10).	24 horas	100	NE más de 7 veces al año.	Separación de inercia y filtración (Gravimetría)
	Anual	50	Media aritmética anual.	

Nota. Estándares de Calidad Ambiental del Aire, específicamente para el Material Particulado PM10 y PM 2.5 (MINAM, 2017).

2.2.1.5. Material particulado

Es una amplia gama de compuestos de partículas atmosféricas que exhibe distintas características físicas y químicas, vías de formación, fuentes u orígenes, su impacto a la vitalidad humana y el ecosistema. Como demuestran las normas y procedimientos de muestreo, la dimensión de las partículas es el principal factor que limita su penetración en las vías respiratorias (García et al., 2008). Las partículas con un diámetro menor a 10 µm pueden afectar las vías respiratorias debido a su capacidad para penetrar más fácilmente.

Las partículas, incluidas las PM10 y PM2.5, son uno de los principales contaminantes atmosféricos cuya composición química degrada la calidad del aire que respiramos (Torres & Jim, 2020).

Además, el tamaño de la partícula determina el comportamiento en la atmósfera, así, las partículas más pequeñas pueden quedar suspendidas durante varias horas y moverse muchos miles de kilómetros en el espacio, mientras que las partículas más grandes tienden a acercarse debido al movimiento atmosférico (Chavez, 2023). Normalmente, las PM10 se componen de partículas primarias que se liberan directamente al aire a través de fuentes naturales como incendios forestales y emisiones volcánicas, junto con actividades humanas como la agricultura, la dispersión de polvo y actividades industriales. Las partículas finas PM 2.5, que están en suspensión, generalmente se componen de partículas secundarias creadas por precursores gaseosos como NO_x, SO₂, COV y NH₃.

En el transcurso de su existencia, los aerosoles atmosféricos pueden originarse a partir de vapores gaseosos mediante procesos de nucleación homogénea, que producen conglomerados de tamaño nanométrico. También pueden proliferar condensando material en partículas preexistentes y coagulándose con la población de partículas de aerosol preexistente para formar partículas de mayor tamaño (Torres & Jim, 2020).

2.2.1.6. Aerosoles atmosféricos

Los aerosoles atmosféricos se estudian desde hace mucho tiempo, en la actualidad, se ha convertido en un tema candente en física y química atmosférica debido al importante papel que desempeñan en el cambio climático, la calidad del aire y salud pública. Los gobiernos y los científicos han prestado mucha atención a los efectos causados por aerosoles, por ello están dedicando grandes esfuerzos a conocer sus propiedades y los procesos que intervienen en su formación y eliminación. El término aerosol se refiere a cualquier partícula sólida o líquida (excepto agua pura) suspendida en un medio gaseoso en el rango

de tamaño entre unos pocos nanómetros y algunas decenas de micrones (1 nm – 100 μm) (Gimeno et al., 2002).

2.2.1.6.1. Procesos de formación de aerosoles atmosféricos

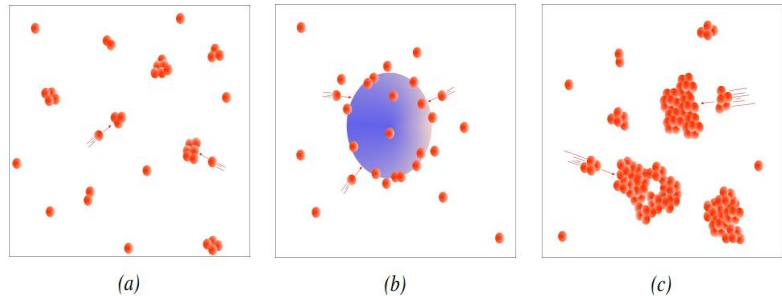
Una vez en la atmósfera, las propiedades de las partículas de aerosoles atmosféricos pueden sufrir variaciones y transformación por interacción con otros constituyentes atmosféricos, sin embargo, dependen fundamentalmente de sus mecanismos de formación (Esteve, 2011). Según estos, los aerosoles atmosféricos se dividen en dos clases, aerosoles primarios y aerosoles secundarios:

- ❖ **Aerosol primario:** La formación de partículas de aerosol primario resulta de procesos de fragmentación o de combustión, estas partículas aparecen en el gas portador como objetos ya bien formados. En áreas urbanas, están principalmente relacionadas con las emisiones de los gases de escape de los vehículos como resultado de una combustión incompleta, así como las actividades de construcción y demolición, también emiten partículas de aerosol primarias (Esteve, 2011).
- ❖ **Aerosol secundario:** La masa de partículas de aerosol secundarias se forma durante la oxidación atmosférica de los gases precursores emitidos. En este proceso, la oxidación de precursores como el SO_2 , NO_2 y compuestos orgánicos adecuados pueden producir compuestos con presiones de vapor muy bajas. Estos pueden condensarse para formar una nueva partícula, a menudo en combinación con otras especies, como vapor de agua y NH_3 , en un proceso llamado nucleación homogénea (Fig. 1 (a)). También pueden condensarse sobre partículas existentes y contribuir a su crecimiento en tamaño, lo que se conoce como condensación (Fig. 1 (b)). Además, las partículas de aerosol pueden experimentar evaporación, deposición y coagulación (Fig. 1 (c)), proceso en el cual dos partículas colisionan para formar una partícula más grande. Todos

estos procesos influyen en la evolución de la población de aerosoles a lo largo del tiempo (Esteve, 2011).

Figura 1

Oxidación de los precursores (aerosoles)



Fuente: La oxidación de precursores: (a) nucleación homogénea de partículas de aerosol, (b) condensación de partículas de aerosol y (c) coagulación de partículas de aerosol (Esteve, 2011).

2.2.1.6.2. Distribución de tamaños de aerosoles

Los aerosoles atmosféricos suelen categorizarse según su tamaño, el tamaño de las partículas generalmente se define según la técnica de medición utilizada en su caracterización. Cada técnica mide el tamaño basándose en una propiedad física diferente a través de un diámetro equivalente. Para una partícula esférica de densidad unitaria, el tamaño puede caracterizarse simplemente por el diámetro geométrico. Para partículas de forma y densidad arbitrarias, se utiliza un diámetro equivalente (Palacios, 2014).

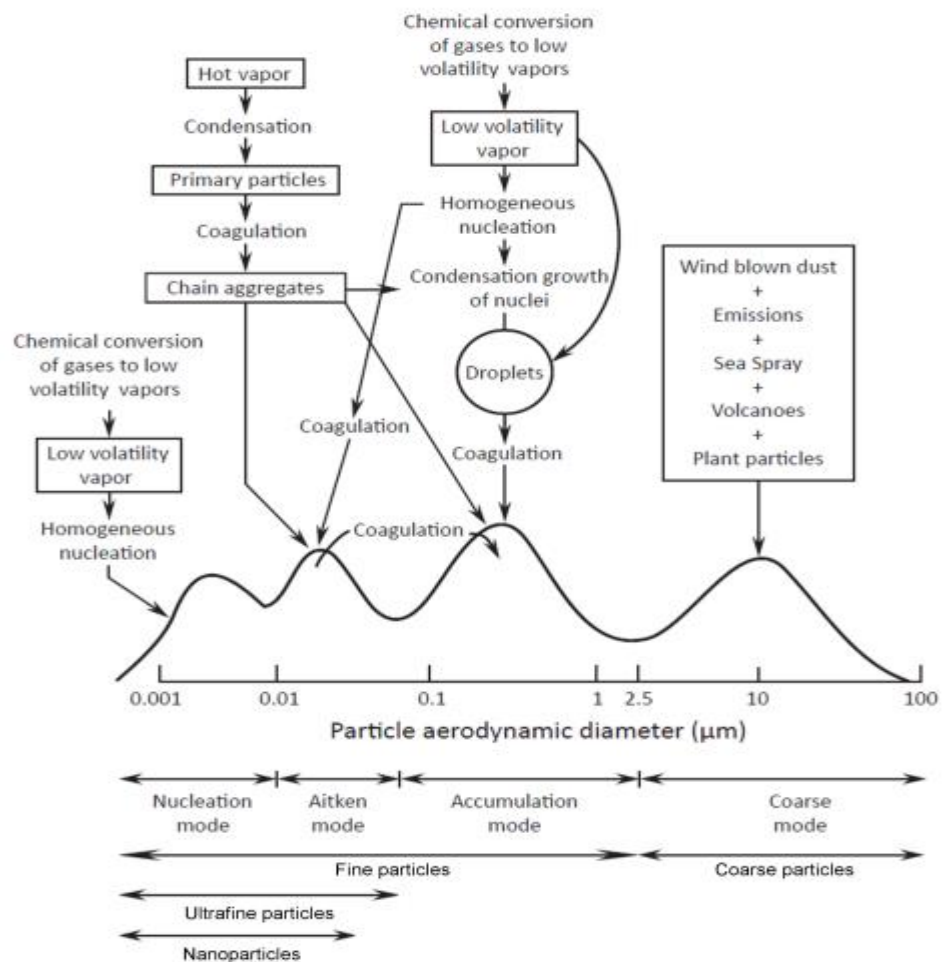
Los tipos de modos de rango de tamaño que típicamente se observan en los aerosoles ambientales son las cuatro distribuciones de tamaño:

- ✓ **Modo de nucleación:** Contiene las partículas más pequeñas (hasta 10 nm), recién nucleadas (Palacios, 2014).
- ✓ **Modo de Aitken:** Incluye partículas con diámetros aerodinámicos entre 10 nm y 100 nm. Este modo abarca partículas nucleadas que han crecido por condensación de vapores o coagulación (Palacios, 2014).

- ✓ **Modo de acumulación:** (100 nm – 2,5 μm) está formado por partículas que han crecido aún más mediante coagulación, condensación o procesos en nubes (Palacios, 2014).
- ✓ **Modo grueso:** Incluye partículas mayores de 2,5 μm, este modo comprende partículas formadas por procesos de desintegración mecánica asociados a orígenes naturales. Las partículas gruesas son principalmente primarias y se generan a partir de procesos mecánicos como el polvo mineral resuspendido, aerosoles marinos, productos del desgaste de neumáticos y frenos, y emisiones biogénicas (Palacios, 2014).

Figura 2

El diámetro aerodinámico de una partícula



Fuente:(Palacios, 2014).

Generalmente, las partículas del modo grueso no son productos de la coagulación de partículas del modo de acumulación, sino que tienen fuentes distintas (por ejemplo, la resuspensión de polvo) y, por lo tanto, también presentan composiciones químicas significativamente diferentes a las de otros modos. Debido a los mecanismos de eliminación rápida para partículas más pequeñas (como la coagulación) y más grandes (como la sedimentación), las partículas del modo de acumulación tienen las mayores vidas útiles en la atmósfera (García et al., 2006). Sin embargo, las partículas de los modos de nucleación y Aitken suelen ser, con diferencia, las más abundantes en la atmósfera. Pero debido a su baja masa, no desempeñan un papel importante si se considera la masa total de los aerosoles, la cual suele estar dominada por partículas de los modos de acumulación (García et al., 2008).

Como la mayoría de las propiedades de los aerosoles, la distribución de estos modos depende significativamente de la ubicación (horizontal y vertical), del uso o tipo de suelo circundante (por ejemplo, urbano/rural o marino/continental) y de la fuente de emisión de producción (como quema de biomasa o resuspensión de polvo) (García et al., 2006).

Frecuentemente, se realiza una clasificación adicional según rangos de tamaño de partículas (PM) considerando su diámetro aerodinámico:

- ✓ **Nanopartículas:** (<50 nm)
- ✓ **Partículas ultrafinas:** (<100 nm)
- ✓ **Partículas submicrométricas:** (<1 μm)
- ✓ **Partículas finas:** (<2,5 μm)
- ✓ **Partículas gruesas:** (2,5 μm – 10 μm)

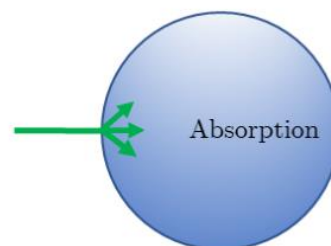
2.2.1.6.3. Propiedades ópticas de los aerosoles

Las propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos son de mayor importancia para diversas aplicaciones, incluyendo estudios sobre visibilidad atmosférica y cambio climático (tanto efectos directos como indirectos), sensores remotos

atmosféricos y monitoreo de material particulado. Cuando las partículas de aerosol interactúan con la luz, pueden ocurrir dos tipos diferentes de procesos (Cholan et al., 2017). La energía recibida por la partícula puede ser reemitida en todas las direcciones, pero con una intensidad dependiente de la dirección (dispersión de la luz). Alternativamente, la energía de la radiación puede transformarse en otras formas de energía, como calor o energía química (absorción de luz, Fig.3). Los procesos de dispersión de luz predominan sobre los procesos de absorción en el espectro visible, sin embargo, la absorción de luz no puede ser ignorada, ya que influye considerablemente en el balance total de radiación. La reducción de la intensidad de un haz directo durante su propagación a través de un medio de aerosol está determinada simultáneamente por los procesos de absorción y dispersión. Las propiedades ópticas de los aerosoles también están determinadas por su forma, tamaño de partícula, morfología, índice de refracción de la partícula, la longitud de onda de la luz y la dependencia de la humedad relativa. El crecimiento higroscópico de los aerosoles con el aumento de la humedad relativa (HR) afecta los efectos radiativos directos de los aerosoles al cambiar las propiedades ópticas de los aerosoles debido al aumento de la absorción de agua en composiciones hidrofílicas como sulfato, nitrato y algunos compuestos orgánicos (Girado & Gónima, 2018).

Figura 3

Absorción de luz



Fuente:(Girado & Gónima, 2018).

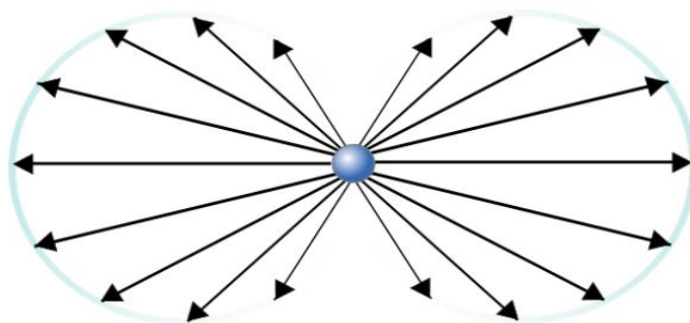
En la atmósfera real, siempre están presentes una variedad de formas de partículas y un sistema de tamaños de partículas. Sin embargo, es conveniente considerar el caso idealizado de dispersión por partículas de radio uniforme (r) que son esféricas. El tamaño de la partícula influye en el régimen de dispersión de luz, el parámetro de tamaño x es un número adimensional utilizado para caracterizar y cuantificar la radiación dispersada. Se define como $x = 2\pi r/\lambda$, cuando λ es la longitud de onda de la luz (Olarte, 2014). Los regímenes de dispersión comunes se clasifican en:

a) Dispersión de Rayleigh $x \ll 1$:

Según la teoría de Rayleigh para partículas muy pequeñas (por ejemplo, moléculas y pequeñas partículas de aerosol) en comparación con la longitud de onda incidente, la profundidad óptica debida a la dispersión (también llamada profundidad óptica de Rayleigh) sigue la $\tau \propto \lambda^{-4}$, siendo λ la longitud de onda en micrómetros. Esta fuerte dependencia de la longitud de onda causa una dispersión mucho más intensa para longitudes de onda más cortas (Fig. 4). Por lo tanto, este proceso es el que explica el color azul del cielo durante el día, ya que la fracción azul ($\lambda \sim 0.4 \mu m$) de la radiación solar visible es la longitud de onda que se dispersa con mayor eficacia en la atmósfera (García et al., 2008).

Figura 4

Dispersión de Rayleigh



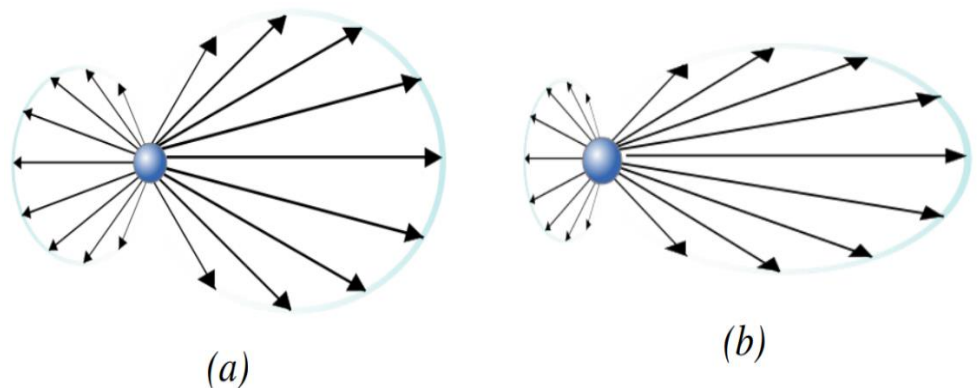
Fuente: (García et al., 2008).

b) Dispersión de Mie $x \geq 1$

Para partículas más grandes, como los aerosoles o las gotas de nubes, y longitudes de onda en el espectro visible, la teoría de Rayleigh no es válida. Si la longitud de onda y el radio de la partícula tienen un valor aproximadamente igual, es decir, $x \approx 1$, entonces la dispersión de Mie domina (Fig. 5). Según la teoría de Mie, la distribución angular de la radiación dispersada depende solo del parámetro de tamaño y el índice de refracción de la partícula, lo que da como resultado una dispersión hacia adelante que domina sobre la dispersión hacia atrás (García et al., 2008).

Figura 5

Dispersión de Mie



Fuente: Dispersión de Mie (a) partículas pequeñas (b) partículas grandes (García et al., 2008).

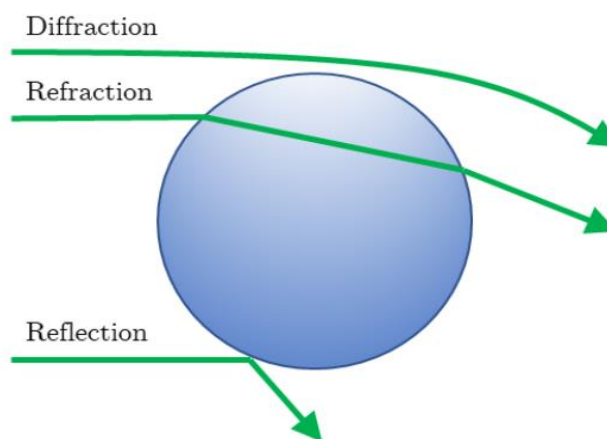
c) Óptica geométrica $x \gg 1$

Las propiedades ópticas de las interacciones de partículas y radiación con un parámetro de tamaño claramente superior a uno se explican mediante óptica geométrica. Este es un tipo de dispersión no selectiva, que influye de manera uniforme en todas las longitudes de onda del espectro visible e infrarrojo cercano. Produce una dispersión cuyo color varía desde el azul hasta el blanco, en este caso, se puede aplicar el método de trazado de rayos geométrico: un haz de luz

puede considerarse como un conjunto de rayos paralelos separados que impactan la partícula o la rodean. Los rayos que inciden sobre la dispersión sufren reflexión y refracción, mientras que aquellos que pasan alrededor experimentan difracción (Fig. 6). Estas técnicas de trazado de rayos se utilizan para describir fenómenos ópticos como el arco iris y el halo, así como la corona, respectivamente (García et al., 2008).

Figura 6

Óptica geométrica



Fuente:(García et al., 2008).

2.2.1.6.4. Impactos globales de los aerosoles en la meteorología y el clima

Investigaciones sobre los efectos de los aerosoles y sus implicaciones para el cambio climático fueron compilados por primera vez en el informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático en 1990. Desde entonces, ha habido numerosos estudios sobre los efectos directos e indirectos que los aerosoles tienen en el clima y el tiempo. El efecto directo de los aerosoles se refiere a cómo los aerosoles pueden absorber y dispersar la radiación solar y térmica, mientras que los efectos indirectos de los aerosoles se refieren a las maneras en que los aerosoles pueden alterar el albedo y la duración de las nubes. La magnitud de tales efectos depende de la

distribución del tamaño, la composición química, el estado de mezcla y la morfología de las partículas (Palacios, 2014).

La influencia inmediata de los aerosoles de material particulado se refiere a la interacción directa de estas partículas con la radiación solar y térmica en la atmósfera. Esta interacción puede resultar en la dispersión (reflexión) o absorción de la radiación, lo cual tiene consecuencias importantes para el clima (Palacios, 2014).

- ✓ **Dispersión:** Cuando los aerosoles dispersan la radiación solar, reflejan parte de esta radiación de vuelta al espacio, lo que puede provocar un efecto de enfriamiento en la superficie terrestre.
- ✓ **Absorción:** Cuando los aerosoles absorben la radiación solar y térmica, pueden calentar la atmósfera. Este calentamiento puede afectar la temperatura y las dinámicas atmosféricas locales y globales.

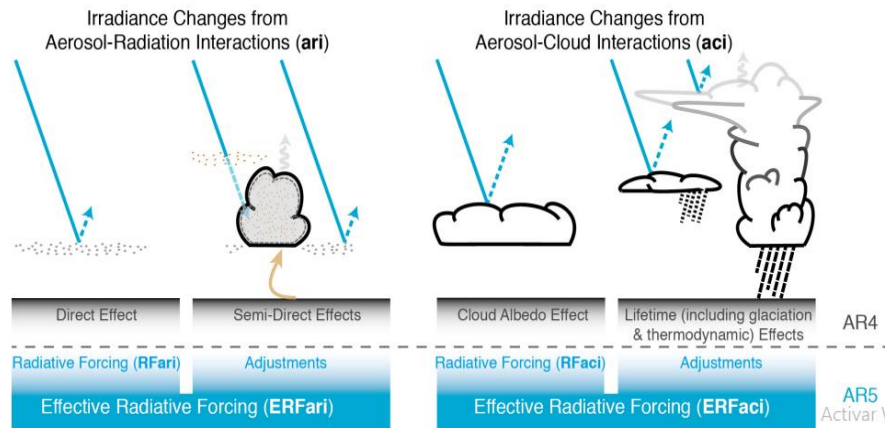
La magnitud y dirección de estos efectos (enfriamiento o calentamiento) dependen de las propiedades de las partículas, incluyendo su tamaño, composición y forma, así como de su índice de refracción complejo, que determina cómo interactúan con la radiación (Palacios, 2014).

2.2.1.6.5. Efectos en el clima

Los aerosoles atmosféricos influyen en el equilibrio energético de la Tierra directamente, a través de la absorción y dispersión de la radiación solar en la atmósfera e indirectamente, actuando como condensación de nubes o núcleos de hielo (Figura 7). Algunos componentes de los aerosoles (es decir, el carbono negro) pueden tener un impacto neto en el calentamiento, mientras que otros (es decir, nitratos, sulfatos, carbono orgánico, etc.) pueden tener un efecto refrescante (García et al., 2008).

Figura 7

Interacciones entre aerosoles, radiación y nubes de aerosoles



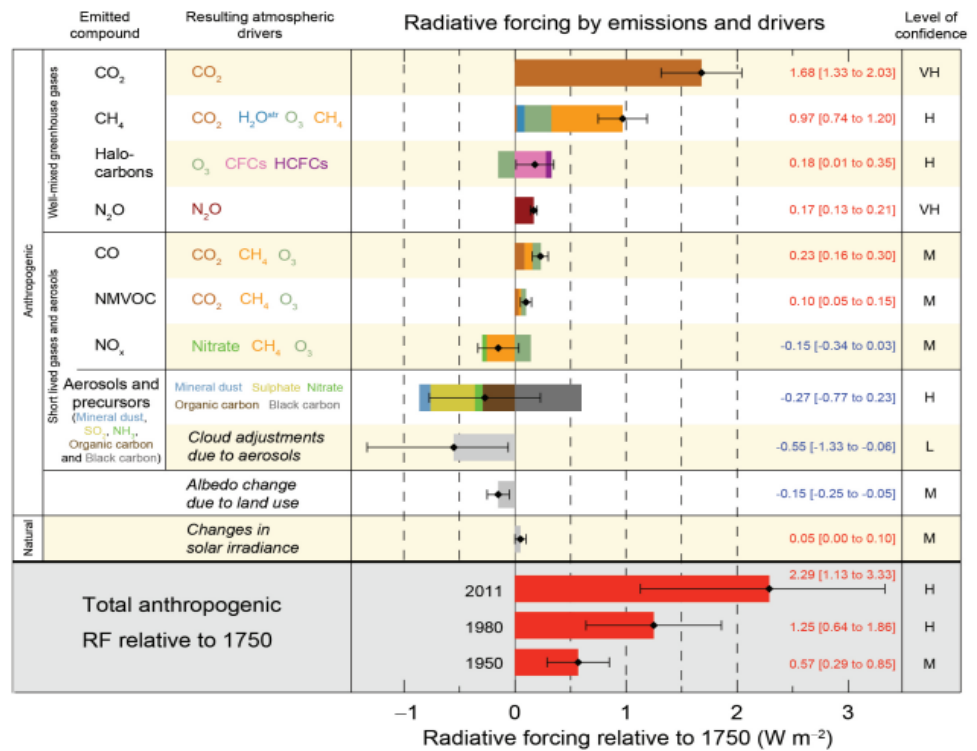
Fuente: Esquema de la nueva terminología utilizada en el IPCC (2013) para las interacciones entre aerosoles, radiación y nubes de aerosoles. Las flechas azules representan energía solar-radiación, las flechas verdes representan la radiación terrestre y la flecha marrón simboliza la importancia de acoplamientos entre la superficie y la capa de nubes para ajustes rápidos (García et al., 2008).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), que es la organización internacional establecido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), recoge en el Quinto Informe de Evaluación (AR5) el estado actual del arte y conocimiento científico del cambio climático y sus fuerzas impulsoras. La Figura 8, muestra la evaluación de los efectos de los contaminantes atmosféricos en el clima (IPCC, 2013), esta cifra representa la radiación de forzamiento (RF) (positivos y negativos), que actúan sobre el equilibrio radiativo de la Tierra (entrante vs radiación saliente). La radiación de forzamiento cuantifica el cambio en los flujos de energía causados por variaciones en las condiciones naturales y agentes antropogénicos. La RF positiva tiende a aumentar la temperatura de la superficie, mientras que la negativa conduce al enfriamiento de la superficie. La radiación de enfriamiento

(RF) se estima basándose en observaciones, propiedades in situ y remotas de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles, cálculos utilizando modelos numéricos que representan procesos observados (Serageldin et al., 2015).

Figura 8

Evaluación de los efectos de los contaminantes atmosféricos en el clima



Fuente: Estimaciones del forzamiento radiativo (RF), los valores son el promedio global, divididos según la frecuencia emitida que resultan en una combinación de factores. Se muestran las mejores estimaciones del RF neto como diamantes negros con sus correspondientes intervalos de incertidumbre; los valores numéricos se proporcionan a la derecha de la figura, junto con el nivel de confianza en el forzamiento neto (VH-muy alto, H-alto, M-medio, L-bajo, VL-muy bajo) (Serageldin et al., 2015).

La RF del efecto total de los aerosoles atmosféricos en la atmósfera, que incluye las nubes ajustes debidos a aerosoles, es -0,9 [-1,9 a -0,1] W·m⁻² (confianza media), y los

resultados de un forzamiento negativo de la mayoría de los aerosoles y una contribución positiva de la absorción de carbono negro de radiación solar. Existe un alto nivel de confianza en que los aerosoles y sus interacciones con las nubes hayan compensado una porción sustancial del forzamiento medio global proviene de GEI bien mezclados. Sin embargo, aportan la mayor incertidumbre a la estimación total del RF (Serageldin et al., 2015).

2.2.1.7.Repercusiones del material particulado en la salud

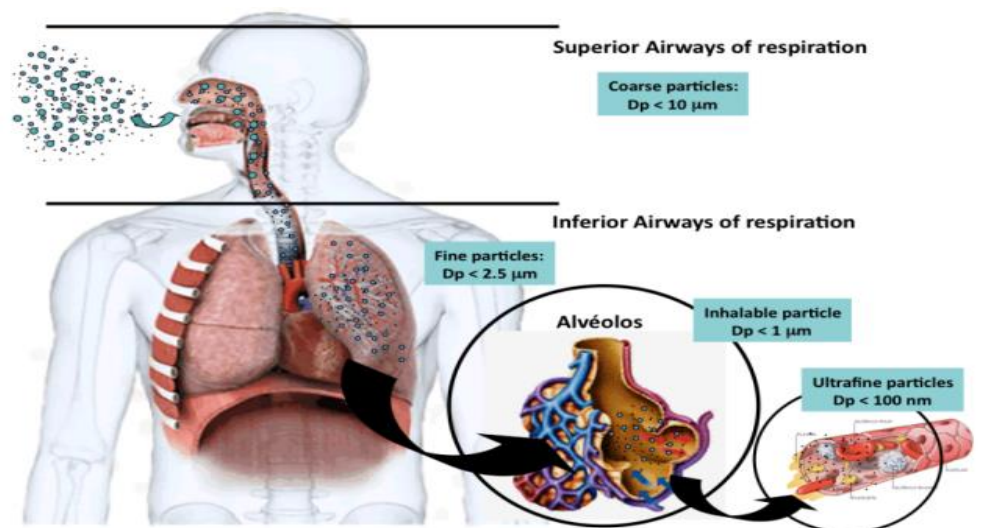
Debido al tamaño de las partículas, las que tienen un diámetro inferior a 10 μm pueden entrar en los pulmones y algunas incluso en el torrente sanguíneo (Palacios, 2014).

Environmental Protection Agency (2022) diversos estudios científicos han vinculado la contaminación por partículas con una serie de problemas, tales como:

- ✓ Infartos de miocardio que no causan muertes.
- ✓ Latidos irregulares.
- ✓ Asma crónica.
- ✓ Reducción de la función pulmonar, etc.

Figura 9

Áreas donde se depositan las partículas en suspensión en el cuerpo humano



Fuente: (Palacios, 2014).

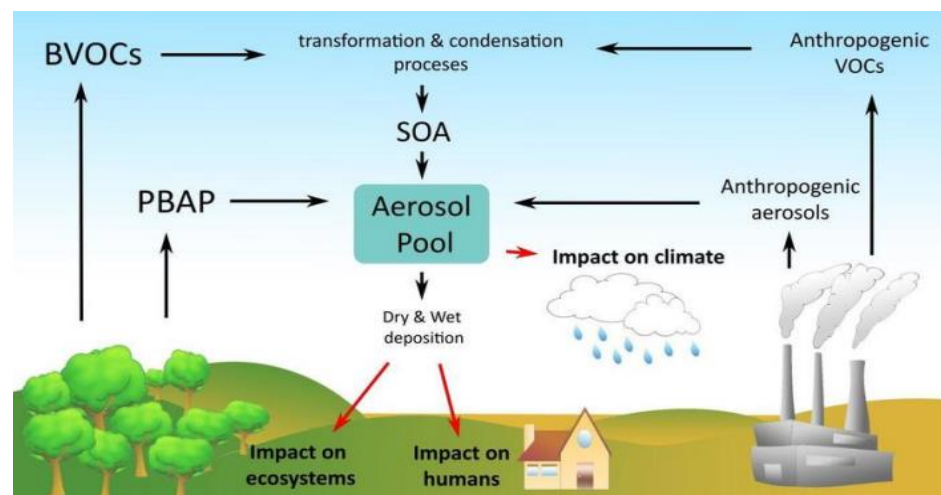
2.2.1.8.Repercusiones del material particulado en el ambiente

El viento puede llevar partículas a largas distancias antes de depositarlas en el suelo o el agua. Environmental Protection Agency, (2022) afirma que las sustancias químicas presentes en esta sedimentación pueden causar la:

- ✓ Acidificación de los lagos y arroyos.
- ✓ Disminución de los nutrientes del suelo.
- ✓ Perjuicios a bosques y cultivos agrícolas sensibles.
- ✓ Agravamiento de los efectos de la lluvia ácida y otras situaciones.

Figura 10

Emisiones biogénicas del bosque y de las industrias hacia la atmósfera



Fuente: (Palacios, 2014).

2.2.1.9.Efecto del material particulado en la temperatura

2.2.1.9.1. Material particulado (PM2.5) y su efecto en la temperatura

Las partículas de PM2.5 son extremadamente pequeñas y representan una fracción fina del material particulado. Debido a su tamaño reducido, tienen una alta capacidad para permanecer en la atmósfera durante periodos prolongados, lo que aumenta su interacción con la radiación solar. Estas partículas pueden absorber o reflejar la radiación dependiendo de su composición química. Por ejemplo, el carbono negro, un componente común del PM2.5 derivado de la quema de combustibles fósiles y biomasa, tiene una alta capacidad de absorción de radiación solar, lo que contribuye al

calentamiento de la atmósfera. Este fenómeno genera un efecto de calentamiento local (Dutta & Pal, 2022).

Además, el PM_{2.5} influye indirectamente en la temperatura al modificar las propiedades microfísicas y ópticas de las nubes. Estas partículas actúan como núcleos de condensación, aumentando la cantidad de gotas pequeñas en las nubes, lo que incrementa su reflectividad (albedo) y reduce la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie terrestre. Este efecto, conocido como enfriamiento indirecto, puede contrarrestar parcialmente el calentamiento directo provocado por el carbono negro. Sin embargo, el balance neto depende de factores como la concentración y composición de las partículas, así como las condiciones meteorológicas locales (Malhotra & Aulakh, 2023).

2.2.1.9.2. Material particulado (PM₁₀) y su efecto en la temperatura

El PM₁₀ incluye partículas más grandes que el PM_{2.5}, como polvo mineral, polen y cenizas, que suelen tener una vida útil más corta en la atmósfera debido a su mayor peso. Estas partículas interactúan con la radiación solar principalmente mediante la reflexión y dispersión de la luz. El PM₁₀ tiene un efecto de enfriamiento directo más pronunciado que el PM_{2.5}, ya que su tamaño relativamente grande favorece la dispersión de la radiación solar entrante, lo que reduce la cantidad de energía que llega a la superficie terrestre (Casallas et al., 2020).

Además, el PM₁₀ puede alterar la temperatura superficial al influir en el balance de energía terrestre. En regiones donde el PM₁₀ es abundante, como áreas afectadas por tormentas de polvo o actividad industrial intensa, se observa una reducción en las temperaturas diurnas debido a la disminución de la radiación solar directa. Sin embargo, este efecto también puede tener consecuencias negativas, como el enfriamiento excesivo en la superficie terrestre, que afecta la dinámica de la atmósfera baja (Malhotra & Aulakh, 2023).

2.2.1.9.3. Comparación de los efectos del PM2.5 y PM10

Aunque tanto el PM2.5 como el PM10 afectan la temperatura, sus mecanismos y magnitudes de impacto son diferentes. El PM2.5, debido a su menor tamaño, tiene una mayor capacidad de penetración en la atmósfera y de interacción con la radiación solar, lo que genera un impacto significativo en el calentamiento global y en la modificación de las nubes. Por otro lado, el PM10, al ser más grande, tiende a tener un efecto enfriador más directo y localizado. Estas diferencias resaltan la necesidad de considerar tanto el tamaño como la composición del material particulado al evaluar su influencia en la temperatura y en el cambio climático (Asghar et al., 2024).

Es así, que el material particulado PM2.5 Y PM10 desempeñan un papel fundamental en la regulación de la temperatura atmosférica, actuando mediante mecanismos complejos de absorción, reflexión y modificación de nubes. Mientras que el PM2.5 contribuye significativamente al calentamiento local y regional, el PM10 tiene un efecto predominantemente enfriador. Comprender estas interacciones es crucial para desarrollar estrategias efectivas de mitigación y adaptación frente al cambio climático (Rita et al., 2019).

2.2.1.9.4. Tipos de material particulado y sus impactos diferenciados en la temperatura

✓ Material particulado de origen antropogénico

Estas partículas, principalmente PM2.5, incluyen contaminantes como el carbono negro y los compuestos orgánicos volátiles. Su capacidad para absorber radiación incrementa las temperaturas locales (Lala et al., 2023).

✓ Material particulado natural

Partículas como el polvo mineral y aerosoles marinos tienen un impacto térmico más variado. Pueden reflejar radiación y contribuir al enfriamiento, pero también pueden modificar

patrones meteorológicos al alterar la formación de nubes (Lala et al., 2023).

2.2.1.9.5. Efectos directos e indirectos del material particulado en la temperatura

✓ Efectos directos

Ocurren cuando las partículas interactúan directamente con la radiación. Por ejemplo, el carbono negro aumenta la absorción de calor en la atmósfera, mientras que los sulfatos reflejan la luz solar, enfriando la superficie terrestre, estas interacciones generan desequilibrios locales en la temperatura (Osimobi et al., 2019).

✓ Efectos indirectos

El material particulado también afecta las propiedades de las nubes al actuar como nucleadores de condensación, esto puede incrementar el albedo de las nubes, reflejando más radiación solar al espacio y generando un efecto de enfriamiento. Sin embargo, una alta concentración de PM puede inhibir la formación de lluvia, lo que exacerba las sequías y aumenta la temperatura superficial en ciertas regiones (Osimobi et al., 2019).

2.2.2. Bases conceptuales

2.2.2.1. Atmósfera

La atmósfera es una envoltura gaseosa que rodea a cuerpos celestes como la Tierra, mantenida en su lugar por la fuerza de gravedad. Esta capa cumple funciones esenciales, como filtrar la radiación ultravioleta del sol, regular la temperatura del planeta y actuar como escudo frente al impacto de meteoritos (Lala et al., 2023).

2.2.2.2. Contaminación del aire

La contaminación del aire engloba sustancias o fuentes de energía que pueden suponer distintos niveles de riesgo, daño o perturbación para los seres vivos. Además, la contaminación atmosférica tiene impactos directos que pueden incluir el desarrollo de enfermedades, el deterioro de la diversidad humana y biológica, así como la reducción de la

visibilidad u olores desagradables en altas concentraciones (Robles et al., 2019).

La contaminación atmosférica es el resultado de partículas suspendidas en la atmósfera debido a factores naturales o provocados por el hombre (Robles et al., 2019).

2.2.2.3. Material particulado

Las partículas en la atmósfera se identifican por su tamaño, forma y composición química. Los componentes de las partículas pueden ser líquidos o sólidos, esféricos u ovalados y pueden comprender una mezcla de compuestos y fases internos. Las partículas pueden producirse en la atmósfera o crearse mediante procesos físico-químicos dentro de ella, lo que da lugar a diferentes tamaños y composiciones (Warren, 2018). La mayoría de las partículas finas que se encuentran en el aire son de origen secundario, con fracciones que varían entre 2,5 y 10 μm , y los gases precursores desempeñan un papel vital en los procesos atmosféricos.

Las dos categorías principales de partículas en el aire urbano son sólidas o líquidas que van desde polvo y cenizas hasta metales y polen, del mismo modo se pueden encontrar otros tipos en diferentes concentraciones dentro de los edificios. La PM10 es una partícula con un diámetro aerodinámico de 10 micras (1 μm equivale a una milésima de mm), mientras que la PM2.5 es la más inhalable entre las partículas más pequeñas (Chavez, 2023). El tamaño de las partículas no determina exclusivamente su tipo, ya que están compuestas de diferentes materiales y pueden tener diferentes orígenes. Las partículas PM2,5 de mayor tamaño pueden contener importantes componentes naturales, como las partículas de polvo (polvo sahariano) producidas por el viento del norte de África, frecuente en nuestras latitudes. Sin embargo, las emisiones de los vehículos diésel son la principal fuente de PM2,5.

El material particulado (PM10) comprende el polvo en suspensión o resuspendido procedente de obras de construcción, actividades industriales y carreteras; también tiene un componente biológico, compuesto principalmente por fragmentos de bacterias con lipopolisacáridos y polen. El deterioro de los neumáticos, los frenos y el

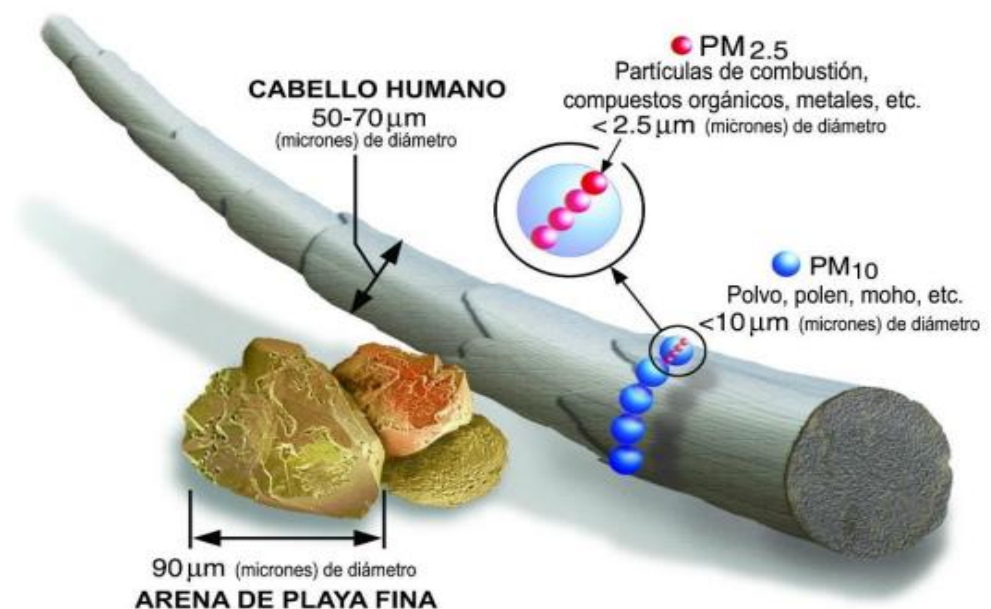
pavimento en las áreas metropolitanas genera partículas asociadas a la actividad automovilística. El movimiento del viento sobre la corteza terrestre, la minería, la actividad agrícola y el polvo de las carreteras sin asfaltar son factores más significativos en las zonas rurales (Torres & Jim, 2020).

2.2.2.4. Material particulado (PM 2.5)

El PM2.5 se relaciona a las partículas en el aire que están compuestas de varios componentes químicos y tienen un diámetro aerodinámico de menos de 2,5 micrones. Las PM2,5 se compone principalmente de iones solubles en agua, compuestos orgánicos como hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). De estos componentes, el agua representa la mayor parte de la masa de PM2. 5 en un entorno urbano al aire libre (Torres & Jim, 2020).

Figura 11

Análisis del diámetro aerodinámico de la partícula



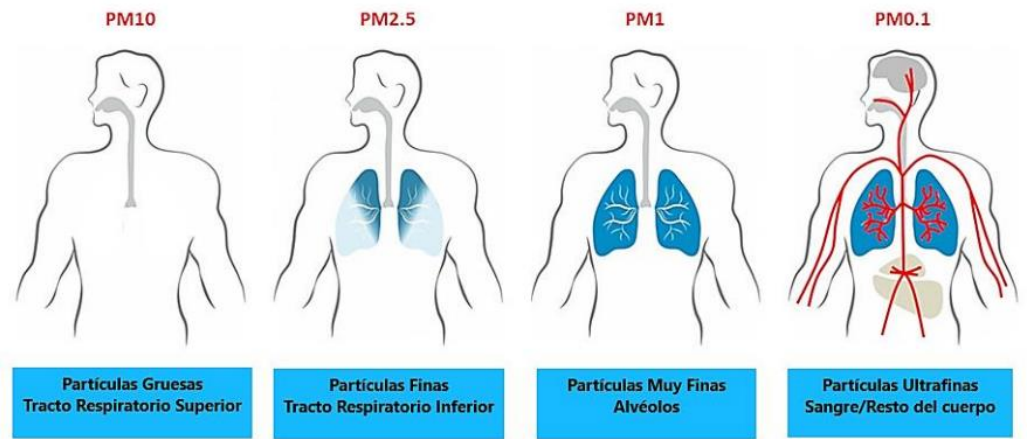
Fuente: (Baena & Campos, 2020).

Dado que las PM 2,5 son totalmente respirables y pueden alojarse en bronquios, bronquiolos y, en ciertos casos, alvéolos, se cree que son el

principal contaminante atmosférico asociado a efectos sobre la salud de los seres humanos (Baena & Campos, 2020). (Figura 2). También puede entrar en el torrente sanguíneo y llegar al hígado, el cerebro y los riñones, poniendo en peligro la salud humana.

Figura 12

Capacidad de que fragmentos de material particulado ingresen al sistema respiratorio



Fuente: (Baena & Campos, 2020).

2.2.2.5. Material particulado (PM 10)

Cualquier partícula en suspensión en el aire con un diámetro aerodinámico igual o inferior a $10 \mu\text{m}$ se denomina material particulado (PM 10). Estas partículas pueden entrar en los pulmones y las vías respiratorias superiores (Torres & Jim, 2020).

Según Robles et al., (2019), las emisiones industriales procedentes de los procesos de fabricación y combustión en las instalaciones industriales son los principales contribuyentes de las PM 10, las cuales son:

- ✓ Vehículos: Emisiones de motores de combustión interna.
- ✓ Las partículas generadas por los vehículos en carreteras sin pavimentar se conocen como polvo de carretera.
- ✓ Procesos de construcción: Polvo producido durante las operaciones de construcción y demolición.
- ✓ La quema de vegetación, cenizas procedentes de incendios forestales y quemaduras de basura.

La exposición prolongada o severa al PM 10 puede tener un impacto negativo en la salud, causando problemas respiratorios, enfermedades cardiovasculares y un agravamiento de trastornos preexistentes como el asma (Osimobi et al., 2019).

2.2.2.6.Temperatura

La temperatura es una de las medidas más importantes para comprender inmediatamente el clima, también afecta la concentración de partículas porque ayuda a crear más reacciones fotoquímicas con otros contaminantes que de otro modo ocurrirían en la precipitación, porque los datos de precipitación son ligeramente más altos. Además, existe una relación proporcional directa entre la temperatura y las partículas, cuanto mayor es la temperatura, mayor es la concentración de partículas (Osimobi et al., 2019).

2.2.2.7.Estándares de Calidad Ambiental - ECA

Se trata de herramientas de gestión medioambiental que se utilizan para estimar la calidad medioambiental del país. Además, el ECA evalúa las concentraciones de componentes o compuestos en el medio ambiente que no suponen un riesgo para el equilibrio ecológico o la salud humana (Valverde, 2015).

2.3. Base legal

2.3.1.1.Ley General del Ambiente (Ley N°28611)- Decreto Supremo N° 002-2009-MINAM

Los ECAS, que se definen en el artículo 31, especifican la cantidad o concentración de sustancias, componentes o características físicas y biológicas en el aire, el agua o el suelo que suponen un daño grave para el ambiente o la salud pública. Dependiendo del parámetro específico de que se trate, las concentraciones o niveles pueden expresarse como un valor máximo, un valor mínimo o un intervalo.

El artículo 118 establece que los gobiernos locales deben tomar medidas preventivas, de seguimiento, de control ambiental y epidemiológico de acuerdo con la situación para asegurar el mantenimiento, mejoramiento

y restablecimiento de la calidad del aire, así como determinar medidas prioritarias en áreas donde la calidad del aire supere las normas.

2.3.1.2. “Decreto Supremo N° 010-2019-MINAM, Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire”

Los parámetros para el diseño de estaciones de monitoreo están establecidos por el protocolo nacional para asegurar una operación eficiente basada en una planificación anticipada y aspectos técnicos. De igual forma, se identifican técnicas adecuadas para monitorear la calidad del aire, junto con consideraciones para su aplicación.

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

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación que se utilizó es la aplicada porque tiene propósitos prácticos inmediatos, con la intención de implementar, modificar, transformar o impulsar la ocurrencia de cambios en la realidad investigada. Para ello, el investigador debe tener en cuenta la aportación de ideas científicas generadas en la investigación básica (Hernández, 2018).

Al comprender el impacto del material particulado en la temperatura del aire, se podrá desarrollar estrategias para controlar o reducir la emisión de partículas. Esto implica cambios en políticas ambientales, prácticas industriales o medidas de mitigación para mejorar la salud pública y el confort climático en Ahuaycha. Además, se debe considerar estudios previos sobre la relación entre el material particulado y la temperatura del aire, así como otros factores ambientales y meteorológicos que puedan influir en esta relación (Osimobi et al., 2019).

3.2. Nivel de investigación

Se empleó el nivel de investigación descriptivo, debido a que pretende describir los rasgos y características más relevantes de cualquier fenómeno de estudio analizado (Yunkor & Ochoa, 2021). Además, es adecuado porque permite detallar y documentar los aspectos más relevantes del impacto del material particulado en la temperatura del aire sin intentar modificar las condiciones observadas.

Cabe resaltar que, el lugar de estudio está enfrentando desafíos relacionados con la calidad del aire y fluctuaciones de temperatura debido a la presencia de material particulado. Este material particulado proviene de diversas fuentes como industrias locales, tráfico vehicular, actividades agrícolas, entre otros. Describir cómo estos factores influyen en la temperatura del aire es crucial para entender la dinámica ambiental del distrito (Torres & Jim, 2020).

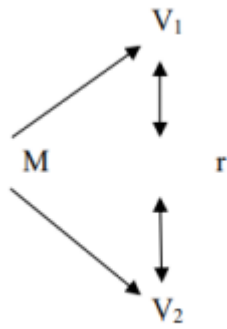
3.3. Método de investigación

Método inductivo: Este procedimiento empieza desde lo específico (descarga de datos de material particulado y temperatura) a lo general (cálculo de correlación entre la concentración de material particulado y temperatura del aire); y a partir de ello determinar y explicar porque existe dependencia entre ambas variables. Los datos referentes al material particulado de 2um y 10um nos lo proporciona el sensor “Profiler” estimándolos en un periodo desde mayo a setiembre del 2024 (Luceño & González, 2015).

3.4. Diseño de investigación

Se empleó el diseño de investigación no experimental, porque no se manipularon las variables, sino que simplemente se observaron y registraron en su estado natural para analizar la relación entre el material particulado (PM2 y PM10) y la temperatura (Sousa et al., 2007).

El investigador emplea el diseño no experimental para observar, describir y analizar el fenómeno sin manipular las variables. No se busca establecer relaciones de causa y efecto, sino entender cómo se comportan las variables en su entorno natural. Este enfoque permite determinar la frecuencia, variación y posible asociación entre fenómenos como el material particulado y la temperatura (Sousa et al., 2007).



Donde:

M= Es la muestra.

O1= Análisis de la variable 1 (Cantidad de partículas de moda fina y gruesa).

O2= Análisis de la variable 2 (Temperatura de aire).

r= Correlación entre dichas variables.

3.5. Población, muestra y muestreo

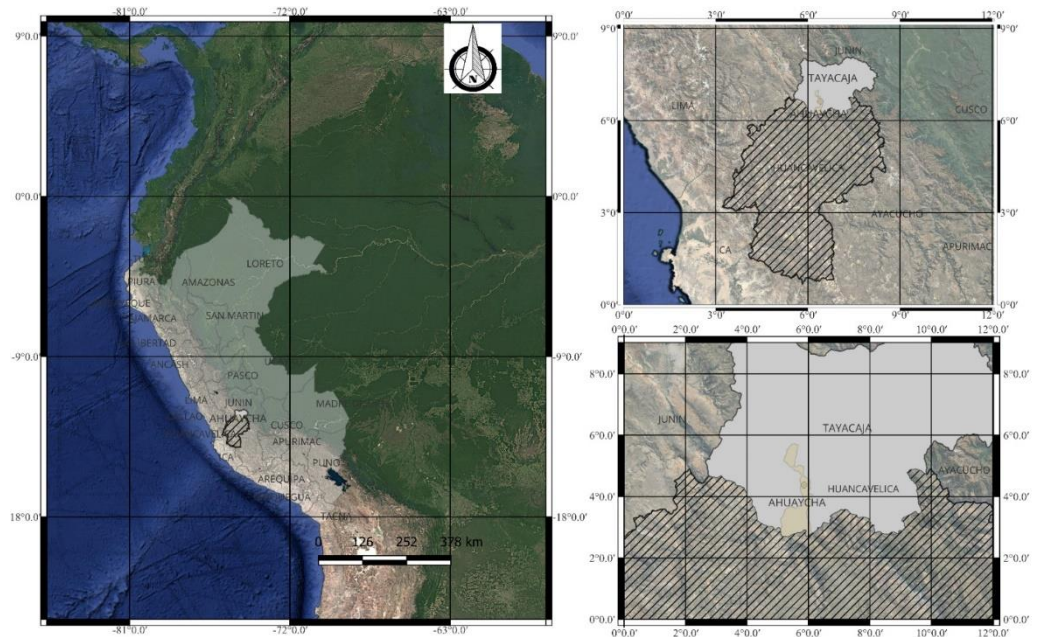
3.5.1. Población

Es la data de material particulado de 2um, 10um y temperatura del aire en la zona rural de Ahuaycha - Tayacaja, durante los meses de mayo a setiembre del 2024.

El lugar de estudio está ubicado a la altura de 3,280 m.s.n.m, en las coordenadas 12°23'45.44" S y 74°53'19.47" O, estos datos geográficos son fundamental para entender el efecto del material particulado (2um y 10 um) con la temperatura en el distrito de Ahuaycha.

Figura 13

Mapa del distrito de Ahuaycha



Nota. Elaboración propia (2024).

3.5.2. Muestra

La muestra se consideró a toda la data diaria del material particulado (2um y 10um) y de la temperatura, durante los meses de mayo hasta setiembre de 2024.

El punto de muestreo elegido es la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja que se encuentra ubicada en el distrito de Ahuaycha, provincia de Tayacaja, departamento de Huancavelica. Según un estudio de la Municipalidad de Ahuaycha, por afueras de universidad transitan en promedio diario 100 vehículos. Adicionalmente, se encuentra rodeada de otras vías que debido al desarrollo de la zona son altamente transitadas, por ello se planteó ubicar los equipos en la parte aérea de la facultad de Ciencias de la Salud, estos puntos debían contar con una conexión eléctrica y de internet para asegurar el funcionamiento de los sensores y de la trasmisión de los datos.

El monitoreo empezó el 1 de mayo del 2024 y finalizó el 30 de septiembre del 2024, para un aproximado de 5 meses, en las cuales se pudo experimentar tanto temporada de lluvias como temporada seca, que representa un periodo significativo y se asemeja a los protocolos y estándares de la calidad del aire.

3.5.3. Muestreo

Muestreo por conveniencia.

3.6. Identificación y operacionalización de variables

Variable independiente: Material particulado

- Material particulado menor a 10um y mayor a 2.um.
- Material particulado menor a 2um.

Variable dependiente: Temperatura del aire

Tabla 2

Matriz de Operacionalización de las variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida	Instrumento
Variable independiente Material particulado	El término material particulado (PM) se refiere a partículas discretas (gotas de líquido o sólido) de un amplio rango de tamaños.	Para determinar el material particulado suspendido en la atmósfera se ha utilizado el Medidor Portátil De Material	Material particulado de 2um	Material particulado de 2um	Número de partícula/cm ³	Ficha de recolección de datos. Sensor de colector de
	La atmósfera produce partículas secundarias mediante la conversión de emisiones gaseosas como óxidos de azufre y nitrógeno, que luego son filtradas por partículas primarias directamente al aire, mientras que los materiales secundarios se transforman en compuestos orgánicos volátiles. A efectos reglamentarios, las partículas en suspensión suelen denominarse	Particulado, siguiendo un protocolo establecido (Robles et al., 2019).	Material particulado de 10um	Material particulado de 10um	Número de partícula/cm ³	material particulado

Variable dependiente Temperatura del aire	<p>PM2.5 o PM10 (Díaz & Páez, 2006).</p> <p>Es la magnitud que revela la cantidad de calor de un cuerpo atmosférico (Smith & Romero, 2016).</p>	<p>Para determinar la temperatura del aire se ha utilizado la estación meteorológica (Robles et al., 2019).</p>	T°	Temperatura de aire	°C	Estación meteorológica
--	---	---	----	---------------------	----	------------------------

3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.7.1. Técnicas

En la investigación se empleará la técnica de la observación, que significa observar de forma detenida y atenta el fenómeno de estudio para proceder a registrar la información, y realizar su respectivo análisis (Hernández, 2018).

3.7.1.1.Pre-monitoreo

En la fase de pre monitoreo, se empezó con la preparación de los equipos, para el Profiler Model 212, se realizó una calibración meticulosa, utilizando patrones de referencia proporcionados por el Protocolo, este proceso es fundamental para asegurar que las mediciones de PM2 y PM10 sean precisas. Además, se verifico que todos los componentes del medidor estuvieran en óptimas condiciones de funcionamiento, lo que incluye la revisión de filtros y sensores.

Antes de realizar la medición, se identificó el número y la ubicación del punto de monitoreo. Las estaciones de monitoreo se instalaron en áreas despejadas, asegurando un espacio mínimo de 10 metros alrededor del equipo, sin la interferencia de árboles o edificios que pudieran afectar las mediciones, por ello se ubicó en las coordenadas de -12.4 en latitud y -74.89 en longitud. Se observó la existencia de una carretera sin asfaltar con un alto tráfico vehicular, lo que podría dispersar el material particulado en diferentes direcciones y dificultar su recolección. Por esta razón, se decidió ubicar la estación de monitoreo a una distancia de 10 metros de la carretera, operando durante un mínimo de 24 horas para ambos parámetros entre mayo y septiembre de 2024.

3.7.1.2.Monitoreo

Durante la fase de monitoreo, se empezó con la recolección de datos en tiempo real, el equipo Profiler Model 212 midió continuamente las concentraciones de PM2 y PM10, mientras que la estación Lufft WS601-UMB registró parámetros meteorológicos, incluida la temperatura. Se configuró la frecuencia de muestreo del medidor de

partículas en intervalos de un minuto, siguiendo las directrices del Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad del Aire, esta frecuencia fue fundamental para capturar variaciones en las concentraciones de material particulado a lo largo del día.

A lo largo del monitoreo, se mantuvo un enfoque riguroso en la integridad de los datos, asimismo se implementó un sistema de almacenamiento que aseguraba la captura y salvaguarda la adecuada información. Durante la recolección de datos se realizó, verificaciones periódicas del funcionamiento de ambos equipos, lo que me permitió detectar y corregir cualquier anomalía de inmediato. También se monitoreo continuamente las condiciones ambientales, observando cambios en la temperatura y la velocidad del viento que pudieran influir en las mediciones de calidad del aire

3.7.1.3. Post-monitoreo

Al concluir el periodo de monitoreo, iniciamos un análisis detallado de los datos recolectados, donde los resultados de las concentraciones de PM₂ y PM₁₀, así como las mediciones de temperatura, fueron trasladados al programa de MATLAB para su procesamiento y análisis. Utilizamos el MATLAB para realizar análisis estadísticos, identificar tendencias y correlaciones entre las variables. Esto incluyó el uso de gráficos para visualizar las fluctuaciones en las concentraciones de material particulado a lo largo del tiempo y su relación con las condiciones meteorológicas (temperatura y humedad).

3.7.2. Instrumentos

La estación meteorológica nos permitió obtener datos precisos de la temperatura en tiempo real, estos datos fueron esenciales para analizar cómo el material particulado influye en las variaciones térmicas del área de estudio. La información recopilada nos sirvió para evaluar la relación entre el material particulado y el clima local, contribuyendo así a un mejor entendimiento de los efectos ambientales en la salud y el bienestar de la población.

Figura 14

Estación meteorológica de marca Lufft- WS601-UMB



Fuente: Elaboración propia, 2024.

El medidor de material particulado Profiler nos proporcionó datos esenciales sobre los niveles de material particulado en la atmósfera. Esta información es crucial para evaluar cómo estas partículas influyen en las variaciones de temperatura y, por ende, en el clima local, contribuyendo a un mejor entendimiento de sus impactos ambientales y en la salud de la población.

Figura 15

Medidor de material particulado Profiler Model 212



Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

3.8.1. Trabajo en gabinete

Los resultados de las concentraciones de PM₂ y PM₁₀, así como las mediciones de temperatura, fueron trasladados a programas de MATLAB y PAST para su procesamiento y análisis. Se utilizó el MATLAB para realizar análisis estadísticos y visualizar tendencias, mientras que el software PAST me permitió llevar a cabo análisis adicionales, como pruebas de normalidad y correlaciones entre variables. Esto facilitó la identificación de patrones y la interpretación de los datos obtenidos.

3.8.2. Análisis de datos

Se realizó el análisis clúster para identificar patrones y agrupaciones en las concentraciones de PM₂ y PM₁₀ en relación con las mediciones de temperatura. Este método estadístico permite agrupar observaciones similares en función de características compartidas, facilitando la identificación de tendencias y correlaciones entre las variables. Al aplicar el análisis de clúster, se pudo clasificar los datos en grupos que reflejan distintos niveles de contaminación y sus efectos sobre la temperatura ambiente.

3.9. Aspectos éticos y regulatorios

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

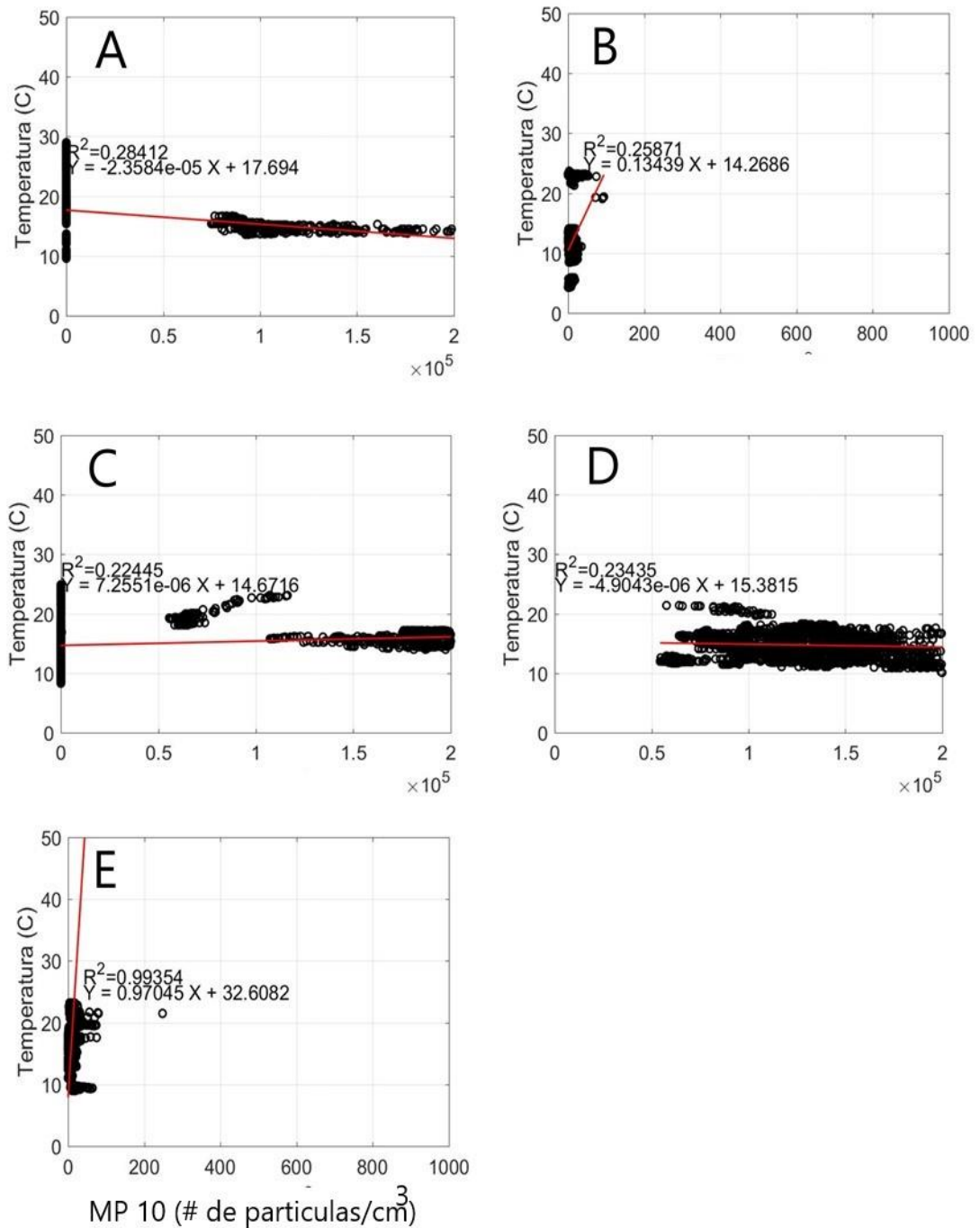
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

La figura 16 muestra cinco gráficos que analizan la correlación entre la concentración de PM10 (número de partículas/cm³) y la temperatura (°C), cada gráfico incluye una regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2), que mide la proporción de la variación en la temperatura explicada por el material particulado (PM10). En los gráficos A (mayo), C (julio) y D (agosto), se observan valores de R^2 entre 0.22 y 0.28, lo que indica una correlación débil, estas relaciones sugieren que, en estas condiciones, el PM10 tiene una influencia limitada en las variaciones de temperatura. Asimismo, las pendientes de las ecuaciones lineales son cercanas a cero, lo que refleja que el cambio en la temperatura es mínimo a pesar de las variaciones en el PM10. El gráfico B (junio) muestra un R^2 de 0.25, también indicando una relación débil, aunque con una pendiente positiva más pronunciada (0.13439), ello refleja una relación más perceptible en ciertas áreas o condiciones específicas, pero sigue siendo insuficiente para establecer una correlación fuerte. Por otro lado, el gráfico E (septiembre) es notablemente diferente, con un R^2 de 0.99, indicando una correlación extremadamente fuerte, aquí, la pendiente (0.97045) muestra que el aumento en la concentración de PM10 se asocia consistentemente con un incremento en la temperatura, este resultado sugiere un vínculo claro entre ambas variables, posiblemente condicionado por factores locales como áreas urbanas densamente contaminadas, donde el PM10 contribuye significativamente al aumento de la temperatura a través de la retención de calor.

Figura 16

Relación entre el material particulado (PM10) y la temperatura (C°) en el mes de mayo-septiembre, 2024



Nota. Elaboración propia (2024). Relación del material particulado PM10 y la temperatura en los meses de mayo (A), junio (B), julio (C), agosto (D) y septiembre (E).

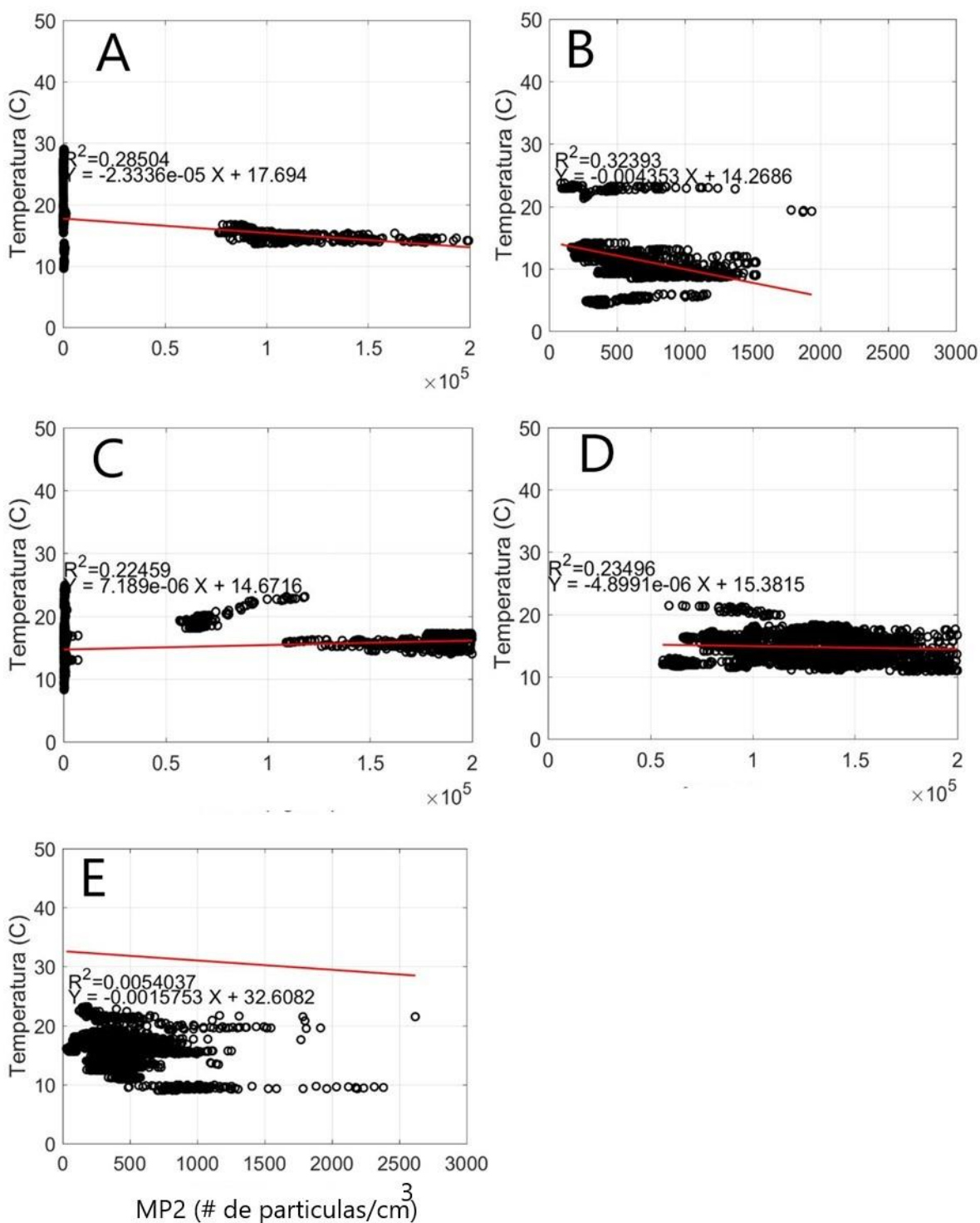
La figura 17 muestra cinco gráficos que analizan la correlación entre los niveles de PM2 (número de partículas/cm³) y la temperatura (°C), cada gráfico incluye una regresión lineal y el coeficiente de determinación (R²), que mide la proporción de la variación en la temperatura explicada por el material particulado (PM2).

En el gráfico A (mayo), el R² es 0.28504, lo que indica una correlación débil entre el PM2 y la temperatura, la pendiente es ligeramente negativa (-2.3336e-05), sugiriendo que un aumento en el PM2 podría asociarse con una leve disminución de la temperatura. Por el contrario, el gráfico B muestra un R² de 0.32393, el mayor entre los cinco gráficos, la pendiente es negativa (-0.004453), lo que señala una relación más marcada entre el incremento del PM2 y una reducción de la temperatura, sin embargo, el valor de R² sigue indicando que otros factores predominan en la determinación de la temperatura. En los gráficos C y D, los valores de R² son 0.22459 y 0.23496, respectivamente, indicando relaciones débiles, las pendientes, cercanas a cero (7.189e-06 y -4.8991e-06), muestran cambios mínimos en la temperatura ante variaciones de PM2, lo que refuerza la idea de una influencia limitada. Finalmente, el gráfico E tiene un R² extremadamente bajo (0.0054037), lo que sugiere una correlación prácticamente inexistente entre PM2 y temperatura.

En general, la figura revela que la relación entre PM2 y la temperatura es débil en la mayoría de los casos, destacándose solo una ligera asociación negativa en el gráfico B, es decir, el PM2 tiene un impacto limitado sobre la temperatura en el periodo estudiado, probablemente debido a la interacción con otros factores climáticos y ambientales.

Figura 17

Relación entre el material particulado (PM2) y la temperatura (C°) en el mes de mayo-septiembre, 2024



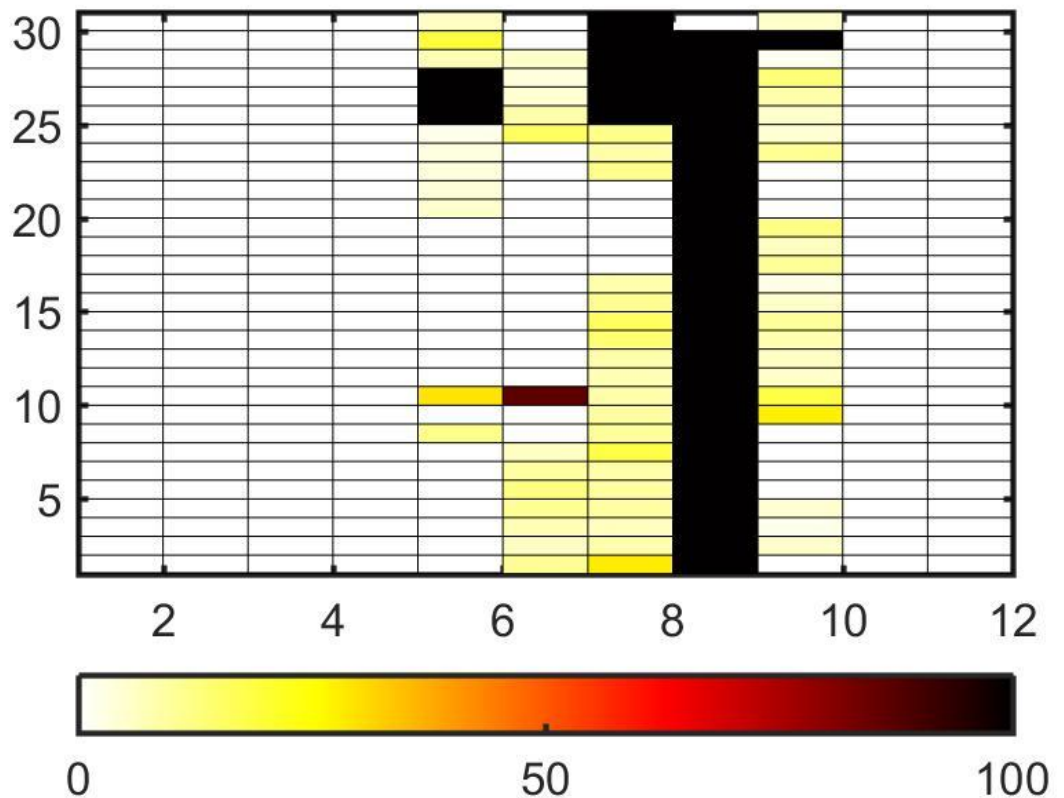
Nota. Elaboración propia (2024). Relación del material particulado PM2 y la temperatura en los meses de mayo (A), junio (B), julio (C), agosto (D) y septiembre (E).

La figura 18 muestra la variación diaria del material particulado (PM10) durante el período de mayo a septiembre de 2024, en el eje horizontal se distribuyen los días del período, mientras que el eje vertical muestra las horas del día. Los colores representan las cantidades de PM10 en número de partículas/cm³, según la escala cromática en la parte inferior, donde el blanco y amarillo reflejan bajos niveles y el rojo y negro indican niveles altos.

Asimismo, se observa que los niveles más elevados de PM10 (en rojo y negro) ocurren entre el 5 y el 10 de junio y en ciertos días de agosto, lo que está relacionado con la quema de biomasa en la región y condiciones meteorológicas adversas, como la reducción de vientos y lluvias, que dificultan la dispersión del material particulado, es decir, estos eventos podrían estar asociados a actividades antrópicas intensas, típicas de la temporada seca.

Figura 18

Variación diaria del material particulado (PM10) de mayo-septiembre, 2024



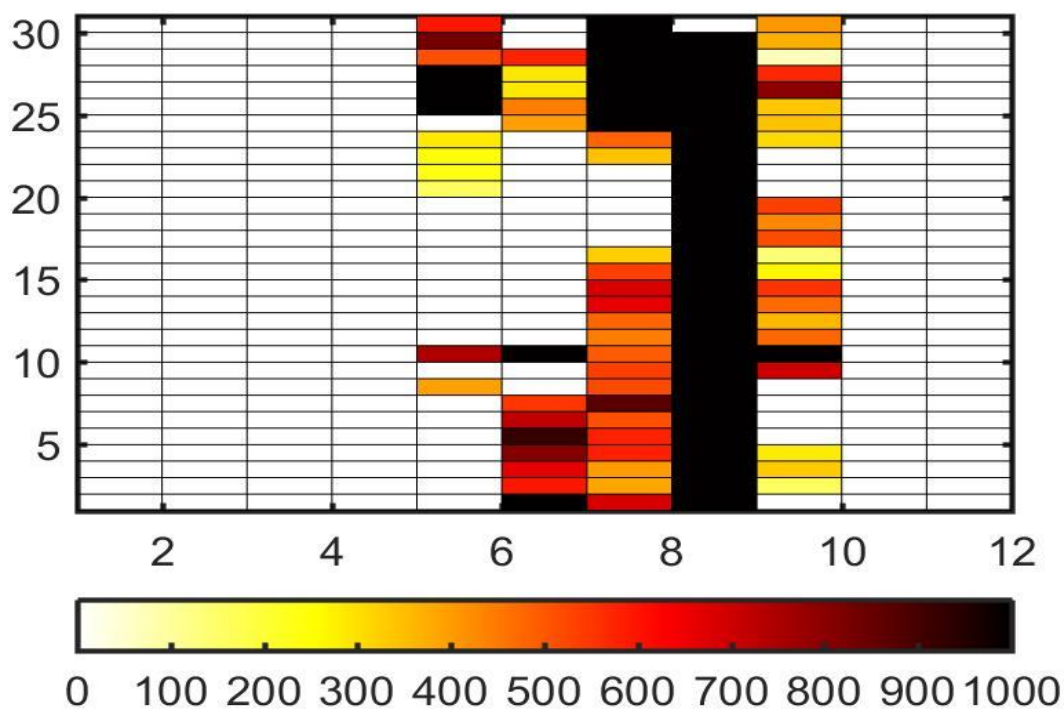
Nota. Elaboración propia (2024). Variación diaria del material particulado (PM10) de mayo a septiembre.

La figura 19 muestra la variación diaria del material particulado (PM2) durante el período de mayo a septiembre de 2024. En el eje horizontal se representan los días del período, mientras que el eje vertical indica las horas del día, los colores reflejan los niveles de PM2 en número de partículas/cm³, de acuerdo con la escala cromática en la parte inferior, donde los tonos más claros (amarillo) indican bajos niveles y los más oscuros (rojo y negro) corresponden a niveles altos.

Se observa que los niveles más elevados de PM2 (en rojo y negro) ocurren predominantemente en las primeras horas de la mañana y en ciertos días específicos, especialmente a mediados de julio y principios de septiembre, estas altas cantidades están asociadas con actividades antropogénicas como la quema de biomasa, así como con condiciones meteorológicas desfavorables, como una menor velocidad del viento y la falta de precipitaciones, que dificultan la dispersión de las partículas. En términos mensuales, agosto es un periodo crítico con mayor frecuencia de días de alta concentración de PM10, mientras que otros meses, como mayo y junio, muestran valores más bajos.

Figura 19

Variación diaria del material particulado (PM2) de mayo-septiembre, 2024

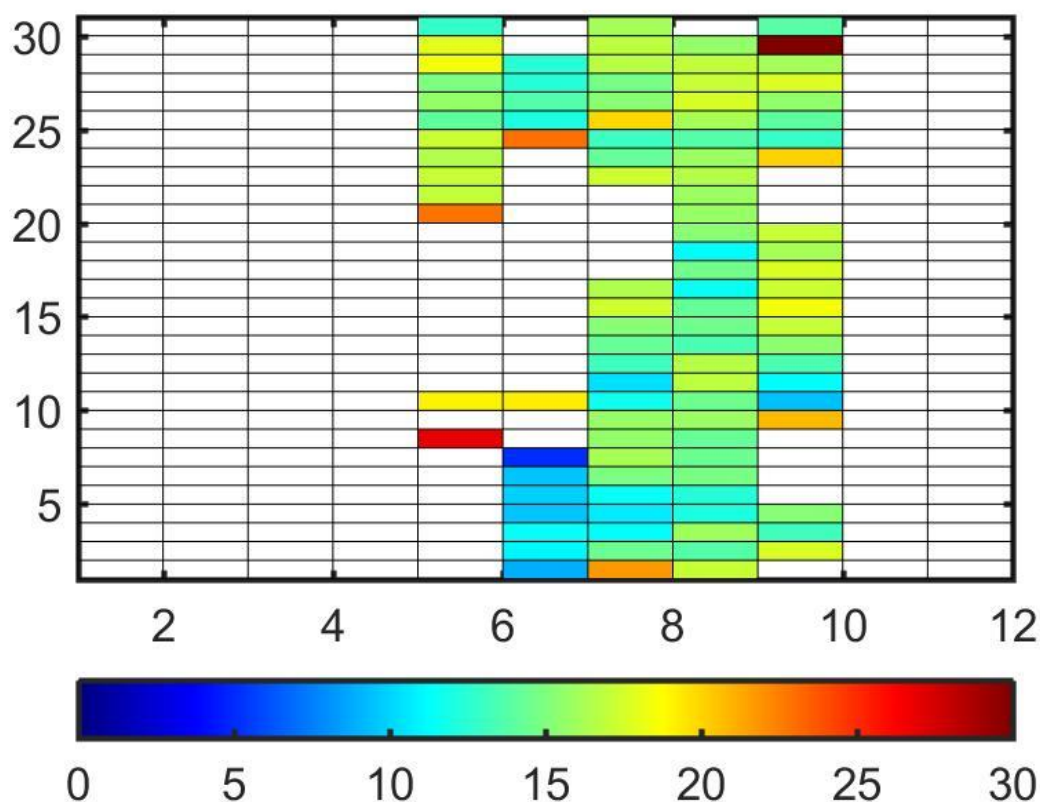


Nota. Elaboración propia (2024). Variación diaria del material particulado (PM2) de mayo a septiembre.

La figura 20 muestra la variación diaria de la temperatura del aire durante el período de mayo a septiembre de 2024. En el eje horizontal se representan los días del período, mientras que en el eje vertical se distribuyen las horas del día, asimismo, los colores reflejan la temperatura en °C, según la escala cromática mostrada en la parte inferior, donde los tonos azules indican temperaturas más bajas y los tonos rojos representan temperaturas más altas. Además, se destaca un patrón térmico característico del distrito, con máximos de temperatura coincidiendo con las horas de mayor radiación solar y mínimos en la madrugada debido a la ausencia de insolación. Durante ciertos días de junio y agosto, las temperaturas más altas están asociadas con periodos de estabilidad atmosférica y cielos despejados, este comportamiento tiene implicaciones directas en la dinámica de dispersión de contaminantes y el confort térmico de la población. Por ello, los eventos de altas temperaturas en combinación con bajos niveles de humedad intensifican condiciones desfavorables para la calidad del aire en el período seco.

Figura 20

Variación diaria de la temperatura de mayo-septiembre, 2024



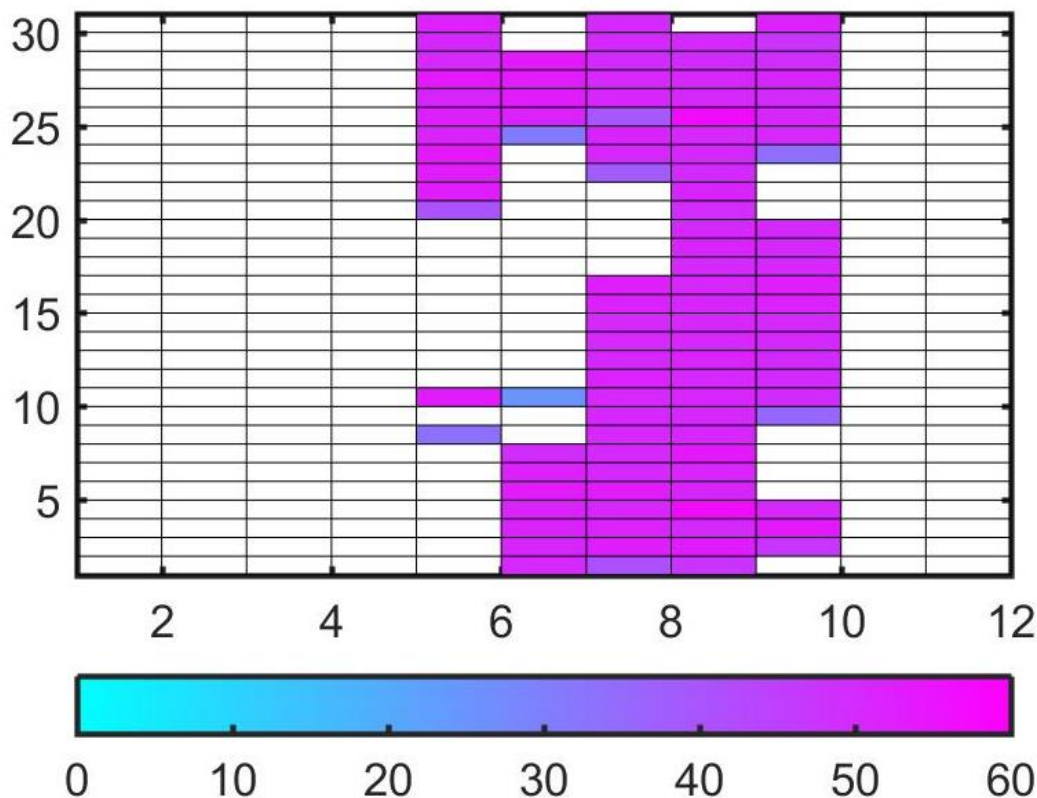
Nota. Elaboración propia (2024). Variación diaria de la temperatura de mayo a septiembre.

La figura 21 muestra la variación diaria de la humedad de mayo a septiembre de 2024. En el eje horizontal se representan los días del período, mientras que en el eje vertical se distribuyen las horas del día, asimismo, los colores indican los niveles de humedad, donde los tonos más oscuros de rosa representan los valores más altos de humedad y los tonos más claros indican valores de humedad más bajos.

Se puede observar un patrón diario característico, con valores de humedad más elevados durante la madrugada y la noche, y valores más bajos durante las horas centrales del día, este comportamiento está relacionado con los cambios en la temperatura a lo largo del día, ya que las temperaturas más altas durante el día provocan una disminución de la humedad relativa. Además, se aprecian algunos días, principalmente en junio y agosto, donde los niveles de humedad se mantienen más elevados a lo largo de todo el día, ello está asociado a eventos meteorológicos como la presencia de nubosidad o precipitaciones que contribuyen a mantener una mayor humedad ambiental.

Figura 21

Variación diaria de la humedad de mayo-septiembre, 2024



Nota. Elaboración propia (2024). Variación diaria de la humedad de mayo a septiembre.

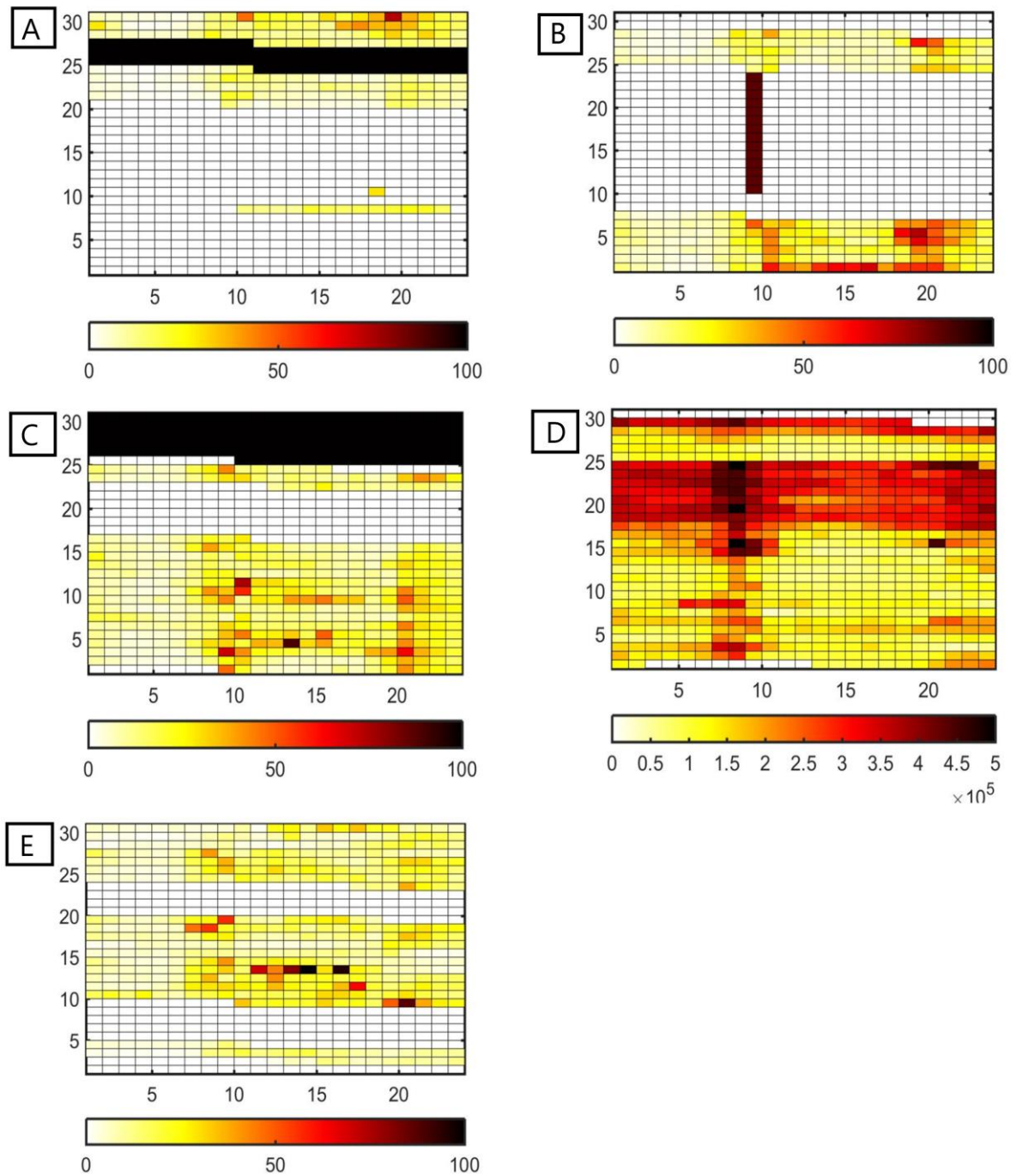
La figura 22 muestra la variación horaria de los niveles de material particulado PM10 durante el período de mayo a septiembre de 2024. Se presenta 5 gráficos mayo (A), junio (B), julio (C), agosto (D) y septiembre (E) que representan diferentes patrones de concentración de PM10 a lo largo del día.

El gráfico A (mayo) muestra un patrón con valores de PM10 más elevados durante las horas centrales del día, entre las 10:00 y las 16:00 horas aproximadamente, y valores más bajos durante la madrugada y la noche, este comportamiento es típico de la dinámica diaria de contaminantes atmosféricos, donde las emisiones y la dispersión varían a lo largo del día. En el gráfico B (junio) se observa un pico de concentración de PM10 que se extiende durante gran parte del día, con valores máximos entre las 12:00 y 18:00 horas, este patrón está asociado a episodios de alta contaminación por material particulado. El gráfico C (julio) muestra una distribución más heterogénea de los niveles de PM10 a lo largo del día, con algunos días presentando valores elevados durante gran parte de la jornada, mientras que en otros días los niveles son más bajos.

El gráfico D (agosto) presenta un patrón similar al observado en el gráfico B, con un pico de concentración de PM10 que se extiende durante la mayor parte del día, sin embargo, en este caso, los valores máximos se alcanzan entre las 14:00 y 20:00 horas aproximadamente. Finalmente, el gráfico E (septiembre) muestra una distribución más uniforme de los niveles de PM10 a lo largo del día, sin presentar picos pronunciados, esto indica una mayor estabilidad en las condiciones que afectan a la dinámica del material particulado durante este período.

Figura 22

Variación horaria del material particulado (PM10) del mes de mayo-septiembre, 2024



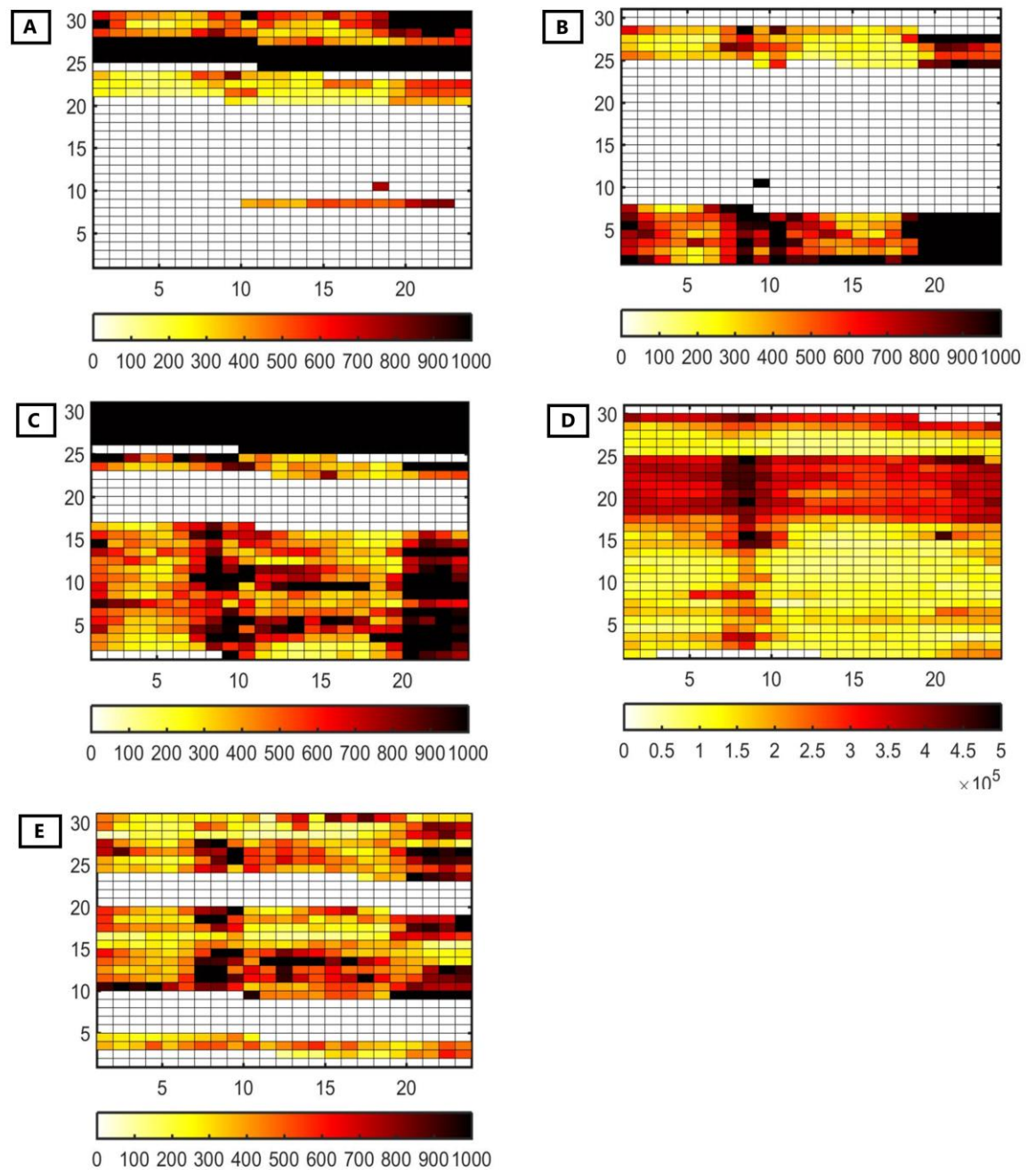
Nota. Elaboración propia (2024). Variación horaria de material particulado (PM10) en los meses de mayo (A), junio (B), julio (C), agosto (D) y septiembre (E).

La figura 23 muestra, la variación horaria de los niveles de material particulado PM2 durante el período de mayo a septiembre de 2024, se presenta 5 gráficos mayo (A), junio (B), julio (C), agosto (D) y septiembre (E) que representan diferentes patrones de concentración de PM10 a lo largo del día.

Al comparar los gráficos A (mayo) y B (junio), se observa una diferencia notable en los patrones de variación diurna de los niveles de PM2, el gráfico A muestra un comportamiento más típico, con valores más altos durante las horas centrales del día y más bajos durante la madrugada y la noche. En contraste, el gráfico B presenta un pico de concentración que se extiende a lo largo de gran parte del día, con valores máximos entre las 12:00 y 18:00 horas, es decir, la presencia de episodios de alta contaminación por material particulado, están relacionados con condiciones meteorológicas desfavorables para la dispersión de los contaminantes. Por otro lado, los gráficos C (julio) y D (agosto) también muestran una distribución más heterogénea de los niveles de PM2 a lo largo del día, en ambos casos, se observan algunos días con valores elevados durante gran parte de la jornada, mientras que en otros días los niveles son más bajos, sin embargo, existe una diferencia en la ubicación del pico de concentración, ya que en el gráfico D este se extiende entre las 14:00 y 20:00 horas, mientras que en el gráfico C la distribución es más variable a lo largo del día. Por último, el gráfico E (septiembre) se distingue de los demás al presentar una distribución más uniforme de los niveles de PM2 a lo largo del día, sin picos pronunciados, esto indica una mayor estabilidad en las condiciones que afectan a la dinámica del material particulado durante este período.

Figura 23

Variación horaria de material particulado (PM2) del mes de mayo-septiembre, 2024

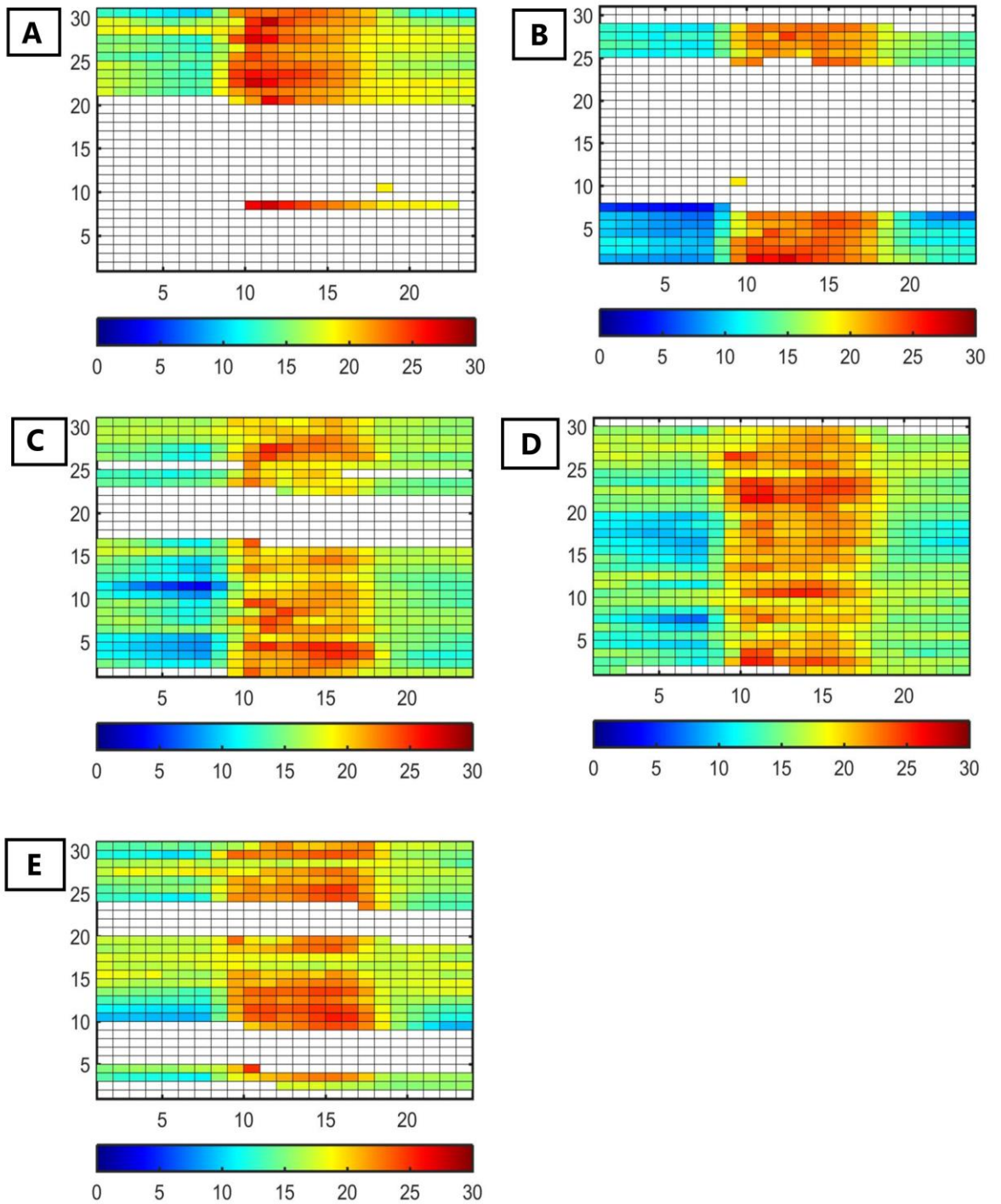


Nota. Elaboración propia (2024). Variación horaria de material particulado (PM2) en los meses de mayo (A), junio (B), julio (C), agosto (D) y septiembre (E).

La figura 24 muestra, la variación horaria de la temperatura durante el período de mayo a septiembre. Se presenta 5 gráficos mayo (A), junio (B), julio (C), agosto (D) y septiembre (E) que representan diferentes patrones de concentración de temperatura. En los gráficos A (mayo) y B (junio), se aprecia que ambos presentan un patrón diurno similar de la temperatura, en ambos casos, se observan valores más bajos durante la madrugada y la noche, con un aumento progresivo a lo largo del día hasta alcanzar un pico máximo entre las 15:00 y 18:00 horas aproximadamente, este comportamiento es típico de la variación térmica diaria. Por otro lado, el gráfico C (julio) muestra una mayor variabilidad en la distribución de la temperatura a lo largo del día, si bien se mantiene el comportamiento general de temperaturas más bajas durante la noche y más altas durante el día, existen algunos días con picos de temperatura más pronunciados y extendidos, relacionados con condiciones meteorológicas específicas. En el caso del gráfico D (agosto), la variación diurna de la temperatura también se observa, pero con una distribución más heterogénea a lo largo de la jornada, algunos días presentan picos de temperatura más marcados y prolongados, en comparación con otros días en los que la distribución es más uniforme. Finalmente, el gráfico E (septiembre) se distingue de los anteriores al mostrar una variación diurna de la temperatura más estable y uniforme, aunque se aprecia el aumento de temperatura durante el día, la distribución a lo largo de la jornada es más homogénea, sin picos tan pronunciados como en los otros gráficos.

Figura 24

Variación horaria de la temperatura del mes de mayo-septiembre, 2024

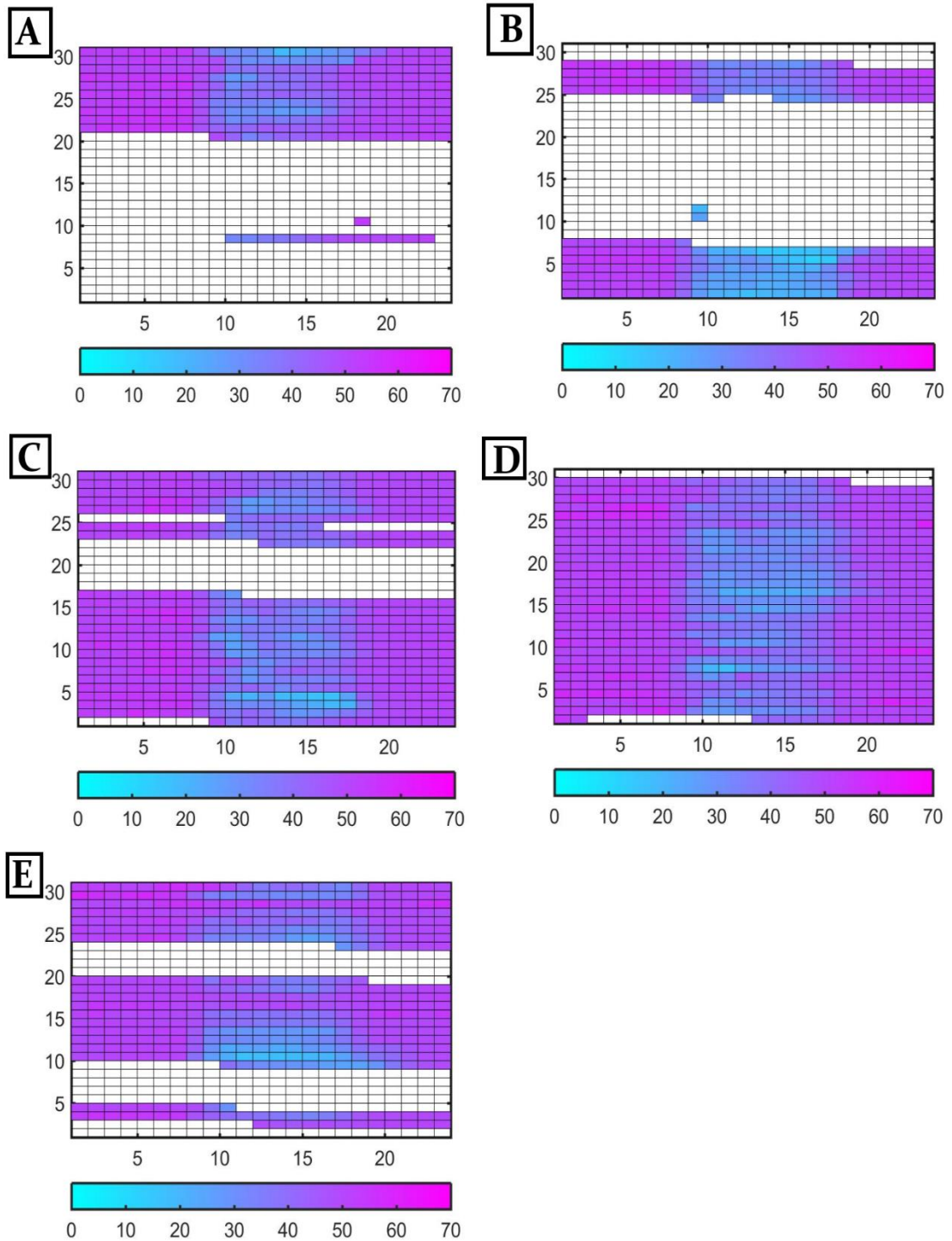


Nota. Elaboración propia (2024). Variación horaria de la temperatura en los meses de mayo (A), junio (B), julio (C), agosto (D) y septiembre (E).

La figura 25 muestra, la variación horaria de la humedad durante el período de mayo a septiembre. Se presenta 5 gráficos mayo (A), junio (B), julio (C), agosto (D) y septiembre (E) que representan diferentes patrones de concentración de la humedad. El gráfico A (mayo) muestra la evolución de la humedad a lo largo del día, desde las 5:00 hasta las 20:00 horas, comienza en niveles bajos, representados por tonos azules, a primera hora de la mañana, sin embargo, a medida que avanza el día, la humedad va aumentando gradualmente, llegando a alcanzar niveles altos, indicados por tonos rosados, hacia el final del período, alrededor de las 20:00 horas. Por otro lado, el gráfico B (junio) muestra que los niveles de humedad se mantienen relativamente estables en un rango medio-alto durante todo el período de 5:00 a 20:00 horas, existe una zona central más intensa en tonos rosados, rodeada de áreas con tonos azules más claros, esto indica que la humedad no experimenta grandes variaciones a lo largo del día, sino que se mantiene en niveles moderadamente altos de manera constante. A diferencia de los dos anteriores, el gráfico C (julio) presenta fluctuaciones en los niveles de humedad a lo largo del día, hay momentos, como alrededor de las 10:00 y las 16:00 horas, en los que la humedad alcanza niveles altos, representados por tonos rosados, sin embargo, en otros momentos, como a las 8:00 y las 14:00 horas, la humedad disminuye, reflejada en tonos azules. En el gráfico D (agosto), los niveles de humedad se mantienen predominantemente bajos, representados por tonos azules, durante todo el período de 5:00 a 20:00 horas, aunque hay algunas pequeñas áreas con tonos rosados, en general la humedad se mantiene en rangos secos a lo largo del día. Finalmente, el gráfico E (septiembre) muestra una tendencia descendente clara en los niveles de humedad, comienza con tonos rosados, indicando altos niveles de humedad a primera hora de la mañana (alrededor de las 5:00 horas), pero luego va disminuyendo gradualmente hasta llegar a tonos azules hacia el final del día (alrededor de las 20:00 horas), esta evolución sugiere un escenario de sequía o condiciones ambientales cada vez más secas a lo largo del día.

Figura 25

Variación horaria de la humedad del mes de mayo-septiembre, 2024

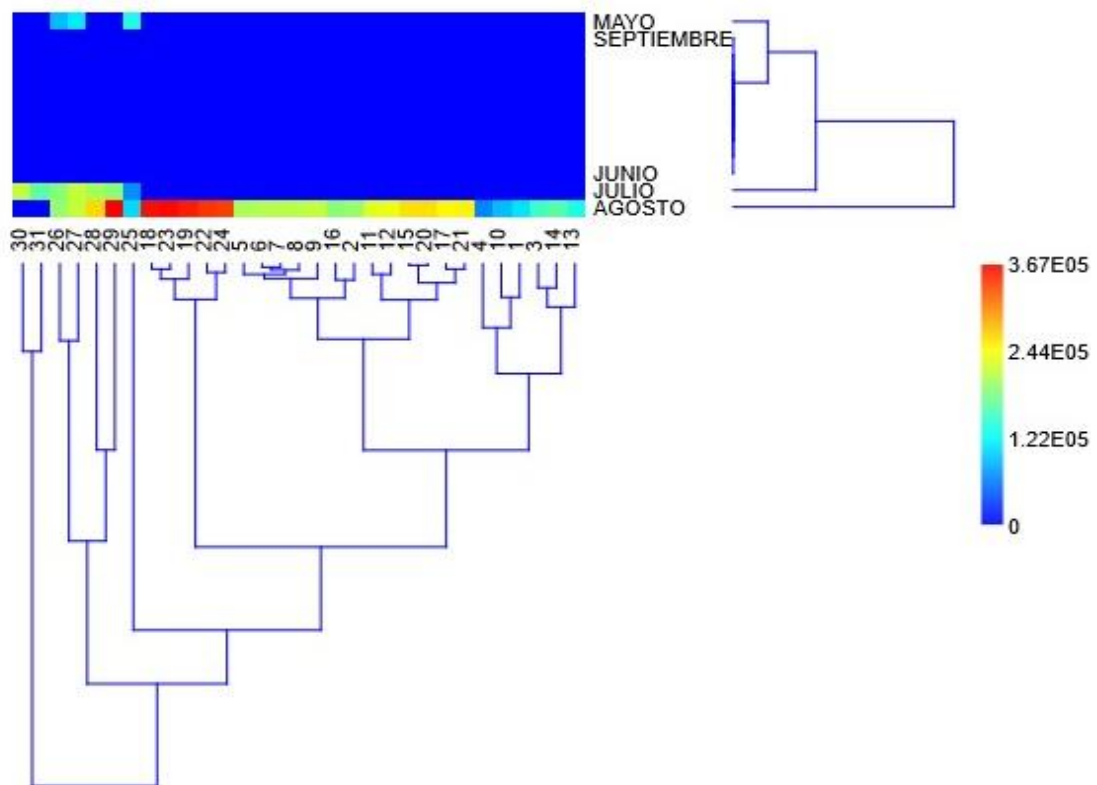


Nota. Elaboración propia (2024). Variación horaria de la humedad en los meses de mayo (A), junio (B), julio (C), agosto (D) y septiembre (E).

La figura 26 presenta el análisis clúster del material particulado (PM10) desde marzo hasta septiembre de 2024, mostrando patrones de concentración en un dendrograma jerárquico y un mapa de calor. Este análisis organiza los datos para identificar similitudes entre meses y días específicos, revelando períodos críticos de contaminación por material particulado (PM10). El mapa de calor utiliza una escala cromática donde el azul representa bajos niveles y el rojo altas, alcanzando valores superiores a 3.67×10^5 . Asimismo, los meses de mayor concentración de PM10 son mayo y septiembre, con picos significativos durante los primeros días de cada mes, lo que está relacionado con cambios estacionales y eventos puntuales como quema de biomasa. En contraste, los meses de junio, julio y agosto muestran niveles más homogéneos y generalmente menores, agrupándose en una rama del dendrograma, lo cual podría asociarse con condiciones climáticas más estables durante el invierno. El análisis destaca la variabilidad intra-mensual, evidenciando días específicos con niveles particularmente altas que necesitan ser monitoreados, este comportamiento subraya la importancia de identificar fuentes locales o eventos específicos para implementar medidas de control.

Figura 26

Análisis clúster del material particulado (PM10) de mayo a septiembre, 2024

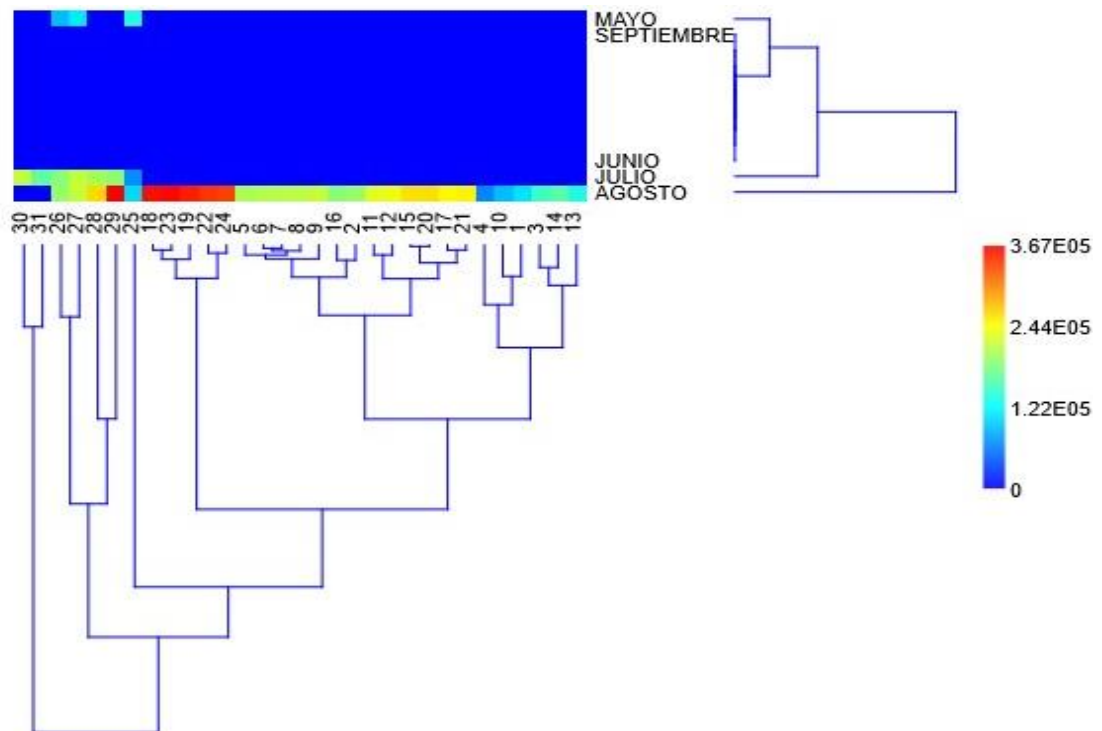


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 27 presenta el análisis clúster del material particulado fino (PM2) desde marzo hasta septiembre de 2024, utilizando un dendrograma jerárquico y un mapa de calor, este análisis permite identificar patrones temporales de concentración del PM2, con los días y meses agrupados según similitudes en sus niveles de contaminación. El mapa de calor utiliza una escala cromática, donde el azul indica bajos niveles y el rojo las más altas, alcanzando valores superiores a 3.67×10^5 . Los meses de mayo y septiembre destacan por tener los niveles más elevados, con picos críticos observados durante los primeros y últimos días de estos meses, asociados con actividades humanas intensivas y condiciones meteorológicas particulares como menor dispersión del aire. En contraste, los meses de junio, julio y agosto muestran niveles más bajos y homogéneas, lo que sugiere una menor presencia de fuentes emisoras o condiciones favorables para la dispersión de partículas durante este período invernal. El dendrograma agrupa a estos tres meses en una rama distinta, mientras que mayo y septiembre forman otro clúster, indicando diferencias significativas en los patrones de contaminación, este análisis resalta la importancia de monitorear los períodos críticos y adoptar medidas específicas para reducir los niveles de PM2, un contaminante relacionado con riesgos para la salud pública.

Figura 27

Análisis clúster del material particulado (PM2) de mayo a septiembre, 2024

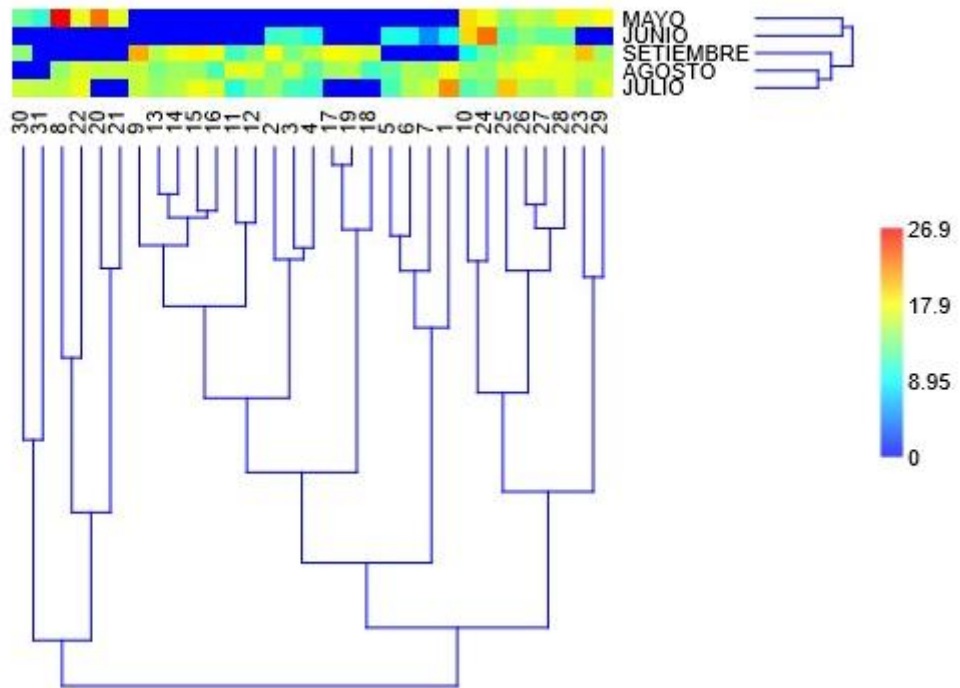


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 28 muestra, el análisis clúster de la temperatura desde marzo hasta septiembre de 2024, destacando las variaciones en los niveles térmicos durante este período y su posible relación con el comportamiento del PM10 y PM2. El mapa de calor utiliza una escala cromática donde el azul representa temperaturas más bajas (cercanas a 0 °C), mientras que los colores cálidos como el rojo indican temperaturas elevadas, alcanzando hasta 37.1 °C en puntos específicos. En términos de meses, junio, julio y agosto presentan las temperaturas más bajas y homogéneas, como se observa en la predominancia del azul en el mapa de calor, estos meses corresponden al invierno austral, caracterizado por temperaturas más frescas, lo cual favorece la dispersión de material particulado en el aire, especialmente de PM2, este comportamiento coincide con los niveles más bajos de material particulado observadas en los análisis anteriores. Por el contrario, mayo y septiembre muestran temperaturas más altas, con picos notables en días específicos representados en colores cálidos, las altas temperaturas en estos meses pueden intensificar procesos como la formación de material particulado secundario y la resuspensión de polvo, lo que contribuye a las mayores cantidades de PM10 y PM2 detectadas en los mismos meses. El análisis de similitud revela que los meses con temperaturas más bajas (junio, julio, agosto) tienen un comportamiento térmico homogéneo y distinto al de mayo y septiembre, que presentan variaciones más extremas, este patrón de comportamiento sugiere una fuerte relación entre la temperatura y los niveles de material particulado, resaltando la importancia de considerar factores climáticos al analizar la contaminación ambiental.

Figura 28

Análisis clúster de la temperatura de mayo a septiembre, 2024

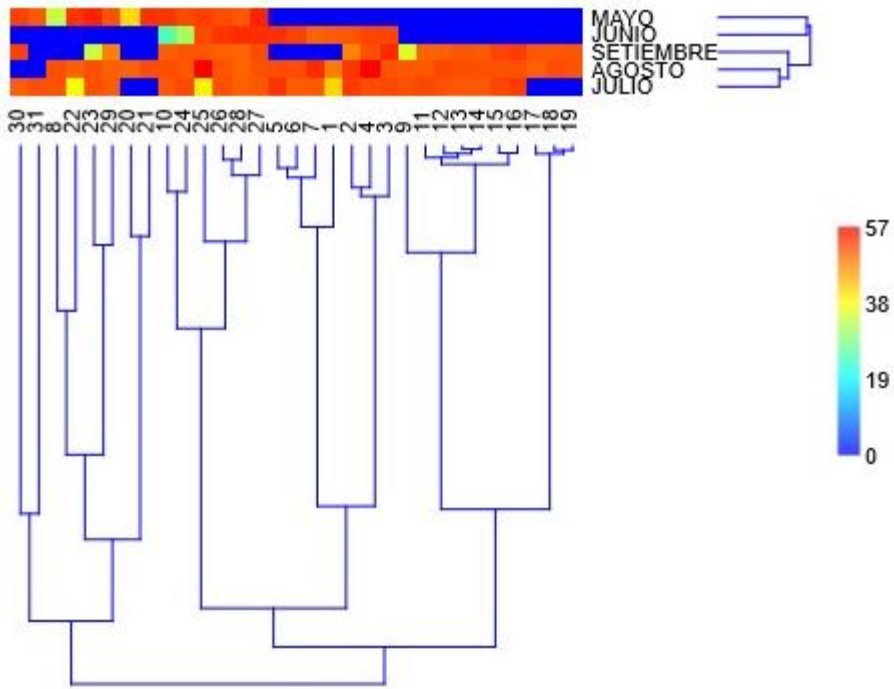


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 29 muestra, el análisis clúster aplicado a los datos de humedad registrados entre marzo y septiembre de 2024, en relación con los niveles de material particulado PM10 y PM2, este tipo de análisis permite identificar agrupaciones de días con patrones similares de comportamiento de humedad, facilitando una comprensión más clara de la relación entre la humedad y los contaminantes atmosféricos. Durante los meses de mayo y junio, se observa un predominio de valores altos de humedad, representados en tonalidades rojas y amarillas en la escala cromática, esto indica que estos meses presentan las condiciones más húmedas del período analizado; por otro lado, los meses de julio, agosto y septiembre muestran valores predominantemente bajos de humedad, representados en azul oscuro, lo que refleja condiciones más secas en esta etapa. En cuanto a los días con mayor y menor humedad, los clústeres identificados en el dendrograma agrupan días consecutivos con comportamientos homogéneos, en los meses húmedos, como mayo y junio, es evidente una menor variabilidad diaria, mientras que, en los meses secos, como agosto y septiembre, los días presentan mayor diversidad en sus valores de humedad relativa. La relación entre la humedad y el material particulado PM10 y PM2 se refleja en la tendencia inversa entre ambas variables, en los meses más húmedos los niveles de PM10 y PM2 disminuyen debido a que la humedad facilita la captura y deposición de partículas en el aire. En contraste, durante los meses más secos, como agosto y septiembre, las cantidades de material particulado aumentan, ya que la baja humedad reduce la eficiencia del proceso de deposición de partículas.

Figura 29

Análisis clúster de la humedad de mayo a septiembre, 2024

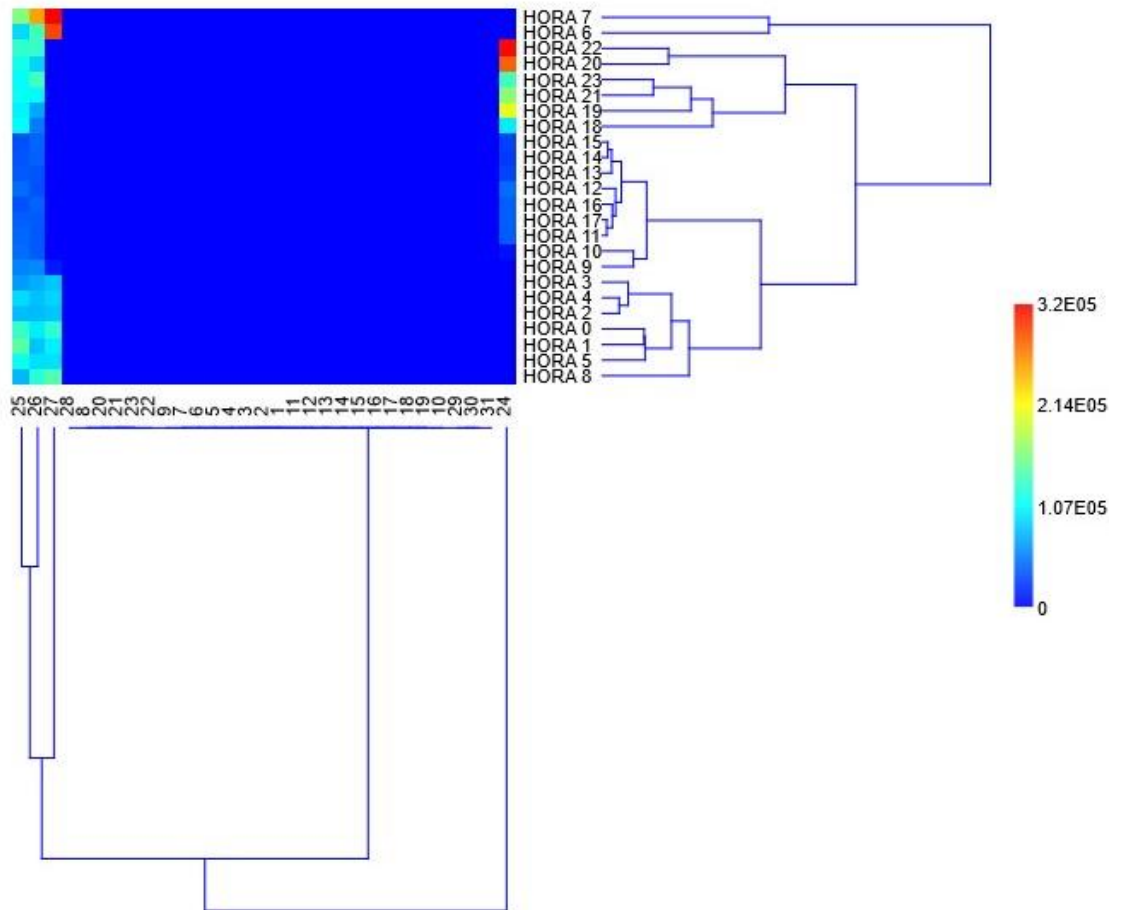


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 30 muestra, un análisis clúster aplicado a la variación horaria del material particulado (PM10) durante el mes de mayo de 2024, este análisis permite identificar patrones de similitud entre las diferentes horas del día, representadas mediante una escala cromática que varía desde valores bajos (azul oscuro) hasta altos (rojo). Se observa que las horas con mayores niveles de PM10, representadas en tonos rojos y amarillos, se concentran principalmente en dos períodos: de 6:00 a.m. a 9:00 a.m., coincidiendo con el inicio de la jornada laboral, y de 5:00 p.m. a 8:00 p.m., que corresponde al horario de salida laboral, durante estos momentos, el incremento en el tráfico vehicular y otras actividades urbanas (agrícolas) generan un aumento significativo en los niveles de contaminación. Por otro lado, las horas con menores niveles de PM10, representadas en tonos azul oscuro, se registran entre 12:00 a.m. y 5:00 a.m., cuando la actividad humana es mínima y las condiciones de estabilidad atmosférica favorecen la dispersión de partículas, también se observan valores relativamente bajos durante algunas horas del mediodía, entre las 11:00 a.m. y 1:00 p.m., posiblemente debido a la mayor dispersión facilitada por los movimientos convectivos generados por el aumento de la temperatura. El dendrograma del análisis clúster agrupa las horas en diferentes categorías según su similitud, por ejemplo, las horas pico con altos niveles de PM10 se agrupan en un mismo clúster, mientras que las horas nocturnas y de madrugada forman un grupo aparte por sus bajos niveles y las horas intermedias, como el mediodía, presentan un comportamiento moderado y se agrupan de forma separada.

Figura 30

Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM10) de mayo, 2024

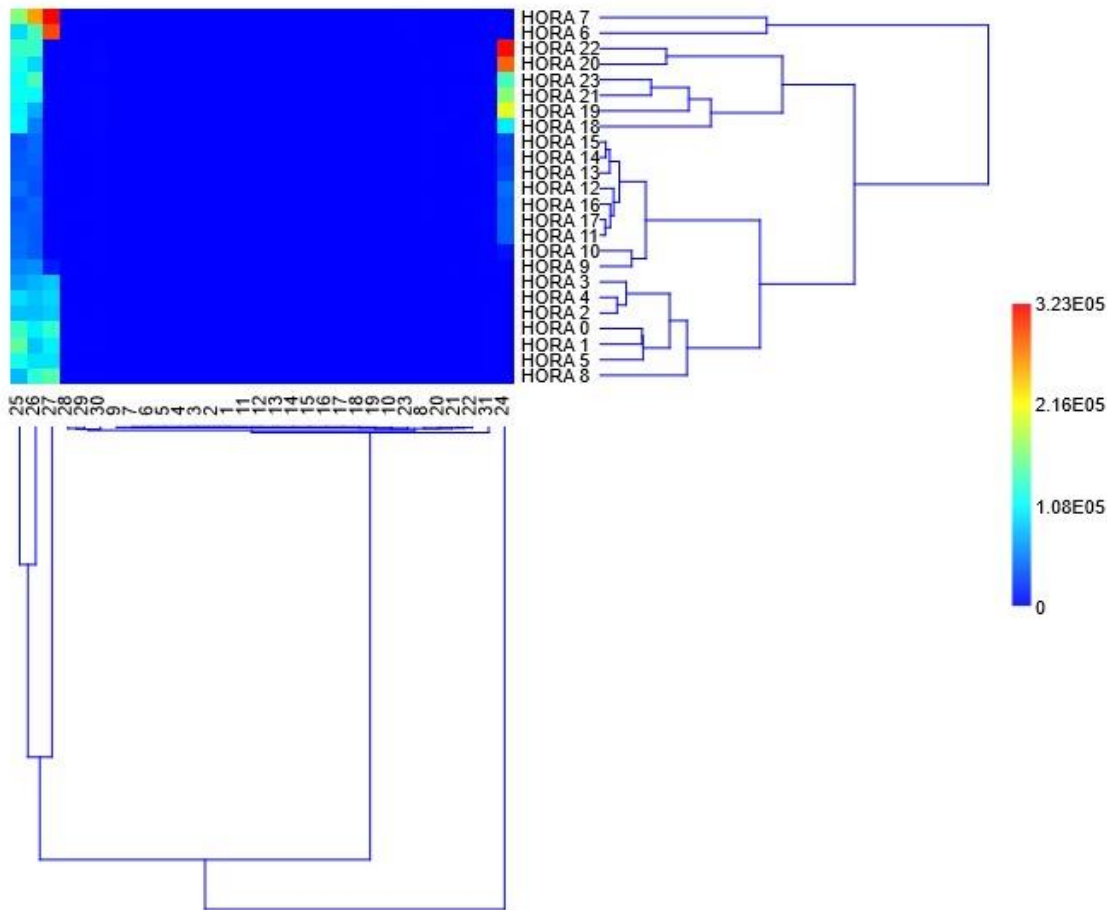


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 31 muestra, un análisis clúster aplicado a la variación horaria del material particulado PM2 durante el mes de marzo de 2024, este análisis permite identificar patrones de similitud entre las diferentes horas del día, representadas mediante una escala cromática que varía desde valores bajos (azul oscuro) hasta altos (rojo intenso). Se observa que las horas con mayores niveles de PM2, representadas en tonos cálidos (rojos y naranjas), se concentran principalmente en dos períodos: de 6:00 a.m. a 9:00 a.m., coincidiendo con el inicio de las actividades matutinas como el tráfico vehicular, y de 5:00 p.m. a 8:00 p.m., que corresponde al horario de salida laboral y otras actividades urbanas intensas, durante estos momentos, el aumento de la contaminación es atribuible al incremento en la movilidad y otras fuentes de emisiones, como quemas agrícolas. Por otro lado, las horas con menores niveles de PM2, representadas en tonos azul oscuro, se registran entre 12:00 a.m. y 5:00 a.m., cuando las actividades humanas son mínimas y las condiciones atmosféricas favorecen la dispersión de partículas. Además, se observan niveles relativamente bajos durante las horas cercanas al mediodía, entre 11:00 a.m. y 1:00 p.m., debido a los movimientos convectivos generados por el calentamiento diurno, lo que mejora la ventilación y dispersión de las partículas. El dendrograma del análisis clúster agrupa las horas en diferentes categorías según su similitud en los niveles de concentración de PM2, por ejemplo, las horas pico con altos niveles de PM2 se agrupan en un clúster distintivo, mientras que las horas nocturnas y de madrugada, caracterizadas por niveles bajos, forman un grupo aparte, de igual manera las horas intermedias, como el mediodía, muestran un comportamiento moderado y son clasificadas en un clúster separado debido a sus características particulares.

Figura 31

Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM2) de mayo, 2024

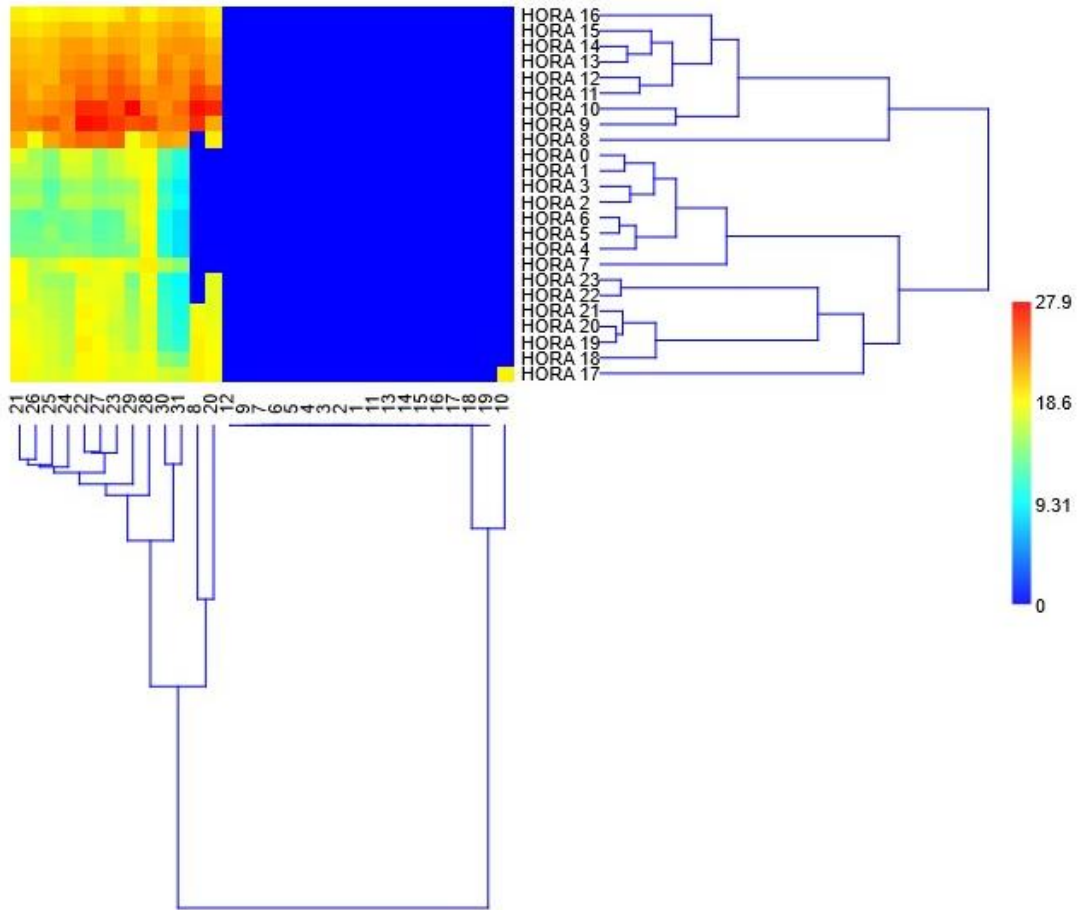


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 32 muestra, un análisis clúster aplicado a la variación horaria de la temperatura en el mes de mayo de 2024, este análisis permite identificar patrones horarios en las temperaturas, las cuales son representadas mediante una escala cromática que varía desde valores bajos (azul oscuro) hasta altos (rojo intenso). En relación a la concentración de material particulado PM2 y PM10, la temperatura juega un papel crucial, ya que influye directamente en la dispersión y acumulación de partículas en la atmósfera. Se observa que las temperaturas más altas, representadas por los tonos rojos y naranjas, ocurren principalmente entre las 11:00 a.m. y 3:00 p.m., un período en el que el calentamiento diurno favorece la dispersión de partículas debido al aumento de movimientos convectivos, esto puede explicar por qué, en este rango horario, se registran menores niveles de PM2 y PM10, tal como se observó en los análisis correspondientes. Por el contrario, las temperaturas más bajas, representadas en tonos azul oscuro, se presentan entre 12:00 a.m. y 6:00 a.m., coincidiendo con las horas de mayor estabilidad atmosférica y menor actividad convectiva, estas condiciones tienden a limitar la dispersión de partículas, resultando en una acumulación más significativa de PM2 y PM10 durante estas horas. Asimismo, el dendrograma del análisis clúster agrupa las horas del día en diferentes categorías según sus patrones de temperatura. Por ejemplo, las horas nocturnas y de madrugada se agrupan en un clúster debido a sus bajas temperaturas, mientras que las horas del mediodía con temperaturas más altas forman un grupo diferenciado, este comportamiento térmico refuerza la relación observada con los patrones de concentración de PM2 y PM10, donde las horas de mayor temperatura coinciden con una mejor dispersión de partículas y las horas más frías con mayor acumulación.

Figura 32

Análisis clúster de la variación horaria de la temperatura de mayo, 2024



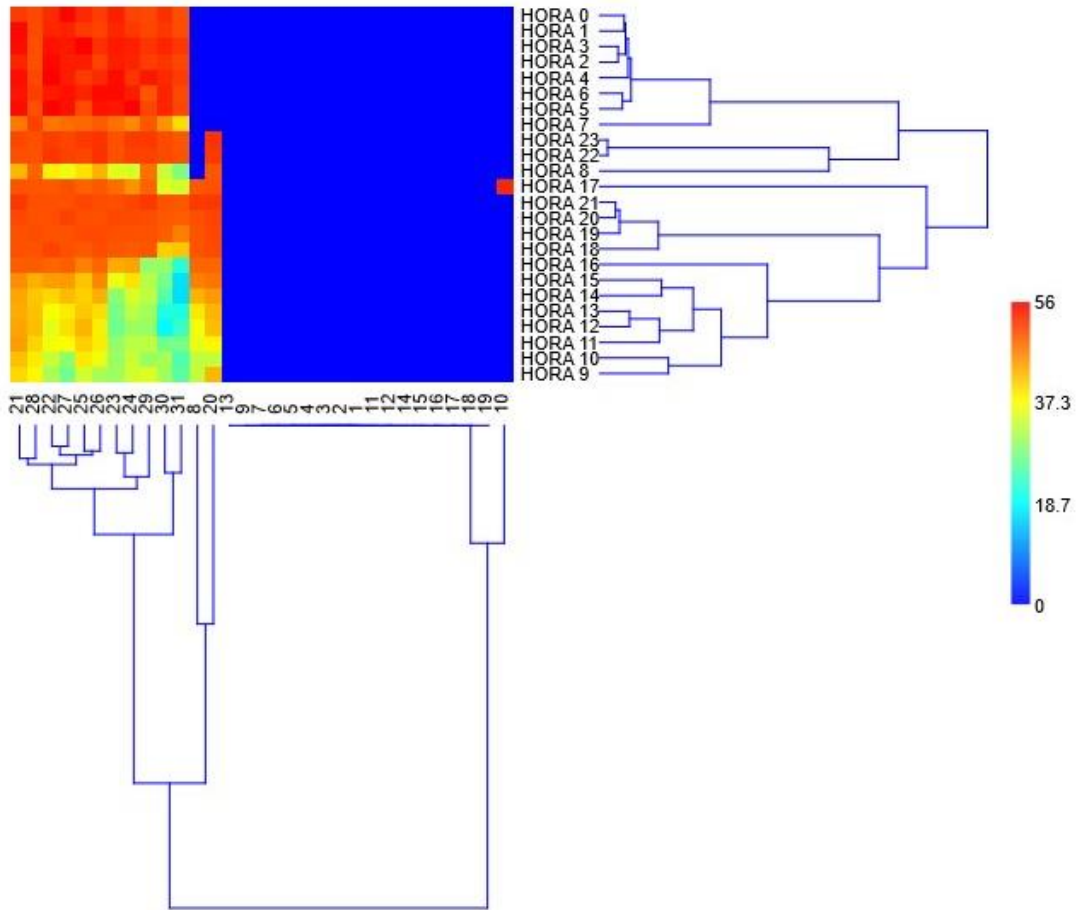
Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 33 muestra, el análisis clúster de la variación horaria de la humedad durante mayo de 2024, este estudio identifica patrones de similitud en los niveles de humedad a lo largo del día mediante una escala cromática, donde los tonos azul oscuro representan valores bajos de humedad, mientras que los tonos amarillos y rojos indican niveles más altos. Se observa que los valores más altos de humedad relativa ocurren principalmente durante la madrugada (entre las 12:00 a.m. y las 6:00 a.m.) y en las horas nocturnas (después de las 8:00 p.m.), este comportamiento puede atribuirse a temperaturas más bajas y la ausencia de radiación solar, lo que favorece un aumento en la humedad. Por otro lado, los valores más bajos de humedad relativa se registran entre las 11:00 a.m. y las 4:00 p.m., coincidiendo con el período de mayor actividad solar, durante estas horas, el calentamiento del suelo y el aire reduce los niveles de humedad relativa debido a un incremento en la evaporación.

Además, durante las horas de alta humedad (madrugada y noche), las partículas tienden a aglomerarse, lo que facilita su deposición y, en consecuencia, reduce su concentración en el aire. Por el contrario, en las horas de baja humedad (mediodía y tarde), el ambiente seco favorece la suspensión de partículas en la atmósfera, lo que puede resultar en mayores niveles de PM₂ y PM₁₀. El dendrograma del análisis clúster refuerza estas observaciones, agrupando las horas del día según sus similitudes, las horas con alta humedad relativa (madrugada y noche) forman un clúster bien definido, evidenciando su comportamiento homogéneo, asimismo, las horas con baja humedad relativa (mediodía y tarde) conforman otro clúster, reflejando las condiciones atmosféricas específicas de este período y finalmente, las horas de transición, como el inicio de la mañana o el final de la tarde, se agrupan en clústeres separados, destacando su variabilidad.

Figura 33

Análisis clúster de la variación horaria de la humedad de mayo, 2024

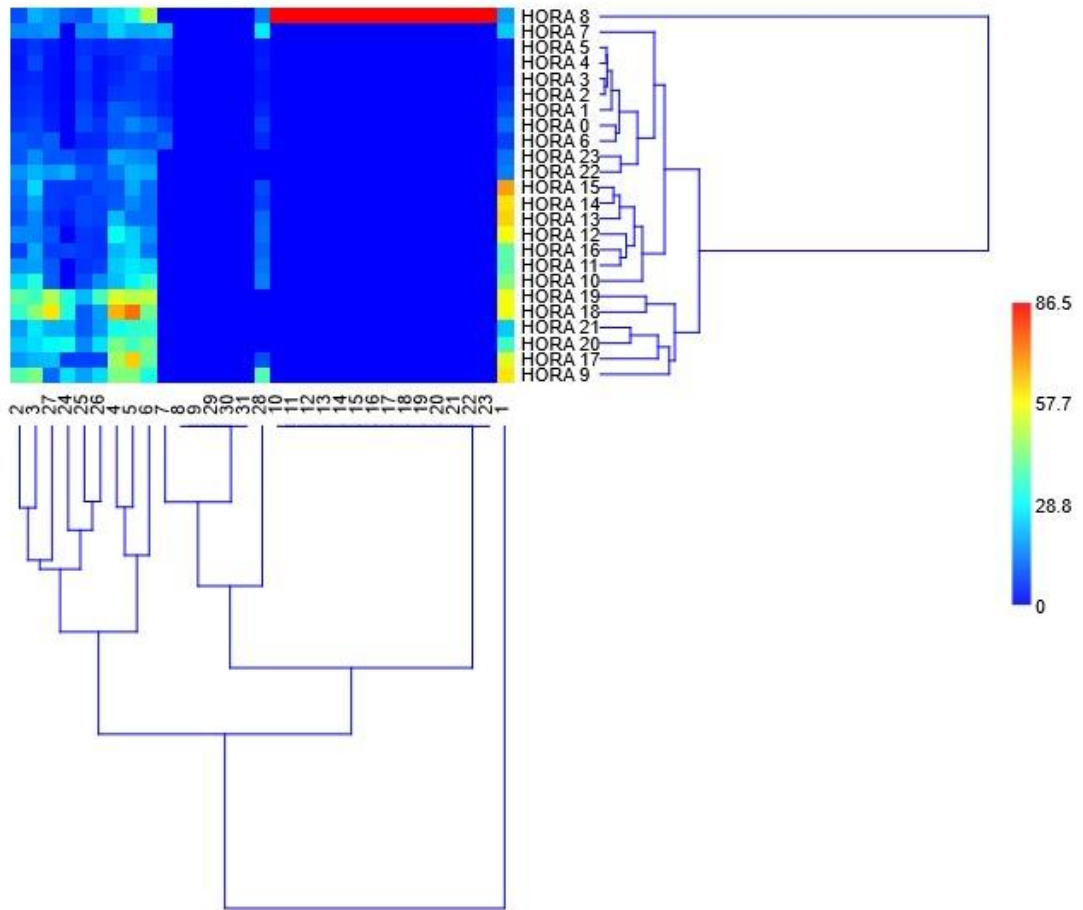


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 34 muestra, un análisis clúster aplicado a la variación horaria del material particulado (PM10) durante el mes de junio de 2024, este análisis utiliza una escala cromática para mostrar los niveles de concentración, donde los valores más bajos están representados en azul oscuro y los valores más altos en tonos amarillos y rojos. Se observa que las horas con mayores niveles de PM10, indicadas por colores rojo y amarillo, se concentran en dos períodos específicos: de 6:00 a.m. a 9:00 a.m., coincidiendo con el inicio de la jornada laboral, y de 5:00 p.m. a 8:00 p.m., que corresponde al horario de salida laboral, durante estos momentos, el incremento en el tráfico vehicular y otras actividades urbanas (agrícolas) genera un aumento significativo en los niveles de contaminación. Por otro lado, las horas con menores niveles de PM10, representadas en azul oscuro, se registran principalmente entre las 12:00 a.m. y las 5:00 a.m., cuando la actividad humana es mínima y las condiciones atmosféricas favorecen la dispersión de partículas, asimismo, se observan valores relativamente bajos entre las 11:00 a.m. y 1:00 p.m., lo que podría explicarse por los movimientos convectivos generados por el aumento de la temperatura, que facilitan la dispersión del material particulado. El dendrograma del análisis clúster agrupa las horas en categorías según sus similitudes en el material particulado (PM10), donde las horas pico con altos niveles forman un clúster distintivo, mientras que las horas nocturnas y de madrugada se agrupan debido a sus bajos niveles de contaminación, por su parte, las horas intermedias, como las del mediodía, presentan comportamientos moderados y se agrupan de forma separada.

Figura 34

Análisis clúster del material particulado (PM10) de junio, 2024

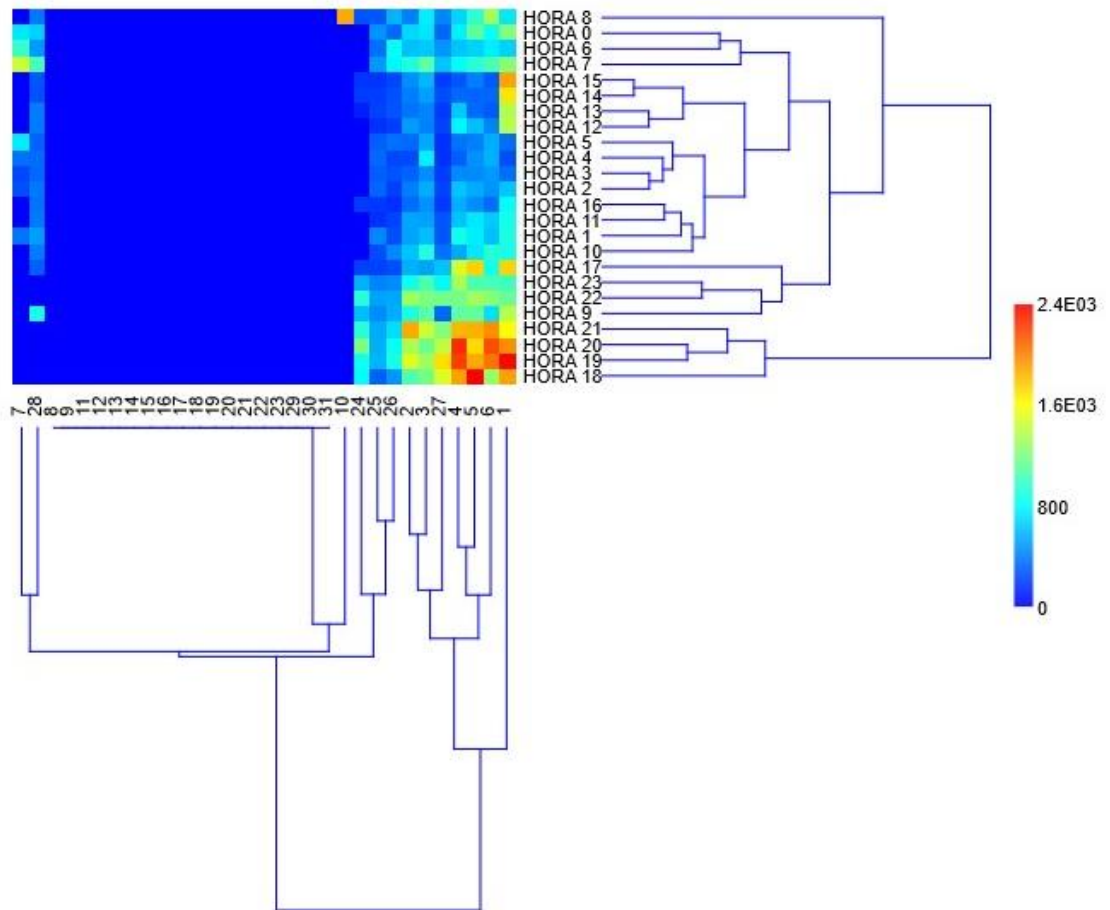


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 35 muestra, muestra un análisis clúster aplicado a la variación horaria del material particulado fino (PM2) durante el mes de junio de 2024, este análisis emplea una escala cromática que oscila desde valores bajos (azul oscuro) hasta altos (rojo intenso) para representar el material particulado (PM2) a lo largo del día. Se puede observar que los mayores niveles de PM2, representadas en tonos rojos y amarillos, se encuentran principalmente en dos intervalos: de 6:00 a.m. a 9:00 a.m. y de 5:00 p.m. a 8:00 p.m, estos períodos coinciden con las horas pico de mayor actividad humana, como el inicio y la salida de la jornada laboral, en estas horas, el incremento en el tráfico vehicular y otras actividades urbanas (agrícolas) genera un notable aumento en las emisiones de partículas finas al ambiente. Por otro lado, los niveles más bajos de PM2, representados en azul oscuro, se registran predominantemente entre las 12:00 a.m. y las 5:00 a.m., cuando la actividad humana disminuye significativamente y las condiciones atmosféricas favorecen la dispersión de partículas, también se identifican valores relativamente bajos alrededor del mediodía, entre las 11:00 a.m. y la 1:00 p.m., lo cual puede atribuirse a la mayor dispersión facilitada por las corrientes convectivas originadas por el aumento de la temperatura. El dendrograma del análisis clúster organiza las horas del día en grupos según las similitudes del material particulado (PM2), donde las horas pico de alta concentración se agrupan en un clúster específico, mientras que las horas de la madrugada, caracterizadas por bajos niveles, forman otro grupo, de igual manera las horas intermedias, como las del mediodía, muestran un comportamiento moderado y se agrupan de manera separada, destacando un patrón diferenciado.

Figura 35

Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM2) de junio, 2024

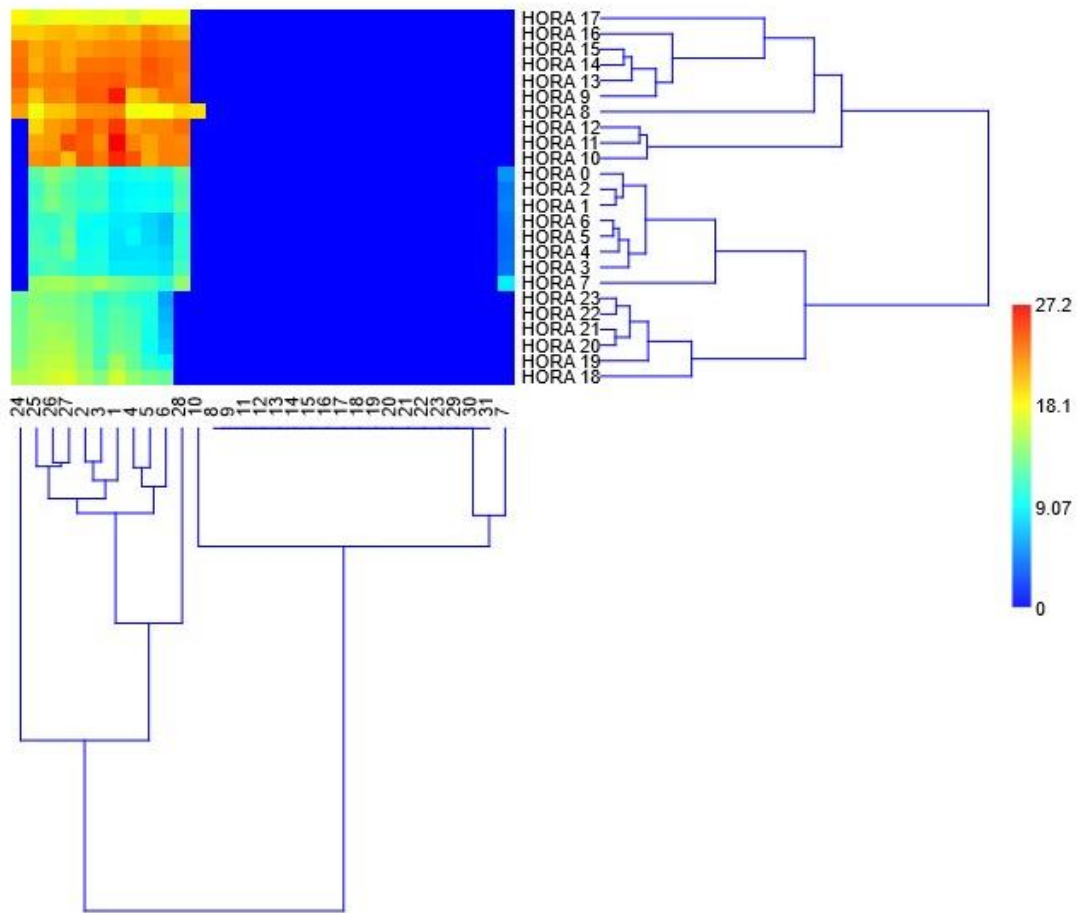


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 36 muestra, el análisis clúster aplicado a la variación horaria de la temperatura durante el mes de junio de 2024, este análisis utiliza una escala cromática que varía desde valores bajos (azul oscuro) hasta altos (rojo intenso), representando así las fluctuaciones de temperatura a lo largo del día. Se observa que las temperaturas más altas, indicadas por tonos rojos y naranjas, se presentan principalmente durante las horas centrales del día, coincidiendo con el período de mayor radiación solar, típicamente entre las 12:00 p.m. y las 3:00 p.m., estas horas reflejan el incremento natural de la temperatura debido al calentamiento diurno. Por otro lado, las temperaturas más bajas, representadas en azul oscuro, se registran durante las horas de la madrugada, entre las 12:00 a.m. y las 6:00 a.m., este descenso en la temperatura se atribuye a la pérdida de calor acumulado durante el día y a la disminución de la radiación solar, también se identifican valores moderados de temperatura, representados en tonos verdes y amarillos, que aparecen en las horas intermedias de la mañana y al anochecer, marcando la transición entre el enfriamiento nocturno y el calentamiento diurno. El dendrograma resultante del análisis clúster organiza las horas del día en diferentes grupos según las similitudes en los patrones de temperatura, en este contexto, las horas con temperaturas máximas forman un clúster específico, mientras que las horas de la madrugada, caracterizadas por temperaturas mínimas, se agrupan en otro, de manera similar, las horas de transición, como las primeras horas de la mañana y las últimas de la tarde, se agrupan de manera independiente, mostrando un comportamiento intermedio.

Figura 36

Análisis clúster de la variación horaria de la temperatura de junio, 2024

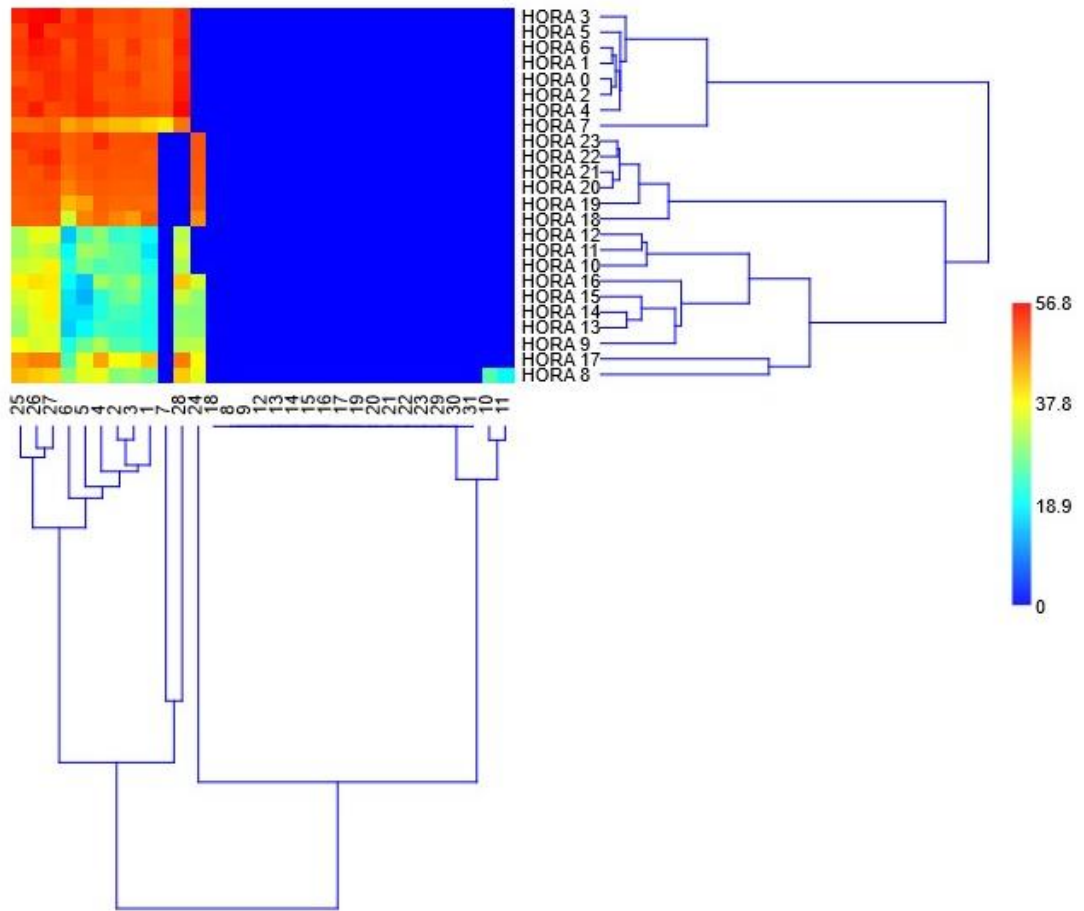


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 37 muestra, el análisis clúster aplicado a la variación horaria de la humedad durante el mes de junio de 2024, el mapa de calor utiliza una escala cromática que varía desde valores bajos (azul oscuro) hasta altos (rojo intenso), indicando los niveles de humedad en diferentes momentos del día. Se observa que los valores más altos de humedad, representados en tonos rojos y naranjas, se concentran predominantemente durante las horas de la madrugada y las primeras horas de la mañana (entre las 12:00 a.m. y las 8:00 a.m.), esto es coherente con las condiciones típicas de ese período, cuando las temperaturas son más bajas y la capacidad del aire para retener vapor de agua disminuye, aumentando así la humedad. En contraste, los valores más bajos de humedad, representados en azul oscuro, se registran principalmente durante las horas centrales del día (aproximadamente entre las 12:00 p.m. y las 5:00 p.m.), este comportamiento está relacionado con el aumento de la temperatura, lo que permite al aire contener más vapor de agua sin alcanzar la saturación, disminuyendo así la humedad. El dendrograma generado por el análisis clúster organiza las horas del día en grupos según los patrones de humedad, por ejemplo, las horas con alta humedad durante la madrugada y la mañana forman un clúster bien definido, mientras que las horas del mediodía y la tarde, caracterizadas por menores niveles de humedad, se agrupan en otro clúster separado, además, las horas de transición, como las primeras horas de la noche, presentan un comportamiento intermedio y se agrupan de forma independiente.

Figura 37

Análisis clúster de la variación horaria de la humedad de junio, 2024

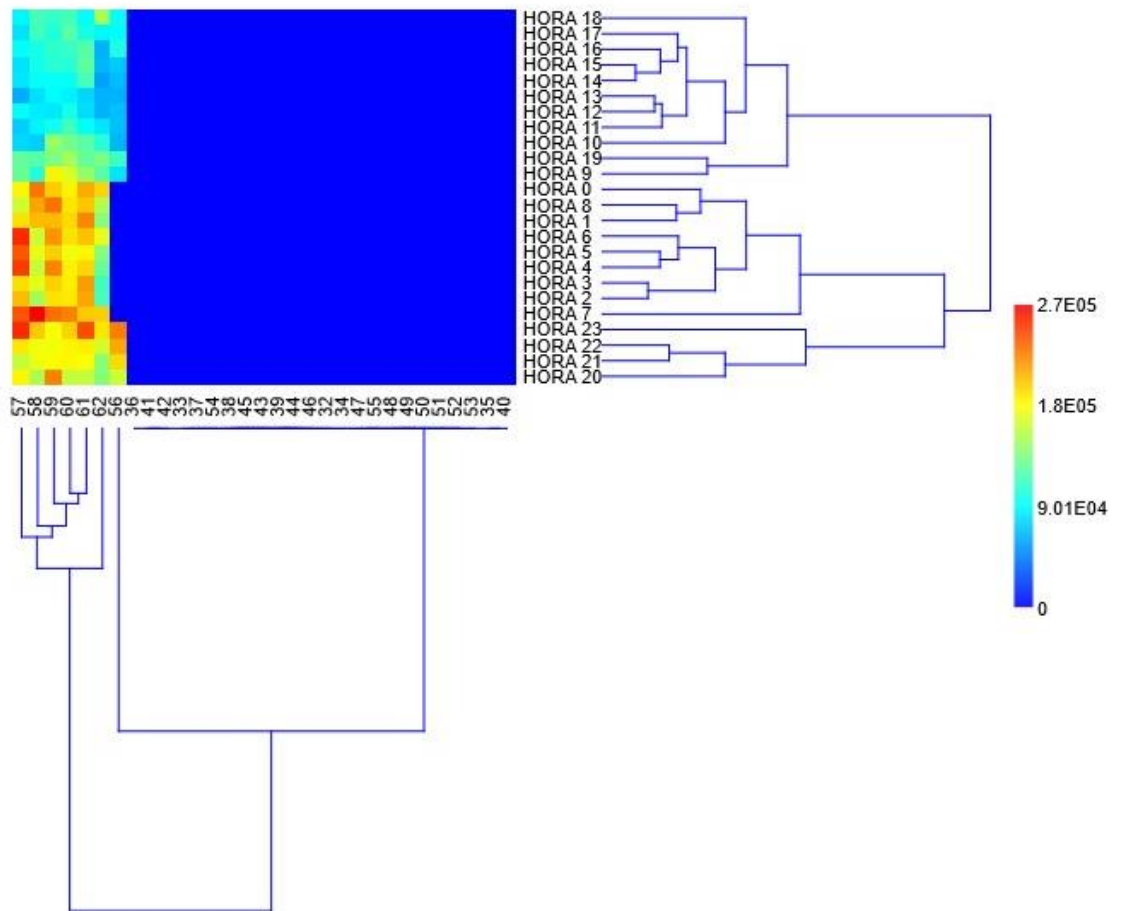


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 38 muestra, el análisis clúster aplicado a la variación horaria del material particulado (PM10) durante el mes de julio de 2024, representado en un mapa de calor con una escala cromática que va desde azul oscuro (valores bajos) hasta rojo intenso (valores altos). Los niveles más altos de PM10, indicados por tonos rojos y naranjas, se concentran principalmente en las horas centrales del día, aproximadamente entre las 10:00 a.m. y las 4:00 p.m., lo cual está relacionado con un aumento de la actividad vehicular o condiciones meteorológicas desfavorables, como baja velocidad del viento. Por otro lado, los valores más bajos, representados por tonos azul oscuro, se observan predominantemente en horas nocturnas y de la madrugada, entre las 10:00 p.m. y las 6:00 a.m., posiblemente debido a una reducción en las emisiones humanas y condiciones que favorecen la dispersión de partículas. El dendrograma generado por el análisis clúster organiza las horas del día en grupos bien definidos: uno con las horas de alta concentración durante el mediodía y la tarde, otro con las horas de baja concentración durante la noche y la madrugada, y un clúster adicional que incluye las horas de transición, como las primeras horas de la mañana y la noche, que presentan un comportamiento intermedio. Este análisis permite identificar patrones claros en la variación horaria del PM10, fundamentales para planificar medidas de control y mitigación.

Figura 38

Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM10) de julio, 2024

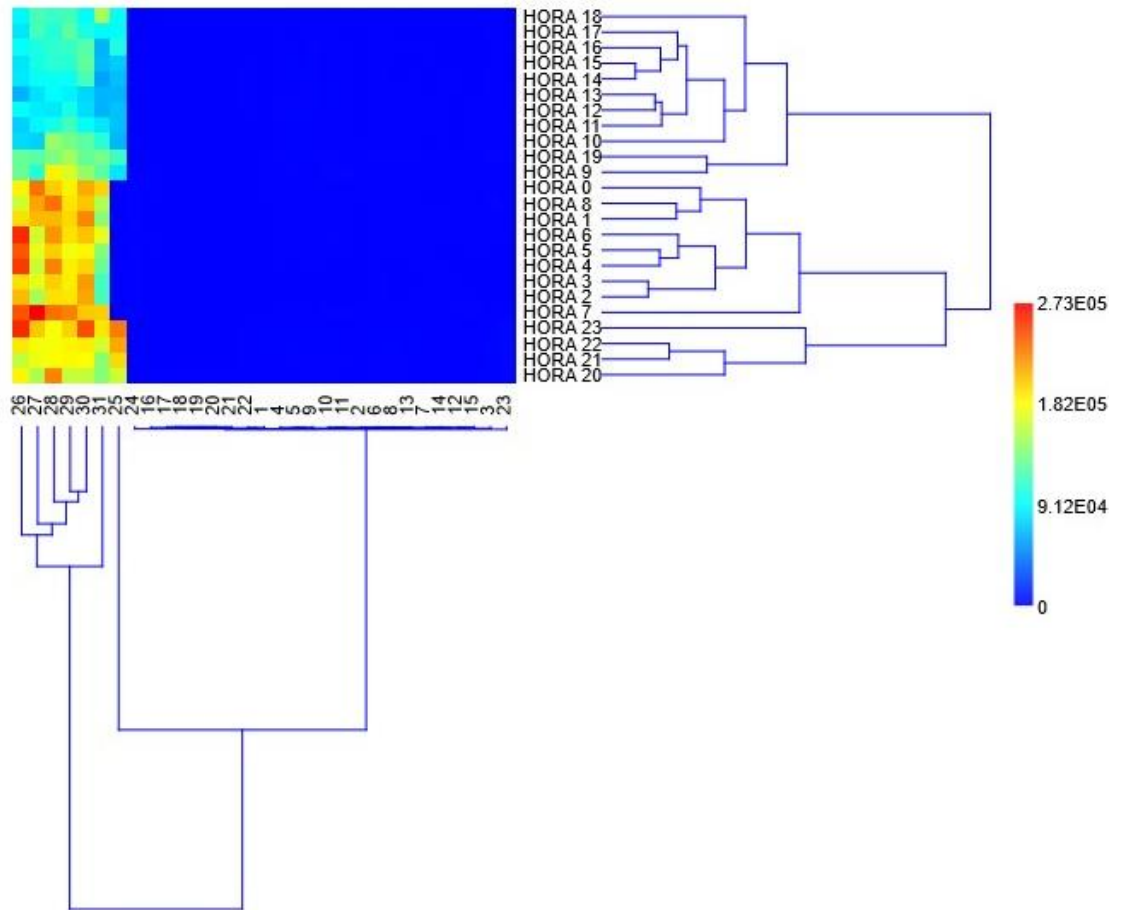


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 39 muestra, el análisis clúster aplicado a la variación horaria del material particulado (PM2) durante el mes de julio de 2024, utilizando un mapa de calor con una escala cromática que varía de azul oscuro (valores bajos) a rojo intenso (valores altos). Los valores más altos de PM2, representados por tonos rojos y naranjas, se concentran principalmente durante las horas centrales del día, aproximadamente entre las 10:00 a.m. y las 4:00 p.m., lo que está asociado con el incremento de actividades humanas y condiciones meteorológicas específicas, como una mayor radiación solar que favorece la resuspensión de partículas. Por otro lado, los valores más bajos de PM2, indicados por tonos azul oscuro, predominan durante las horas nocturnas y de la madrugada, entre las 10:00 p.m. y las 6:00 a.m., debido a una reducción en las fuentes de emisión y condiciones favorables para la sedimentación de partículas. El dendrograma organiza las horas del día en clústeres claramente diferenciados: un grupo con las horas de alta concentración durante el mediodía y la tarde, otro con las horas de baja concentración en la noche y la madrugada, y un clúster intermedio que incluye las horas de transición, como las primeras horas de la mañana y la noche. Este análisis permite identificar patrones específicos de variación horaria del PM2, lo cual es esencial para diseñar estrategias efectivas de gestión y control ambiental.

Figura 39

Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM2) de julio, 2024

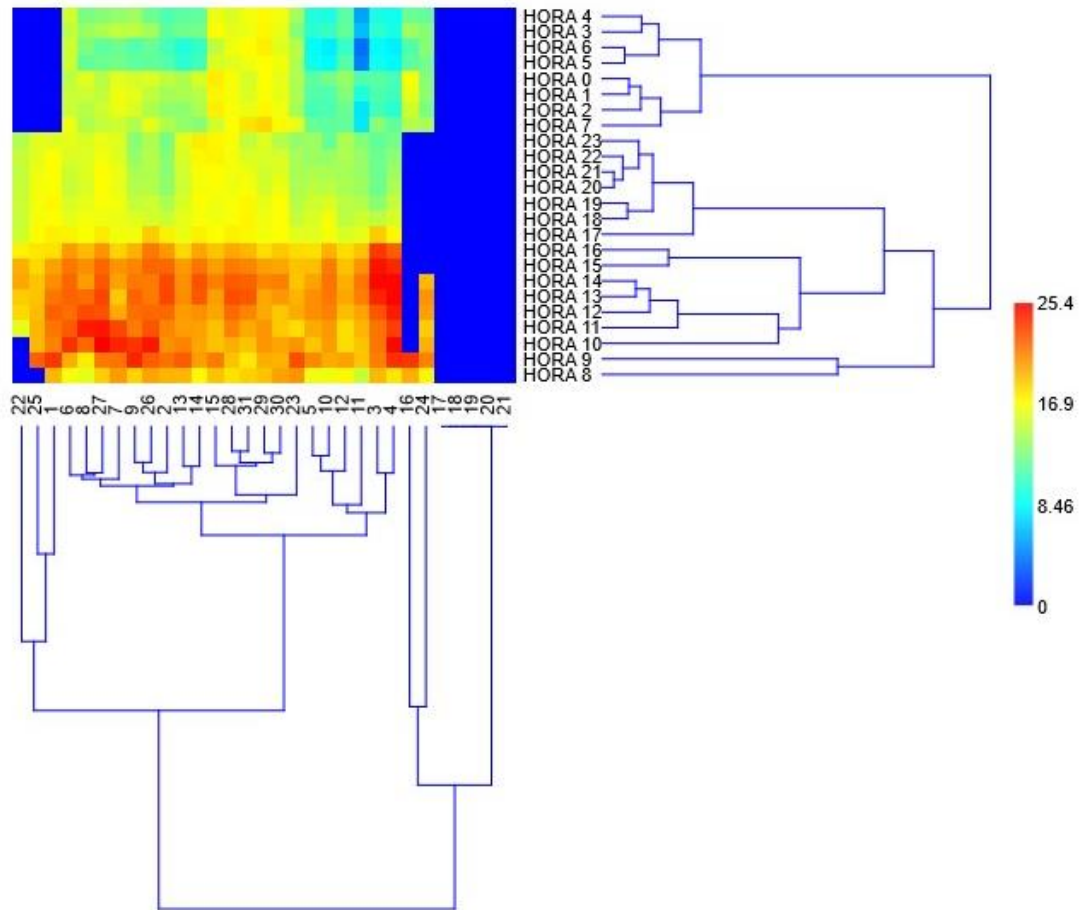


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 40 muestra, el análisis clúster aplicado a la variación horaria de la temperatura durante el mes de julio de 2024. Este análisis se representa mediante un mapa de calor con una escala cromática que varía desde tonos azul oscuro, que indican los valores más bajos de temperatura, hasta tonos rojizos y anaranjados, que reflejan los valores más altos. Esta representación gráfica permite identificar patrones específicos en la distribución de la temperatura a lo largo del día. En el mapa de calor, se observa que los valores más altos de temperatura (representados por tonos rojizos y anaranjados) predominan durante las horas del mediodía y la tarde, especialmente entre las 11:00 a.m. y las 5:00 p.m. Este comportamiento se debe a la influencia de la radiación solar, que alcanza su máximo en este periodo, aumentando significativamente las temperaturas. Por otro lado, los valores más bajos de temperatura (tonos azul oscuro y verde) se concentran durante las horas nocturnas y de madrugada, entre las 12:00 a.m. y las 6:00 a.m. Durante estas horas, la ausencia de radiación solar provoca un descenso gradual de la temperatura debido a la pérdida de calor acumulado durante el día. El dendrograma que acompaña al análisis organiza las horas del día en grupos según las similitudes en los valores de temperatura. Un clúster agrupa las horas de mayor temperatura, correspondientes al mediodía y la tarde. Otro clúster incluye las horas de menor temperatura, principalmente durante la noche y madrugada. Finalmente, se identifica un clúster intermedio que agrupa las horas de transición, como las primeras de la mañana y las últimas de la tarde, donde los valores de temperatura se encuentran en un rango intermedio debido al cambio gradual entre las condiciones nocturnas y diurnas.

Figura 40

Análisis clúster de la variación horaria de la temperatura de julio, 2024

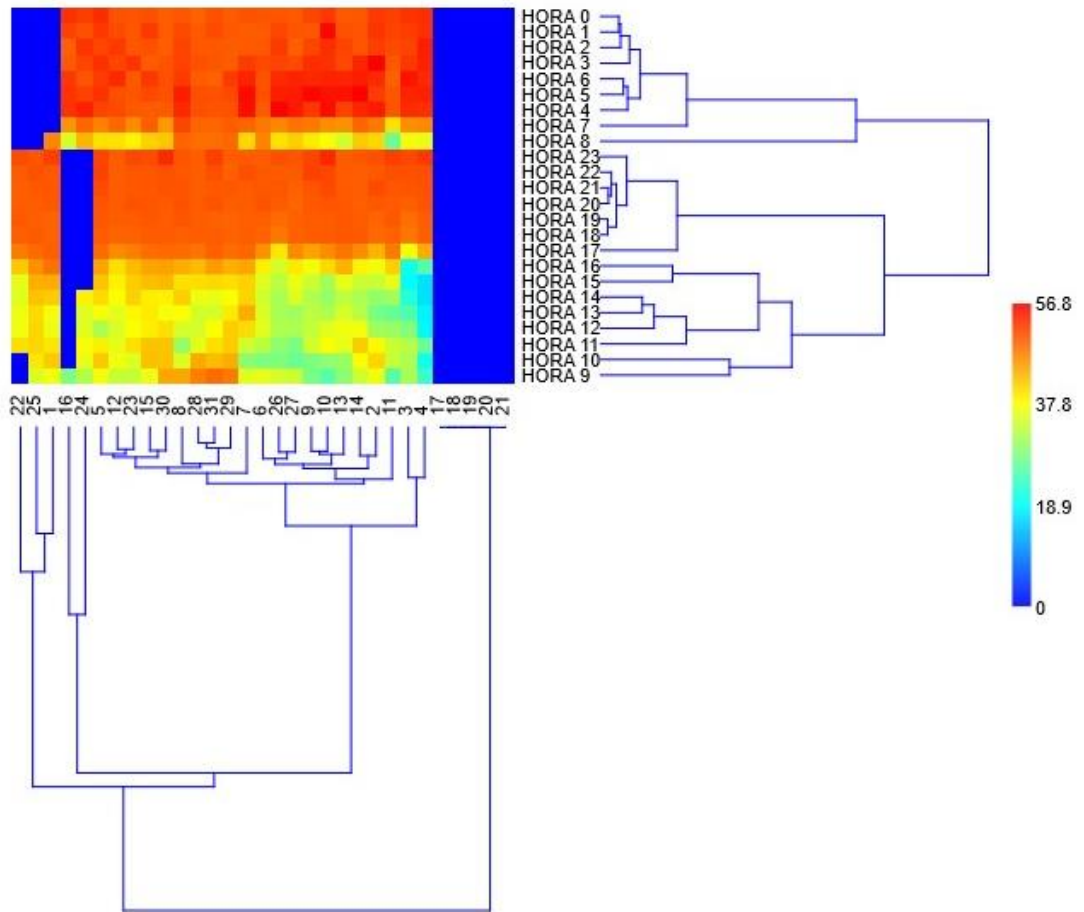


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 41 muestra, el análisis clúster aplicado a la variación horaria de la humedad durante el mes de julio de 2024, el mapa de calor utiliza una escala cromática que va desde tonos azul oscuro, representando los valores más bajos de humedad, hasta tonos rojizos y anaranjados, que indican los valores más altos, este análisis permite identificar patrones específicos en la distribución de la humedad a lo largo del día. Se observa que los niveles más altos de humedad, representados por tonos rojizos y anaranjados, predominan durante las horas nocturnas y de madrugada, especialmente entre las 12:00 a.m. y las 8:00 a.m., esto se debe a que las temperaturas más bajas durante este periodo disminuyen la capacidad del aire para retener vapor de agua, lo que incrementa la humedad relativa, este patrón es típico de las horas de menor actividad solar y puede estar relacionado con fenómenos atmosféricos como la condensación y la reducción de corrientes convectivas. Por otro lado, los valores más bajos de humedad relativa, representados por tonos azul oscuro y verde, se concentran durante las horas del mediodía y la tarde, entre las 11:00 a.m. y las 5:00 p.m., durante este periodo, el aumento de la temperatura provoca que el aire pueda contener más vapor de agua sin saturarse, lo que disminuye los valores relativos de humedad. El dendrograma que acompaña al análisis clúster organiza las horas del día en diferentes grupos según las similitudes en los niveles de humedad, un clúster agrupa las horas de mayor humedad, que corresponden a las horas nocturnas y de madrugada, otro clúster incluye las horas del mediodía y primeras horas de la tarde, que presentan los niveles más bajos de humedad y finalmente, se identifican horas de transición, como las primeras horas de la mañana o la noche, que se agrupan en un clúster intermedio debido a sus características específicas.

Figura 41

Análisis clúster de la variación horaria de la humedad de julio, 2024

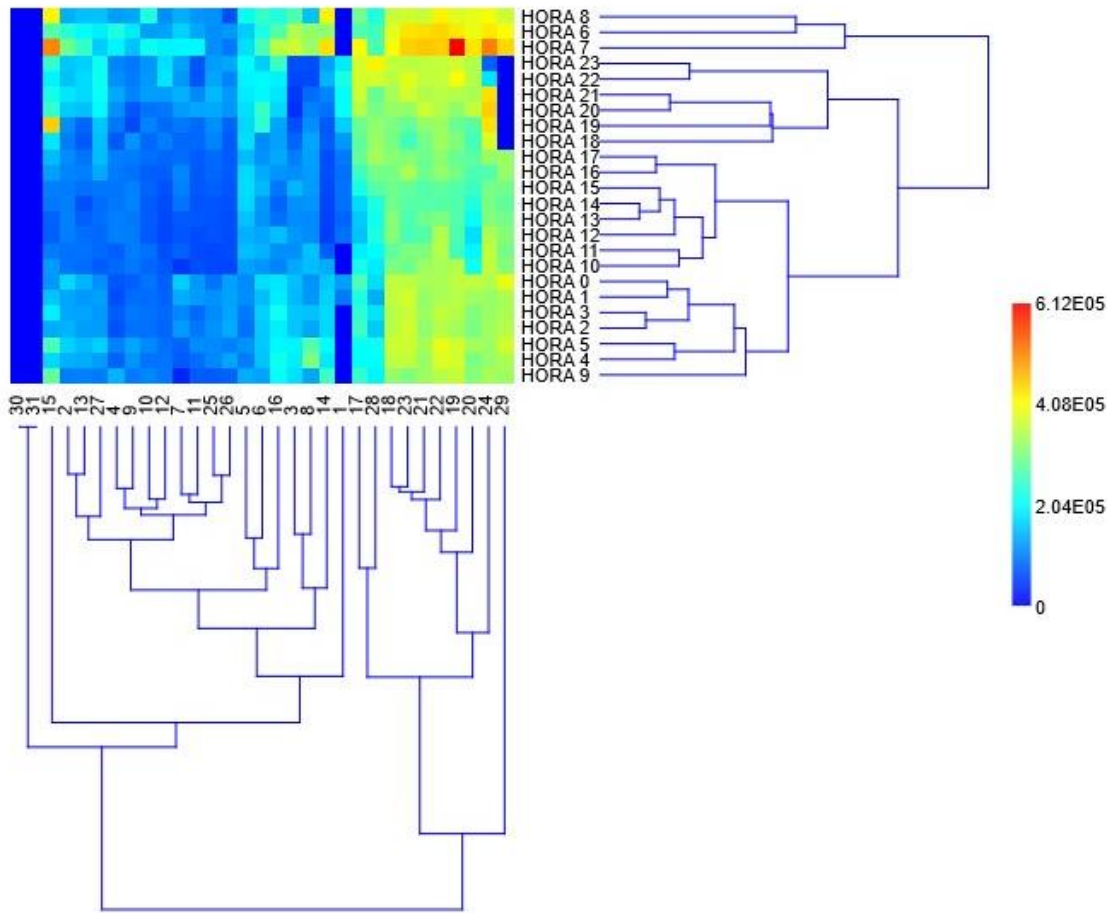


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 42 muestra, el análisis clúster aplicado a la variación horaria del material particulado PM10 durante el mes de agosto de 2024. El mapa de calor utiliza una escala cromática que varía desde tonos azul oscuro, que representan las concentraciones más bajas de PM10, hasta tonos amarillos y rojizos, que indican las concentraciones más altas. Esta visualización permite identificar patrones específicos en la distribución de las concentraciones de PM10 a lo largo del día. De acuerdo con el mapa de calor, las concentraciones más altas de PM10 (tonos rojizos y amarillos) se registran durante las primeras horas de la mañana, especialmente entre las 6:00 a.m. y las 8:00 a.m. Este fenómeno está asociado con la actividad vehicular y la dispersión limitada debido a las condiciones atmosféricas típicas de esas horas, como la inversión térmica. También se observa un ligero incremento hacia las últimas horas de la tarde y noche, que está relacionado con actividades humanas intensivas y cambios en las corrientes de aire. En contraste, las concentraciones más bajas de PM10 (tonos azul oscuro) predominan durante las horas de la madrugada y la noche, entre las 12:00 a.m. y las 4:00 a.m. Durante este periodo, la disminución de las actividades humanas y el aumento relativo de la estabilidad atmosférica favorecen una menor emisión y dispersión de partículas. El dendrograma que acompaña al análisis organiza las horas del día en clústeres según las similitudes en las concentraciones de PM10. Un grupo principal incluye las horas de la mañana, que presentan los picos más altos de concentración. Otro clúster agrupa las horas de la madrugada, caracterizadas por niveles bajos. Finalmente, se identifica un clúster intermedio que corresponde a las horas de transición, donde las concentraciones de PM10 muestran valores moderados debido a cambios graduales en las actividades humanas y las condiciones atmosféricas.

Figura 42

Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM10) de agosto, 2024

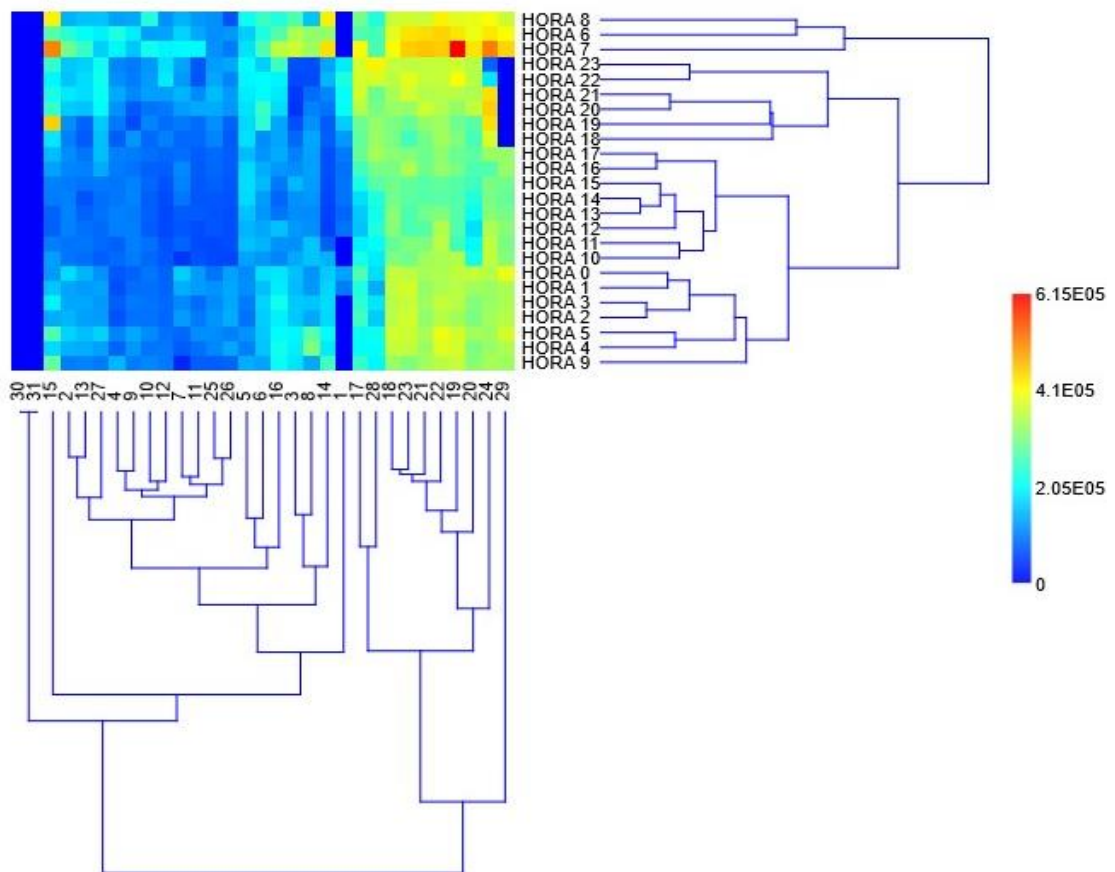


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 43 muestra, el análisis clúster aplicado a la variación horaria del material particulado PM2.5 durante agosto de 2024. En el mapa de calor, las concentraciones más altas de PM2.5 (tonos rojizos y amarillos) se registran entre las 7:00 a.m. y las 9:00 a.m., coincidiendo con el aumento de la actividad vehicular y condiciones atmosféricas como la inversión térmica. También se observa un incremento hacia la noche, entre las 7:00 p.m. y las 9:00 p.m., relacionado con actividades humanas y menor dispersión. En contraste, las concentraciones más bajas (tonos azul oscuro) predominan durante la madrugada, especialmente entre las 1:00 a.m. y las 4:00 a.m., cuando disminuyen las emisiones debido a la menor actividad humana. El dendrograma agrupa las horas en tres clústeres: uno de alta concentración en las horas pico de la mañana y noche, uno de baja concentración durante la madrugada, y un clúster intermedio en las horas de transición, que muestran niveles moderados de PM2.5.

Figura 43

Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM2) de agosto, 2024

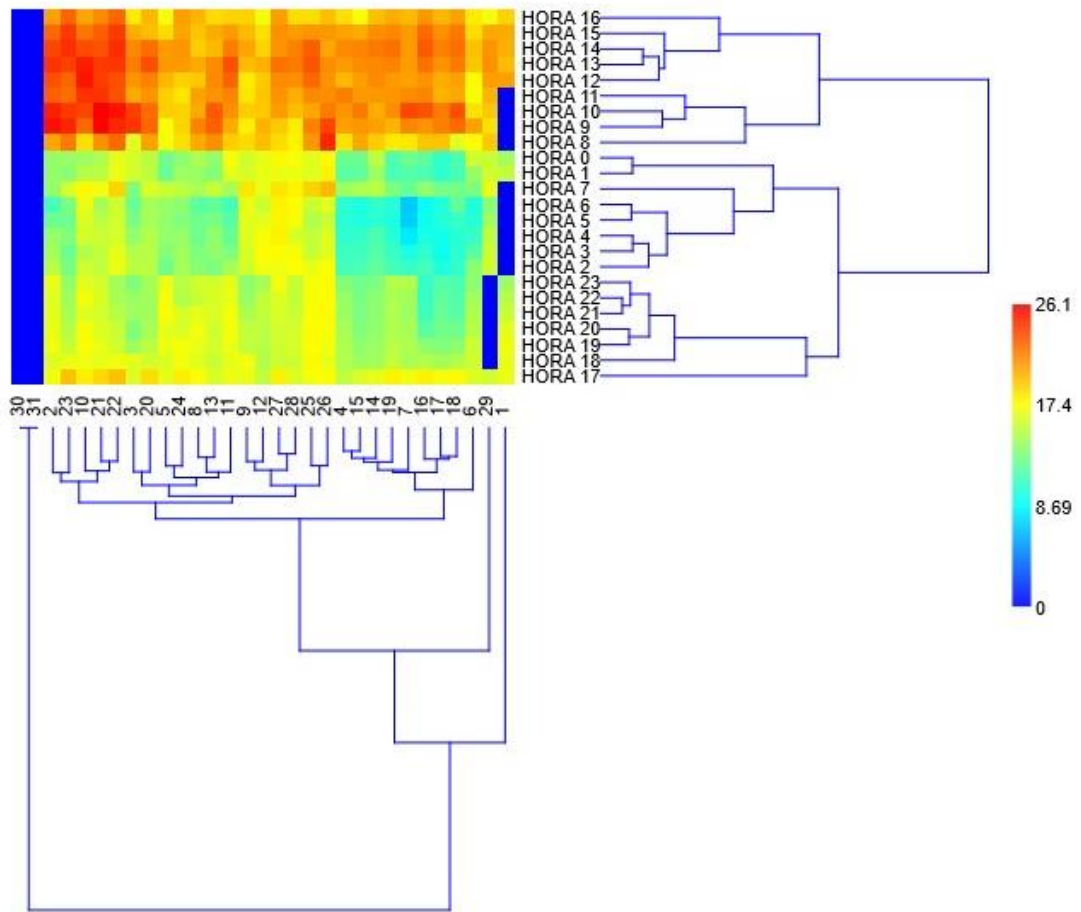


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 44 muestra, el análisis clúster aplicado a la variación horaria de la temperatura durante agosto de 2024, donde el mapa de calor utiliza una escala cromática donde los tonos azul oscuro representan las temperaturas más bajas, mientras que los tonos amarillos y rojizos indican temperaturas más altas. Las temperaturas más elevadas (tonos rojizos) se registran entre las 12:00 p.m. y las 4:00 p.m., coincidiendo con el periodo de máxima radiación solar, típico de las horas centrales del día. Por otro lado, las temperaturas más bajas (tonos azul oscuro) se presentan durante la madrugada, particularmente entre las 4:00 a.m. y las 6:00 a.m., debido a la pérdida de calor acumulado durante la noche y la ausencia de radiación solar. Entre las 7:00 a.m. y las 10:00 a.m., así como entre las 5:00 p.m. y las 8:00 p.m., se observan temperaturas intermedias (tonos verdes y amarillos), reflejando las transiciones entre los extremos del día. El dendrograma acompaña este análisis agrupando las horas del día en clústeres según las similitudes en la variación de temperatura. Un clúster principal abarca las horas de la tarde con las temperaturas más altas, otro agrupa las horas de la madrugada con temperaturas mínimas, y un tercer clúster incluye las horas de transición, caracterizadas por valores intermedios. Este análisis destaca la estructura diaria de la temperatura, permitiendo comprender mejor los patrones térmicos típicos del mes analizado.

Figura 44

Análisis clúster de la variación horaria de la temperatura de agosto, 2024

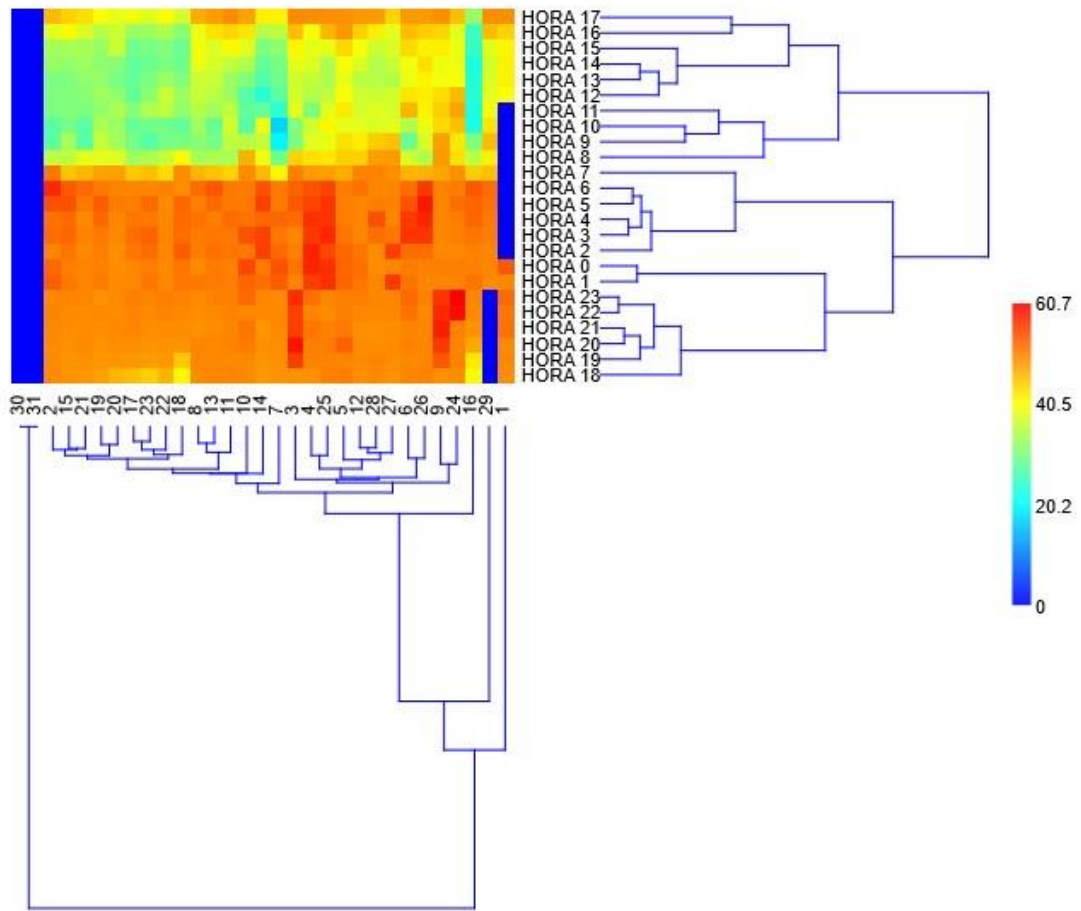


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 45 muestra, el análisis clúster aplicado a la variación horaria de la humedad durante el mes de julio de 2024, el mapa de calor utiliza una escala cromática que va desde tonos azul oscuro, representando los valores más bajos de humedad, hasta tonos rojizos y anaranjados, que indican los valores más altos, este análisis permite identificar patrones específicos en la distribución de la humedad a lo largo del día. Se observa que los niveles más altos de humedad, representados por tonos rojizos y anaranjados, predominan durante las horas nocturnas y de madrugada, especialmente entre las 12:00 a.m. y las 8:00 a.m., esto se debe a que las temperaturas más bajas durante este periodo disminuyen la capacidad del aire para retener vapor de agua, lo que incrementa la humedad relativa, este patrón es típico de las horas de menor actividad solar y puede estar relacionado con fenómenos atmosféricos como la condensación y la reducción de corrientes convectivas. Por otro lado, los valores más bajos de humedad, representados por tonos azul oscuro y verde, se concentran durante las horas del mediodía y la tarde, entre las 11:00 a.m. y las 5:00 p.m., durante este periodo, el aumento de la temperatura provoca que el aire pueda contener más vapor de agua sin saturarse, lo que disminuye los valores relativos de humedad, este comportamiento es característico de las horas con mayor radiación solar y calor. El dendrograma que acompaña al análisis clúster organiza las horas del día en diferentes grupos según las similitudes en los niveles de humedad, un clúster agrupa las horas de mayor humedad, que corresponden a las horas nocturnas y de madrugada, otro clúster incluye las horas del mediodía y primeras horas de la tarde, que presentan los niveles más bajos de humedad y finalmente, se identifican horas de transición, como las primeras horas de la mañana o la noche, que se agrupan en un clúster intermedio debido a sus características específicas.

Figura 45

Análisis clúster de la variación horaria de la humedad de agosto, 2024

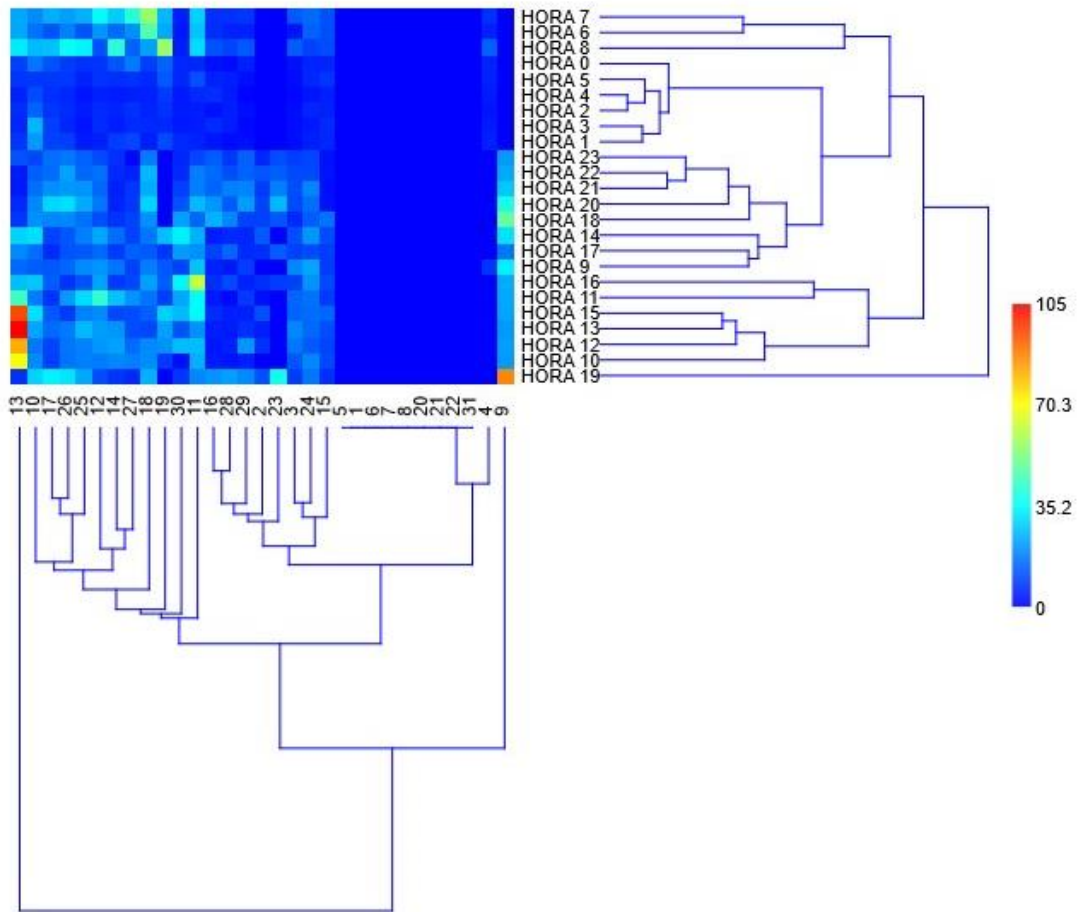


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 46 muestra, el análisis clúster aplicado a la variación horaria del material particulado PM10 durante septiembre de 2024, donde el mapa de calor utiliza una escala cromática en la que los tonos azul oscuro representan las concentraciones más bajas, mientras que los tonos rojizos indican las concentraciones más altas. Las concentraciones más elevadas de PM10 (tonos rojizos) se observan principalmente entre las 12:00 p.m. y las 2:00 p.m., lo cual está asociado a actividades humanas intensivas y condiciones atmosféricas que limitan la dispersión de partículas. Por otro lado, las concentraciones más bajas (tonos azul oscuro) predominan durante gran parte del día, especialmente entre las 8:00 p.m. y las 6:00 a.m., reflejando una disminución en las fuentes de emisión y una mayor estabilidad atmosférica. El dendrograma que acompaña al análisis organiza las horas en clústeres según las similitudes en las concentraciones de PM10. Se identifican tres grupos principales: uno correspondiente a las horas de máxima concentración, otro que incluye las horas de baja concentración, y un grupo intermedio que representa las transiciones, donde las concentraciones comienzan a aumentar o disminuir gradualmente. Este análisis evidencia los momentos críticos en la variación horaria del PM10 y resalta las horas clave para un control más eficiente de la calidad del aire.

Figura 46

Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM10) de septiembre, 2024

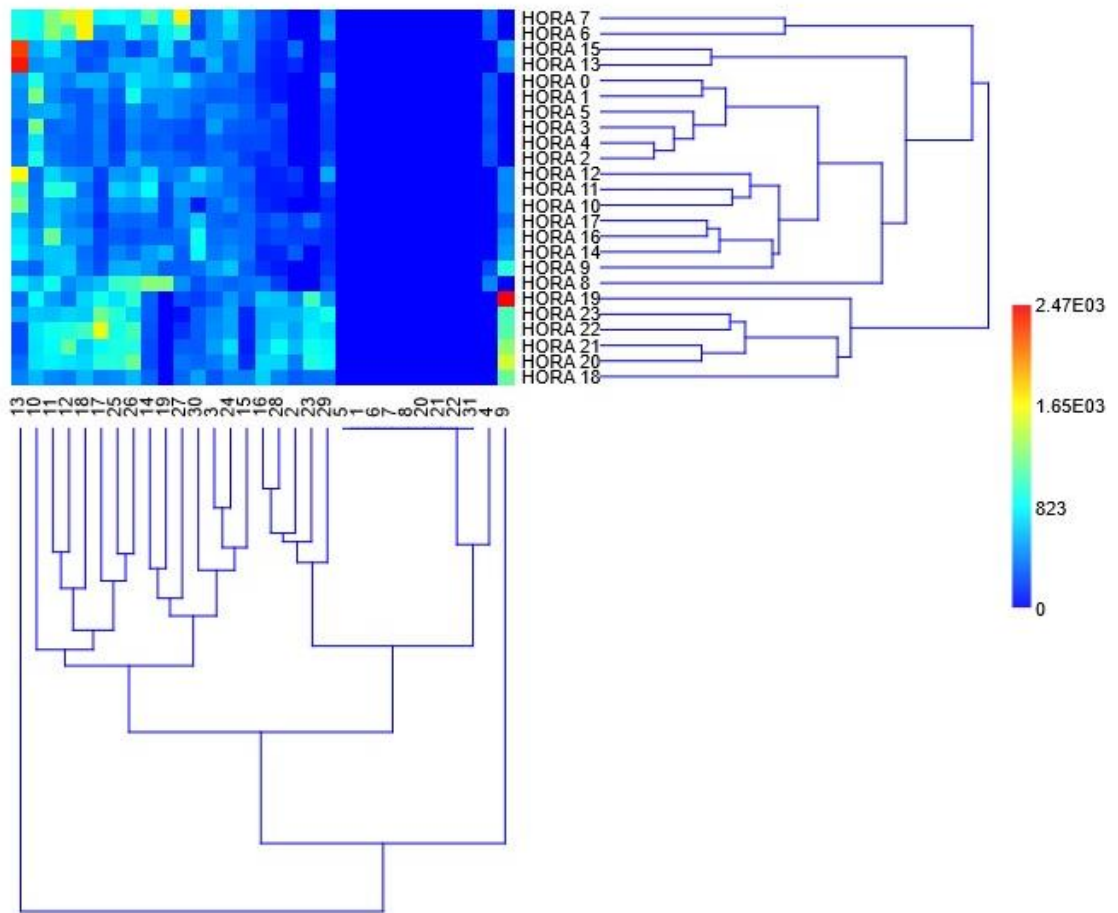


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 47 muestra, el análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM2) de septiembre 2024, en el cual se realizó el análisis detallado de las concentraciones horarias de PM2 mediante un mapa de calor y un dendrograma jerárquico. En el cual el mapa de calor utilizó una escala cromática donde los tonos azul oscuro indican las concentraciones más bajas, predominantes durante la madrugada y la mañana temprano, específicamente entre las 12:00 a.m. y 6:00 a.m., lo que refleja momentos de menor actividad humana y condiciones atmosféricas más estables. A medida que el día avanza, las concentraciones aumentan gradualmente (tonos verdes claro a amarillo) entre las 7:00 a.m. y 9:00 a.m., alcanzando su punto máximo (tonos rojizos) en el intervalo de 1:00 p.m. a 3:00 p.m., asociado a un incremento en las actividades humanas y la acumulación de partículas debido a condiciones atmosféricas desfavorables. El dendrograma jerárquico complementa el análisis al organizar las horas en tres clústeres principales: el primero incluye las horas de baja concentración (12:00 a.m. a 6:00 a.m.), caracterizadas por valores mínimos y estabilidad atmosférica; el segundo agrupa las horas de transición o concentraciones intermedias (7:00 a.m. a 11:00 a.m.), donde las concentraciones comienzan a aumentar; y el tercero representa las horas de alta concentración (1:00 p.m. a 3:00 p.m.), identificadas como el periodo más crítico del día. Este análisis resalta patrones clave de variación diaria de PM2, permitiendo diseñar estrategias más efectivas para controlar la calidad del aire en los momentos más afectados.

Figura 47

Análisis clúster de la variación horaria del material particulado (PM2) de septiembre, 2024

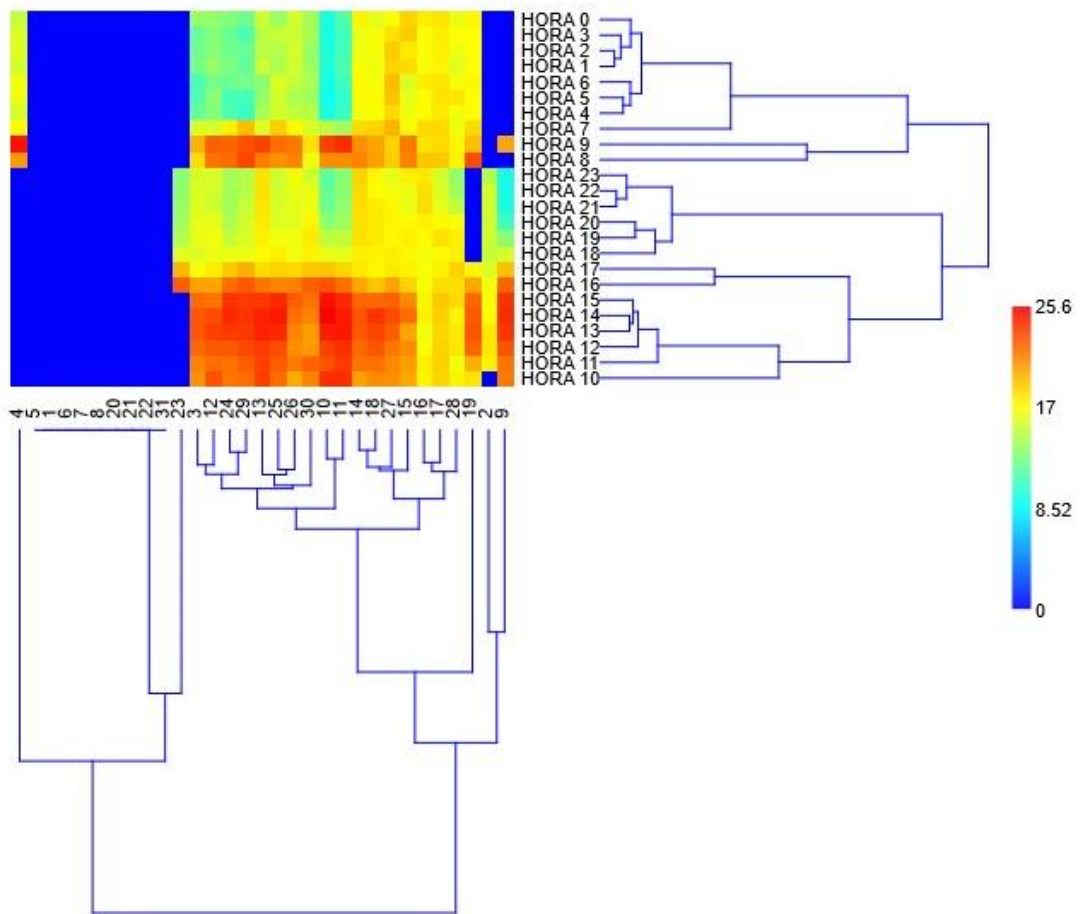


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 48 muestra, el análisis clúster de la variación horaria de la temperatura durante el mes de septiembre de 2024, reflejando patrones específicos en la distribución de temperaturas a lo largo del día, en el gráfico, los valores más bajos de temperatura se representan en tonos azul oscuro, mientras que los valores más altos se observan en tonos rojizos, este análisis permite identificar momentos específicos con temperaturas extremas y explorar su relación con el material particulado (PM2 y PM10). El análisis permite identificar las horas de mayor temperatura, que suelen concentrarse entre las 12:00 p.m. y las 3:00 p.m., coincidiendo con el periodo de mayor radiación solar, por otro lado, las horas de menor temperatura se registran durante la madrugada, entre las 2:00 a.m. y las 6:00 a.m., cuando la pérdida de calor terrestre es más pronunciada debido a la ausencia de radiación solar. Asimismo, el dendrograma del análisis clúster permite agrupar días con patrones térmicos similares, los días con temperaturas más altas suelen estar asociados con baja cobertura de nubes y cantidades moderadas de material particulado. En contraste, los días con temperaturas más bajas coinciden con mayor nubosidad o picos en las cantidades de PM2 y PM10, lo que restringe la entrada de radiación solar.

Figura 48

Análisis clúster de la variación horaria de la temperatura de septiembre, 2024

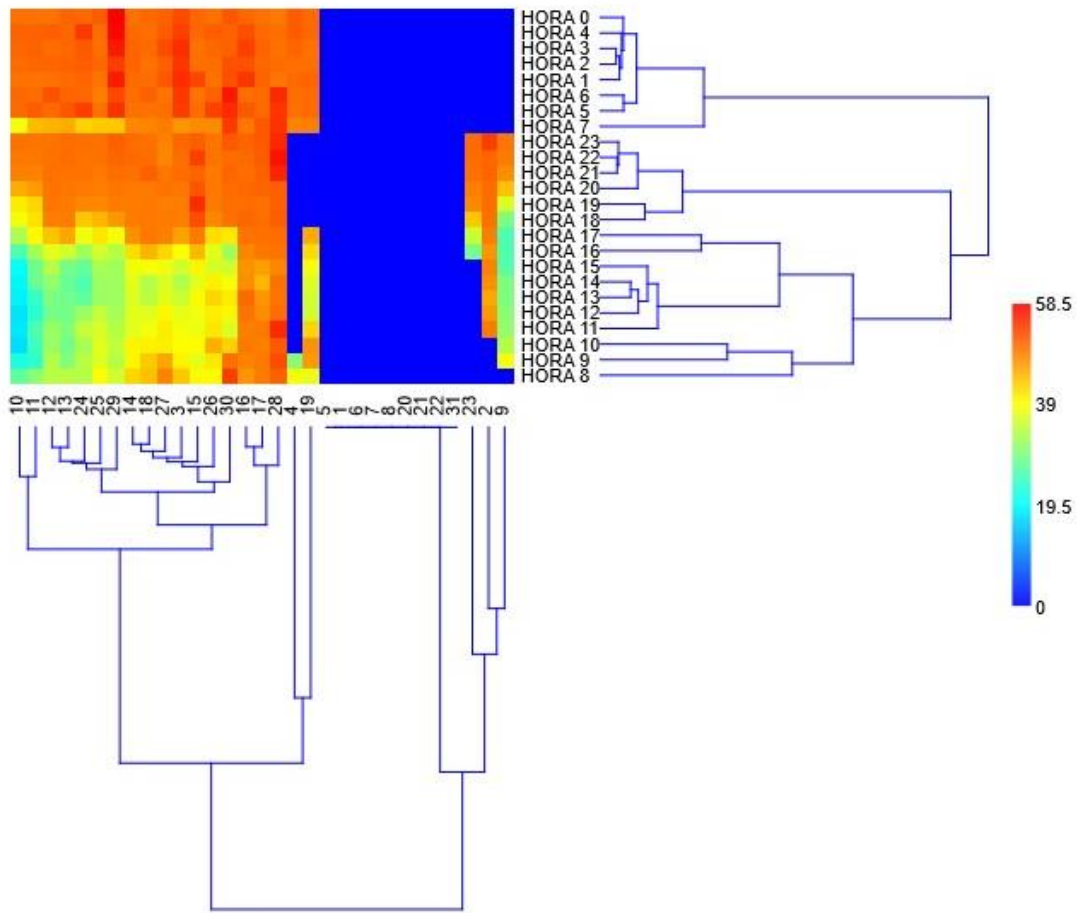


Nota. Elaboración propia, 2024.

La figura 49 muestra, el análisis clúster aplicado a la variación horaria de la humedad durante el mes de septiembre de 2024, el mapa de calor utiliza una escala cromática que va desde tonos azul oscuro, representando los valores más bajos de humedad, hasta tonos rojizos y anaranjados, que indican los valores más altos, este enfoque visual permite identificar patrones específicos en la distribución de la humedad a lo largo del día y evaluar cómo varían estos valores en función de las condiciones atmosféricas. Se observa que los niveles más altos de humedad relativa, representados por tonos rojizos y anaranjados, predominan durante las horas nocturnas y de madrugada, particularmente entre las 12:00 a.m. y las 7:00 a.m., durante este periodo, las temperaturas más bajas limitan la capacidad del aire para contener vapor de agua, lo que incrementa la humedad relativa, este comportamiento refleja la influencia de las condiciones térmicas nocturnas y la ausencia de radiación solar. Por otro lado, los valores más bajos de humedad relativa, indicados por tonos azul oscuro y verde, se concentran durante las horas de la tarde, principalmente entre las 12:00 p.m. y las 5:00 p.m., el incremento en la temperatura en este intervalo favorece la capacidad del aire para contener más vapor de agua sin saturarse, lo que disminuye los niveles relativos de humedad, este patrón es característico de las horas de máxima radiación solar y mayor actividad térmica. El dendrograma acompaña al análisis clúster, agrupando las horas del día según similitudes en sus niveles de humedad relativa, un clúster principal reúne las horas nocturnas y de madrugada con mayores niveles de humedad, mientras que otro clúster agrupa las horas del mediodía y la tarde, caracterizadas por valores más bajos de humedad. Además, se identifican horas de transición, como las primeras horas de la noche y la mañana, que forman un clúster intermedio con características mixtas.

Figura 49

Análisis clúster de la variación horaria de la humedad de septiembre, 2024



Nota. Elaboración propia, 2024.

4.2. Discusión

Chávez, (2023), en su estudio, muestra que, en el año 2021, se registraron concentraciones de PM10 superiores a $85,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En cuanto a los factores meteorológicos, se identificó que la temperatura más alta fue de $19,54 \text{ }^\circ\text{C}$ y ocurrió en 2020, mientras que la mayor humedad registrada fue de $84,18\%$ y se presentó en 2018, además evidenció que los niveles elevados de humedad estuvieron asociados con concentraciones más bajas de PM10 en 2018 y 2020, mientras que una humedad más baja estuvo vinculada a concentraciones más altas de PM10 en los años 2019, 2021 y 2022, concluyendo así que en 2018 se registraron mayores concentraciones de PM10 cuando las temperaturas fueron más bajas, mientras que en 2019 y 2022 se evidenció que temperaturas más altas se asociaron con mayores concentraciones de PM10, lo que podría estar relacionado con el contexto de la pandemia. En comparación con nuestra investigación, específicamente en la figura 16 muestra cinco gráficos que analizan la correlación entre la concentración de PM10 (número de partículas/ m^3) y la temperatura ($^\circ\text{C}$), cada gráfico incluyó una regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2), que mide la proporción de la variación en la temperatura explicada por el material particulado (PM10). En el que en el gráfico E (septiembre) es notablemente la diferente, con un R^2 de 0.99, indicando una correlación extremadamente fuerte, aquí, la pendiente (0.97045) muestra que el aumento en la concentración de PM10 se asocia consistentemente con un incremento en la temperatura, este resultado sugiere un vínculo claro entre ambas variables, posiblemente condicionado por factores locales como áreas urbanas densamente contaminadas, donde el PM10 contribuye significativamente al aumento de la temperatura a través de la retención de calor.

De Souza et al., (2024) en su estudio, menciona que las concentraciones de BC (carbón negro) impactan directamente la temperatura del aire, la humedad relativa y sus interacciones atmosféricas. Y que, durante la estación seca, la región presenta bajos índices de precipitación, agravando las condiciones atmosféricas, las cuales se intensifican debido a acciones antrópicas recurrentes durante los tres años estudiados. Tanto la temperatura del aire como la humedad relativa mostraron niveles más sensibles a estas condiciones. Por lo tanto, los cambios en la temperatura del aire y la humedad relativa no pueden ser ignorados, y deben

ser analizados, ya que sus alteraciones pueden afectar directamente el bioma del Pantanal. En comparación con nuestra investigación, se observa que durante la época seca se registran mayores concentraciones de material particulado (PM), lo que afecta significativamente la temperatura, generando variaciones importantes. En particular, durante los meses más secos, como agosto y septiembre, las concentraciones de PM aumentan debido a la baja humedad, que reduce la eficiencia del proceso de deposición de partículas en el suelo. Este incremento de PM en el aire genera un efecto de enfriamiento local, ya que las partículas bloquean parcialmente la radiación solar, lo que provoca un descenso en las temperaturas diurnas. Además, en agosto, los incendios forestales ocurridos en Bolivia liberaron grandes cantidades de material particulado que, impulsado por los vientos, se desplazó hacia Perú, este fenómeno contribuyó al aumento de las concentraciones de PM en el ambiente, intensificando las variaciones térmicas. Las partículas transportadas no solo afectaron la calidad del aire, sino que también influyeron en el equilibrio térmico, ya que el aumento de material particulado en suspensión amplifica el enfriamiento durante el día y retiene el calor durante la noche, causando fluctuaciones térmicas más marcadas.

Bernnerd (2018) en su investigación menciona que existe un patrón de dispersión de partículas para PM₁₀ y PM_{2.5} que depende y está influenciado por la temperatura en los puntos monitoreados y también por la temporalidad del área de estudio y esto queda evidenciado al observar que los registros de temperaturas más elevadas concentran los mayores volúmenes de partículas y muestran una mayor distancia de dispersión desde el foco emisor. Asimismo, existe una relación directa entre la temporalidad y las concentraciones de partículas PM₁₀ y PM_{2.5}, pues los resultados estadísticos de las temporadas correspondientes a las de lluvia (primer semestre) muestran valores inferiores a las de la temporada de secas (segundo semestre), esto estaría demostrando que la humedad y los vientos son factores adicionales a tener en cuenta pues las partículas al tener contacto con estos factores ambientales incrementan su peso por lo tanto no pueden ser desplazados a distancias lejanas de los puntos de emisión. En comparación con nuestra investigación, si existe una relación directa entre las actividades constructivas y las fluctuaciones de los valores de PM₁₀ y PM₂ evaluados, pues los resultados hallados muestran que las actividades vehiculares, agrícolas y

quema de bosques son los que aportan mayores volúmenes de partículas, y son estos que tienen efectos adversos en la temperatura y la humedad, como se observa en las gráficas son los meses de julio-septiembre épocas secas, donde existe mayor concentración de material particulado. Además, en el distrito de Ahuaycha, las temporadas secas intensifican la concentración de partículas, lo que no solo afecta la calidad del aire, sino también la dinámica térmica local, reafirmando que factores como la urbanización y los patrones estacionales tienen un papel determinante.

Arslan & Toltar, (2024) en su investigación, analizaron la relación espaciotemporal entre las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ y los parámetros meteorológicos en los distritos de Silivri y Ümraniye en Estambul durante el período 2014–2020. Donde las concentraciones de PM fueron más bajas a las 06:00 hora local (LT) en todas las estaciones. Las concentraciones máximas de PM_{2.5} y PM₁₀ se registraron alrededor de las 09:00 y 19:00 LT en ambos distritos, principalmente debido a actividades antropogénicas como las emisiones de vehículos. Además, la temperatura máxima presentó una correlación positiva con PM₁₀ ($r = 0.40$) y PM_{2.5} ($r = 0.38$) durante el verano. En comparación de nuestra investigación se puede observar que los niveles de las temperaturas más altas, ocurren principalmente entre las 11:00 a.m. y 3:00 p.m., un período en el que el calentamiento diurno favorece la dispersión de partículas debido al aumento de movimientos convectivos, esto puede explicar por qué, en este rango horario, se registran menores niveles de PM₂ y PM₁₀, tal como se observó en los análisis correspondientes. Por el contrario, las temperaturas más bajas, se presentan entre 12:00 a.m. y 6:00 a.m., coincidiendo con las horas de mayor estabilidad atmosférica y menor actividad convectiva, estas condiciones tienden a limitar la dispersión de partículas, resultando en una acumulación más significativa de PM₂ y PM₁₀ durante estas horas.

V. CONCLUSIONES

El material particulado en sus fracciones PM10 y PM2 tiene una influencia cuantificable sobre la temperatura del aire en el distrito de Ahuaycha, durante el mes de septiembre, el análisis reveló una correlación muy fuerte entre el PM10 y la temperatura ($R^2 = 0.99$), con una pendiente de 0.97045, indicando que incrementos en las concentraciones de PM10 se asociaron directamente con aumentos significativos de temperatura. En contraste, durante mayo, junio, julio y agosto, la correlación fue débil, con valores de R^2 entre 0.22 y 0.28, lo que demuestra que en esos meses el PM10 tuvo un impacto limitado en las variaciones térmicas. Por su parte, el PM2 mostró correlaciones aún más débiles, con valores de R^2 no mayores a 0.32, y en algunos casos (como en septiembre) con pendientes negativas (-0.004453), sugiriendo que sus efectos térmicos son más complejos y están condicionados por otros factores ambientales.

La variabilidad temporal del material particulado mostró patrones definidos por horarios y estaciones, los niveles más altos de PM10, que alcanzaron concentraciones de hasta 3.67×10^5 partículas/cm³, se registraron entre las 6:00 a.m. y 9:00 a.m., coincidiendo con el inicio de actividades humanas como el tráfico vehicular y quema de biomasa. Durante las horas de mayor radiación solar (11:00 a.m. a 3:00 p.m.), los niveles de PM10 disminuyeron significativamente, llegando a valores inferiores a 1.5×10^5 partículas/cm³, lo que refleja una mayor dispersión facilitada por la convektividad atmosférica. Por otro lado, el PM2 también presentó concentraciones elevadas, alcanzando valores críticos en algunos días de septiembre y julio, con picos de 1.2×10^5 partículas/cm³ durante horas matutinas.

En cuanto a la variabilidad temporal de la temperatura, se observaron máximos durante el mediodía y primeras horas de la tarde, con temperaturas que alcanzaron hasta 27 °C en días despejados, especialmente en los meses de mayo y septiembre. En contraste, las temperaturas mínimas, registradas durante la madrugada (entre las 3:00 a.m. y 6:00 a.m.), descendieron hasta 15 °C en meses como junio y agosto. Esta dinámica se relaciona con la capacidad del material particulado, especialmente el PM10, para absorber y retener radiación térmica, lo que se evidenció particularmente en septiembre, donde las altas concentraciones de PM10 coincidieron con los valores de temperatura más elevados.

La relación entre el material particulado (PM10 y PM2) y la temperatura mostró variabilidad dependiendo del periodo. En septiembre, el PM10 tuvo una correlación fuerte con la temperatura, como lo indica un R^2 de 0.99 y una pendiente cercana a 1.0, sugiriendo que cada incremento significativo en PM10 se tradujo en un aumento proporcional de temperatura. Por otro lado, en junio y agosto, los valores de R^2 para el PM2 fueron bajos (0.22 a 0.28), y las pendientes cercanas a cero (-2.33×10^{-5} en mayo, por ejemplo) reflejan un impacto débil o incluso una correlación inversa. Estos resultados subrayan que el PM10 tiene una influencia más directa y significativa en las variaciones térmicas que el PM2, especialmente en ambientes con alta radiación solar y bajas tasas de dispersión atmosférica.

VI. RECOMENDACIONES

- ✓ Establecer un sistema de monitoreo continuo de material particulado en diferentes zonas del distrito de Ahuaycha para identificar variaciones diarias y estacionales, lo que permitirá ajustar medidas de control y prevención más efectivas.
- ✓ Evaluar la viabilidad de la instalación de estaciones meteorológicas automáticas que registran de forma continua la temperatura y la concentración de partículas, permitiendo un análisis más detallado de la relación entre ambos factores.
- ✓ Desarrollar programas de sensibilización y educación ambiental dirigidos a la población local, enfocados en la relación entre la emisión de material particulado, la calidad del aire y los efectos sobre la temperatura, así como las prácticas para reducir la generación de polvo y otros contaminantes.
- ✓ Realizar estudios de dispersión de material particulado para identificar las zonas más afectadas y la dirección predominante de las corrientes de aire, lo que permitirá enfocar esfuerzos de mitigación en áreas específicas del distrito.
- ✓ Monitorear la calidad del aire en centros educativos y de salud para asegurar que estos lugares, donde se concentran grupos sensibles, estén protegidos de la exposición a altos niveles de material particulado.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amoretti, R. A. (2021). Gestión integral de la calidad del aire desde la percepción de los ciudadanos de dos distritos de Lima Metropolitana, 2021. [Tesis de Maestría, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional- UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/73721>
- Angeles, J., Angeles, R., Chavarría, E., Lavado, C., Cruz, L., Angeles, N., Quispe, L., & Abi, H. (2024). Evaluation of air quality by particulate material in Junin and Huancavelica, Peru. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2025.v24i02.D1722>
- Arslan, H., & Toltar, A. (2024). The influence of meteorological parameters on PM_{2.5} and PM₁₀ values in Ümraniye and Silivri districts of İstanbul. *Environmental Research and Technology*, 6(4). <https://doi.org/10.35208/ert.1220649>
- Asghar, K., Ali, A., Tabassum, A., Nadeem, S. G., Hakim, S. T., Amin, M., Raza, G., Bashir, S., Afshan, N., Usman, N., Aurangzeb, N., Naz, A., & Hussain, M. (2024). Assessment of particulate matter (PM) in ambient air of different settings and its associated health risk in Haripur city, Pakistan. *Brazilian Journal of Biology*, 84. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.256190>
- Baena, J., & Campos, M. (2020). Evaluación de las concentraciones internas y externas de material particulado PM_{2.5} en dos instituciones educativas de la ciudad de barranquilla, atlántico. <https://hdl.handle.net/11323/6905>
- Barrientos, A., & Espinoza, L. (2021). Evaluación de la calidad del aire por la emisión del material particulado en la construcción de pistas y veredas del Jirón Odonován-Huancavelica, 2021. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/4172>
- Bedregal, P., Ubillus, M., Cáceres-Rivero, C., Olivera, P., Garay, R., Rojas, J., Zafra, R., & Urdanivia, R. (2023). Determination of atmospheric aerosol components in an urban area to evaluate the air quality and identify the sources of contamination. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 332(8). <https://doi.org/10.1007/s10967-023-08805-8>
- Brum, A., Brum, R., Bonifácio, A., & Zhang, L. (2024). Impact of temperature increase on air pollutants - A case study in a small city in southern Brazil. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100624>

- Carbajal, M. (2021). Calidad del aire por la emisión de material particulado en la comunidad de Sacsamarca, Huancavelica-2021. <https://repositorio.unh.edu.pe/items/787a2a6f-b586-4a5f-b65b-1315c07e2df6>
- Casallas, A., Celis, N., Ferro, C., López Barrera, E., Peña, C., Corredor, J., & Ballen Segura, M. (2020). Validation of PM10 and PM2.5 early alert in Bogotá, Colombia, through the modeling software WRF-CHEM. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(29). <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06997-9>
- Chavez, M. (2023). “Determinación de la calidad del aire por pm10 y su relación con los factores meteorológicos de humedad y temperatura en el distrito de santa anita - provincia de lima durante los años 2018 al 2022”. [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional - UPN. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/33612/Chavez%20Limay%20Mao%20Vladimir.pdf?sequence=1>
- Chiarvetto, L., Rey, F., & Brignole, N. (2008). Aplicacin de Redes neuronales artificiales para la prediccin de calidad de aire. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, XXVII. <http://hdl.handle.net/11336/99265>
- Cholan, E., Rojas, J., Willems, B. L., & Ocola, L. C. (2017). Estimación del espesor óptico de los aerosoles a partir de las imágenes del sensor MODIS sobre el Perú (2004-2005). *Revista de Investigación de Física*, 19(2). <https://doi.org/10.15381/rif.v19i2.13557>
- Cordova, C. H., Portocarrero, M. N. L., Salas, R., Torres, R., Rodrigues, P. C., & López-Gonzales, J. L. (2021). Air quality assessment and pollution forecasting using artificial neural networks in Metropolitan Lima-Peru. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03650-9>
- Cuadros, E. H. (2021). Factores meteorológicos y su relación con la calidad del aire producido por PM 10 generado en la fabricación de ladrillo artesanal en Cullpa Baja, 2017. Universidad Continental. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/9782>
- De Souza, L. (2024). Characterization of the Elemental Composition of Aerosols Emitted in the Dry Season of the Pantanal Wetland, Brazil. *Atmosphere*, 15(11). <https://doi.org/10.3390/atmos15111361>
- Dutta, D., & Pal, S. K. (2022). Z-number-based AQI in rough set theoretic framework for interpretation of air quality for different thresholds of PM2.5 and PM10. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(9). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10325-z>

- Enshaey, M., Goudarzi, G., Babaei, A. A., & Mohammadi, M. J. (2023). Characterization, ratio analysis, and carcinogenic risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds bounded PM10 in a southwest of Iran. *Clinical Epidemiology and Global Health*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2023.101419>
- Environmental Protection Agency. (2022). Efectos del material particulado sobre la salud y medio ambiente. Environmental Protection Agency (EPA). <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- Esteve, A. (2011). Estudio de los aerosoles atmosféricos en Valencia mediante medidas del nefelómetro de integración [Universidad de Valencia]. <http://hdl.handle.net/10803/77718>
- Flores, J., Conde, E., Carrillo, J., Canda, J., & Cruz, S. (2023). Evaluación de la calidad del aire en la Universidad Nacional de Ingeniería, agosto-septiembre 2023. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, 13(2). <https://doi.org/10.5377/elhigo.v13i2.17383>
- García, F. F., Agudelo, R. A., & Jiménez, K. M. (2008). Distribución espacial y temporal de la concentración de material particulado. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 24(2). <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.247>
- García, J., Agudelo, R., & Jiménez, K. (2006). Distribución espacial y temporal de la concentración de material particulado en Santa Marta, Colombia. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 24(2). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-386X2006000200008&lng=e&nrm=iso&tlng=es
- Gimeno, J. F., Demetrio, S., & López, E. (2002). Cambio climático: Efectos indirectos de los aerosoles atmosféricos. *Revista de Climatología*, 2. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols/page4.php>
- Girado, C., & Gónima, L. (2018). Algoritmo teórico para la estimación de la radiación solar global para una atmósfera despejada. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42(162). <https://doi.org/10.18257/raccefyn.610>
- Hernández, J. (2018). Tipos de Investigación. *Boletín Científico de la Escuela Superior Atotonilco de Tula*, 5(9). <https://doi.org/10.29057/esat.v5i9.2885>
- Kermani, M., Jafari, A. J., Gholami, M., Farzadkia, M., Saeidpour, J., Shahsavani, A., & Fanaei, F. (2022). Evaluation of fine particulate matter (PM2.5) concentration

- trends over heavily-industrialized metropolis of Ahvaz: Relationships to emissions and meteorological parameters. *Journal of Air Pollution and Health*, 7(2). <https://doi.org/10.18502/japh.v7i2.9599>
- Kermani, M., Jafari, A., Gholami, M., Fanaei, F., & Arfaeinia, H. (2020). Association between meteorological parameter and PM_{2.5} concentration in Karaj, Iran. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 9(1). https://doi.org/10.4103/ijehe.ijehe_14_20
- Lal, R. M., Tibrewal, K., Venkataraman, C., Tong, K., Fang, A., Ma, Q., Wang, S., Kaiser, J., Ramaswami, A., & Russell, A. G. (2022). Impact of Circular, Waste-Heat Reuse Pathways on PM_{2.5}-Air Quality, CO₂Emissions, and Human Health in India: Comparison with Material Exchange Potential. *Environmental Science and Technology*, 56(13). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05897>
- Lala, M. A., Onwunzo, C. S., Adesina, O. A., & Sonibare, J. A. (2023). Particulate matters pollution in selected areas of Nigeria: Spatial analysis and risk assessment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100288>
- López, L. (2020). Estudio comparativo de niveles de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} según regiones en Perú período 2015–2019. Repositorio Institucional - UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/59365>
- Luceño, A., & González, F. J. (2015). Métodos estadísticos para medir, describir y controlar la variabilidad. En *Métodos estadísticos para medir, describir y controlar la variabilidad*. <https://doi.org/10.22429/euc2015.004>
- Maleki, R., & Molaei, I. (2021). The effect of meteorological parameters on PM_{2.5} concentration changes in 2018 (Case study: Tehran). *Journal of Air Pollution and Health*, 6(4). <https://doi.org/10.18502/japh.v6i4.8586>
- Malhotra, M., & Aulakh, I. K. (2023). Meteorological Factors Correlation with Air Pollutants: A Case Study in Delhi. *International Journal of Environmental Science and Development*, 14(2). <https://doi.org/10.18178/ijesd.2023.14.2.1420>
- Olarte, Y. (2014). Procesamiento de imágenes para la teledetección de aerosoles en el noroeste de México [Instituto politécnico nacional]. En Tesis. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/14571/TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ordoñez, Y., Reinoso, M., Hernández, A., & Canciano, J. (2018). Aplicación de modelos simplificados para la dispersión de contaminantes atmosféricos. Caso de estudio.

- Osimobi, O. J., Yorkor, B., & Nwankwo, C. A. (2019). Evaluation of daily pollutant standard index and air quality index in a university campus in Nigeria using PM10 and PM2.5 particulate matter. *Journal of Science Technology and Environment Informatics*, 7(2). <https://doi.org/10.18801/jstei.070219.54>
- Palacios, L. (2014). Estudio del efecto directo de los aerosoles atmosféricos sobre Europa. Conama 2014. <https://www.divulgameteo.es/fotos/meteoroteca/Efecto-aerosoles-Europa.pdf>
- Paredes, D., & Quispe, D. (2021). Índice de calidad de aire por material particulado y enfermedades respiratorias en el centro poblado de Callqui Chico-Huancavelica, 2021. <https://hdl.handle.net/20.500.14597/4616>
- Querol, X. (2018). La calidad del aire en las ciudades. Un reto mundial. En Fundacion Naturgy. <https://www.fundacionnaturgy.org/wp-content/uploads/2018/07/prologo-la-calidad-del-aire.pdf>
- Quijano, A., Quijano, M., & Henao, J. (2010). Caracterización fisicoquímica del material particulado-fracción respirable PM2.5 en Pamplona-Norte de Santander-Colombia. *Bistua*, 8(1). <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90315226007>
- Quispe, L. N. (2024). Evaluación de la calidad del aire por material particulado en la zona rural de Ahuaycha-Tayacaja durante 2023. <https://hdl.handle.net/20.500.14643/206>
- Rita, R., Lestiani, D., Hamonangan, E., Santoso, M., & Yulinawati, H. (2019). Air Quality (PM10 dan PM2.5) For Completing the Enviromental Quality Index. *Jurnal Pengabdian Mandiri*, 10(1). https://www.researchgate.net/publication/366593174_Part particulate_Matter_PM25_and_PM10_and_Its_Impact_on_Air_Quality_in_Urban_and_Rural_Areas
- Robles, E., Medina, A., & Medina, C. (2019). La contaminación del aire por el material particulado y su relación con las enfermedades de tipo respiratorio en la población de Cerro de Pasco (2010 y 2016). *Industrial Data*, 22(1). <https://doi.org/10.15381/idata.v22i1.16533>
- Rojano, R. E., Angulo, L. C., & Restrepo, G. (2013). Niveles de partículas suspendidas totales (PST), PM10 y PM2.5 y su relación en lugares públicos de la ciudad

- riohacha, caribe colombiano. *Informacion Tecnologica*, 24(2), 37-46.
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000200006>
- Sánchez-Ccoyllo, O. R., Llacza, A., Ayma-Choque, E., Alonso, M., Castesana, P., & Andrade, M. de F. (2022). Evaluating the Impact of Vehicular Aerosol Emissions on Particulate Matter (PM_{2.5}) Formation Using Modeling Study. *Atmosphere*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/atmos13111816>
- Serageldin, M., Stein, A., Mortarini, A., Morgan, C., Hagist, W., Gobar, S., & Sevilla Fajardo, L. (2015). Aumento de resiliencia al cambio climático en asentamientos informales de dos ciudades latinoamericanas: Condega y Cartagena. *Lincoln Institute of Land Policy*, June. <https://www.lincolnst.edu/es/publications/working-papers/aumento-resiliencia-al-cambio-climatico-en-asentamientos-informales-dos/>
- Smith, P., & Romero, H. (2016). Factores explicativos de la distribución espacial de la temperatura del aire de verano en Santiago de Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, 63. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022016000100004>
- Sotta, B. (2018). Evaluación y monitoreo de partículas de polvo PM 2.5 y PM10 y su relación con la temperatura del aire en tres puntos de muestreo ubicados en la carretera de Cochabamba-Chota 2012 y 2013. <https://hdl.handle.net/20.500.12990/2893>
- Sousa, V. D., Driessnack, M., & Mendes, I. A. C. (2007). Revisión de diseños de investigación resaltantes para enfermería. Parte 1: diseños de investigación cuantitativa. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, 15(3). <https://www.scielo.br/j/rlae/a/7zMf8XypC67vGPrXVrVFGdx/abstract/?lang=es>
- Steenland, K., Vu, B., & Scovronick, N. (2022). Effect modification by maximum temperature of the association between PM_{2.5} and short-term cardiorespiratory mortality and emergency room visits in Lima, Peru, 2010–2016. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 32(4). <https://doi.org/10.1038/s41370-021-00393-7>
- Torres, C. G., & Jim, E. (2020). Contaminación ambiental: Partículas PM 10 y PM 2,5 y efectos en la salud. *Exégesis*, 1(1), 6-6. <http://revistas.uigv.edu.pe/index.php/exegesis/article/view/673>
- Vallejo, M. (2002). El diseño de investigación: una breve revisión metodológica. En *Archivos de cardiología de Mexico* (Vol. 72, Número 1).

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-99402002000100002

- Valverde, J. (2015). Estudio de la calidad del aire afectada por la actividad industrial en la urb. Primavera - distrito de El Agustino. <https://www.semanticscholar.org/paper/Estudio-de-la-calidad-del-aire-afectada-por-la-en-Valverde/8af6fa5c332ab80c1af67aa413f3dfe7898ea687>
- Warren, R. (2018). Estimación de la concentración de material particulado PM10 y PM 2.5 en el Área Metropolitana de Lima utilizando un modelo euleriano. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3635>
- Warthon, J., Zamalloa, A., Olarte, A., Warthon, B., Miranda, I., Zamalloa-Puma, M. M., Ccollatupa, V., Ormachea, J., Quispe, Y., Jalixto, V., Cruz, D., Salcedo, R., Valencia, J., Mio-Diaz, M., Ingles, R., Warthon, G., Tello, R., Uscca, E., Candia, W., ... Alvarez, M. (2025). A Comprehensive Assessment of PM2.5 and PM10 Pollution in Cusco, Peru: Spatiotemporal Analysis and Development of the First Predictive Model (2017–2020). *Sustainability (Switzerland)*, 17(2). <https://doi.org/10.3390/su17020394>
- Yan, H., Li, Q., Feng, K., & Zhang, L. (2023). The characteristics of PM emissions from construction sites during the earthwork and foundation stages: empirical study evidence. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(22). <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26494-4>
- Yunkor, Y., & Ochoa, J. (2021). El estudio descriptivo en la investigación científica. *Acta Jurídica Peruana*, 2(2). <http://revistas.autonoma.edu.pe/index.php/AJP/article/view/224/191>

VIII. ANEXOS

8.1. Matriz de consistencia

Título: “EFECTO DEL MATERIAL PARTICULADO SOBRE LA TEMPERATURA DEL AIRE EN EL DISTRITO DE AHUAYCHA, 2024”

Nombre y apellidos: CHAVEZ DE LA TORRE, Merly Yadira & ORELLANA REYES, Diana Estrella.

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<p>Generales a) ¿Cuál es la influencia del material particulado de 2um y 10um sobre la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024?</p> <p>Específicos: a) ¿Cuál es la variabilidad temporal del material particulado de 2um y 10um sobre la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024? b) ¿Cuál es la variabilidad temporal de la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024? c) ¿Cuál es la relación entre material</p>	<p>Generales a) Determinar la influencia del material particulado de 2um y 10um sobre la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024.</p> <p>Específicos a) Determinar la variabilidad temporal del material particulado de 2um y 10um sobre la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024. b) Determinar la variabilidad temporal de la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024.</p>	<p>Generales a) Existe una alta influencia del material particulado de 2um y 10um sobre la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024.</p> <p>Específicos a) Existe variabilidad temporal del material particulado de 2um y 10um sobre la temperatura en el Distrito de Ahuaycha, 2024. b) Existe variabilidad temporal de la temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024.</p>	<p>✓ Variable 1: Material particulado Dimensiones: ✚ Material particulado de 2um ✚ Material particulado de 10um</p> <p>✓ Variable 2: Temperatura del aire Dimensión: ✚ Temperatura (°T)</p>	<p>Tipo: Investigación aplicada. Nivel: Investigación descriptiva. Método: ✓ Método deductivo: Porque se realiza procedimientos con la finalidad de dar cumplimiento a los objetivos. ✓ Método estadístico: Porque se utiliza para interpretar, analizar y procesar datos numéricos de la investigación. Diseño: Es un diseño descriptivo porque utiliza el método científico con las variables de la investigación.</p>

<p>particulado y temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024?</p>	<p>c) Determinar la relación entre material particulado y temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024.</p>	<p>c) Existe relación positiva entre material particulado y temperatura del aire en el Distrito de Ahuaycha, 2024.</p>	<p>Población y muestra a) Población: Es la data de material particulado de 2um, 10um y temperatura del aire en la zona rural de Ahuaycha - Tayacaja, durante los meses de mayo a setiembre del 2024. El lugar de estudio está ubicado a la altura de 3,280 m.s.n.m, en las coordenadas 12°23'45.44" S y 74°53'19.47" O, estos datos geográficos son fundamental para entender el efecto del material particulado (2um y 10 um) con la temperatura en el distrito de Ahuaycha. b) Muestra: La muestra considerará toda la data diaria del material particulado (2um y 10um) y de la temperatura, durante los meses de mayo hasta setiembre de 2024. c) Muestreo: Muestreo por conveniencia. Técnicas e instrumentos a) Técnicas: En la investigación se utilizó la técnica de la observación.</p>
---	--	--	---

				<p>b) Instrumentos: Se utilizaron los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estación meteorológica • Medidor de material particulado Profiler <p>Técnica de procesamiento de datos</p> <p>✓ Trabajo en campo: Recopilación de información del material particulado y la temperatura.</p> <p>✓ Trabajo en gabinete: Procesamiento de la información recopilada del material particulado y la temperatura.</p>
--	--	--	--	---

8.2. Panel fotográfico

Figura 50

Instalación de la estación meteorológica de marca Lufft- WS601-UMB



Nota. Elaboración propia, 2024.

Figura 51

Instalación del medidor de material particulado Profiler Model 212



Nota. Elaboración propia, 2024.

Figura 52

Recolección de datos del sensor de temperatura y material particulado



Nota. Elaboración propia, 2024.

Figura 53

Procesamiento de datos

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1																
2		TEMP														
3		DÍA/MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
4			1	NaN	NaN	NaN	NaN	54	50	54	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
5			2	NaN	NaN	NaN	NaN	57	51	50	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
6			3	NaN	NaN	NaN	NaN	55	50	50	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
7			4	NaN	NaN	NaN	NaN	54	40	50	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
8			5	NaN	NaN	NaN	NaN	55	42	48	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
9			6	NaN	NaN	NaN	NaN	56	50	53	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
10			7	NaN	NaN	NaN	NaN	57	49	52	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
11			8	NaN	NaN	NaN	NaN	57	41	51	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
12			9	NaN	NaN	NaN	NaN	56	43	51	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
13			10	NaN	NaN	NaN	NaN	55	55	48	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
14			11	NaN	NaN	NaN	NaN	57	49	47	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
15			12	NaN	NaN	NaN	NaN	57	56	48	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
16			13	NaN	NaN	NaN	NaN	56	54	50	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
17			14	NaN	NaN	NaN	NaN	53	51	52	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
18			15	NaN	NaN	NaN	NaN	47	55	54	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
19			16	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	59	52	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
20			17	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	54	47	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
21			18	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	55	46	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
22			19	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	47	46	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	
23			20	NaN	NaN	NaN	NaN	58	47	46	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	

Nota. Elaboración propia, 2024.

Figura 54

Presencia del parque automotor



Nota. Elaboración propia, 2024.

Figura 55

Foto con los dos equipos utilizados para la investigación



Nota. Elaboración propia, 2024.