

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TEMA:

**CURSO DE ESPECIALIZACIÓN - APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE
INTERNET DE LAS COSAS, INTELIGENCIA ARTIFICIAL E
INFRAESTRUCTURA DE LA NUBE EN SOLUCIONES PARA INDUSTRIA 4.0**

SUB – TEMA:

**OPTIMIZACIÓN DE UNA ESTACIÓN MÓVIL PARA LA MEDICIÓN DE LA
CALIDAD DEL AIRE CON CONECTIVIDAD GSM**

PRESENTANDO POR:

HERRERA SEVILLANO, LUIS FERNANDO

REYES HERRERA, KEVIN ALEXIS

PARA OTORGAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 2025

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR INTERINO:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título:

**CURSO DE ESPECIALIZACIÓN - APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE
INTERNET DE LAS COSAS, INTELIGENCIA ARTIFICIAL E
INFRAESTRUCTURA DE LA NUBE EN SOLUCIONES PARA INDUSTRIA 4.0**

Subtítulo:

**OPTIMIZACIÓN DE UNA ESTACIÓN MÓVIL PARA LA MEDICIÓN DE LA
CALIDAD DEL AIRE CON CONECTIVIDAD GSM**

Presentado por:

HERRERA SEVILLANO, LUIS FERNANDO

REYES HERRERA, KEVIN ALEXIS

SAN SALVADOR, FEBRERO 2025

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

DR. CARLOS OSMÍN POCASANGRE JIMÉNEZ

NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, jueves 12 de diciembre de 2024, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 10:00 a.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Werner David Meléndez Valle
Director Interino


Firma

2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma



Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- DR. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMÉNEZ
(Docente Asesor)


Firma

- ING. WERNER DAVID MELENDEZ VALLE


Firma

- ING. WALTER LEOPOLDO ZELAYA CHICAS


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación (Curso de Especialización): APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE INTERNET DE LAS COSAS, INTELIGENCIA ARTIFICIAL E INFRAESTRUCTURA DE LA NUBE EN SOLUCIONES PARA LA INDUSTRIA 4.0

A cargo de los Bachilleres:

- HERRERA SEVILLANO LUIS FERNANDO
- REYES HERRERA KEVIN ALEXIS

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final:

9.0

(Nueve punto cero)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco eternamente a mis padres, Marcial Alexis Reyes y Zoila Marilyn Herrera, por proporcionarme todo lo necesario a lo largo de mi vida y mi etapa universitaria. Gracias por su amor, paciencia, comprensión y apoyo; ya que siempre han estado para mí en todo momento, desde el día que me acompañaron al examen de admisión hasta el final de mi trabajo de graduación en mi etapa universitaria. Por esa y muchísimas razones más, no encuentro las palabras suficientes para expresar mi agradecimiento.

Agradezco a mi hermano, Dennis Alejandro Reyes, y a mi amigo, Alessandro Antonio Torres, por ser las personas con quienes más he compartido en las buenas y en las malas, dándome su apoyo. Ellos saben que siempre van a poder contar conmigo en cualquier momento.

Agradezco a mi primo, Alberto Reyes Avalos, por ser como un hermano mayor al darme consejos y al ser una persona que siempre ha estado cuando he necesitado su ayuda, además de incluirme siempre en su círculo cercano.

Agradezco a mis tíos, Oscar Herrera y Gladis Monterroza, y a mis primos, David Herrera y Angelina Herrera, por siempre brindarme su increíble apoyo y ser una familia con la que he crecido desde que tengo memoria.

Agradezco a mi primo, Luis Fernando Herrera, compañero de estudio y de este trabajo de graduación, por haberme ayudado cuando lo he necesitado y hacer que mi etapa en la universidad sea más agradable. Ha sido un placer contar con su ayuda en la universidad.

Agradezco a mis primos, Diego Fernando Herrera y Diana Marcela Herrera, por acompañarme desde muy pequeño y en los primeros años en la universidad, y al tío Jorge Alberto Herrera por su ayuda en las modificaciones del medidor y sus consejos, los cuales he apreciado en cada momento.

Agradezco a cada miembro de mi increíble familia y a mis amigos que me han querido, apoyado y acompañado desde siempre.

Un agradecimiento especial al Dr. Carlos Pocasangre, quien ha sido una persona importante como mi asesor en Proyecto de Ingeniería 1 y en este trabajo de graduación. También agradezco a todos los docentes y amigos en la escuela de eléctrica, quienes me ayudaron en cada momento de mi proceso académico.

Kevin Alexis Reyes Herrera.

AGRADECIMIENTOS

Ha sido un largo camino desde que inicié mi estudio superior en la Universidad de El Salvador y ha llegado el momento de concluir una etapa muy importante en mi vida. Es por ello que primeramente quisiera agradecer a mi madre Nelly Sevillano que ha supuesto un gran pilar en mi desarrollo y siempre ha estado apoyándome en este largo camino, dándome fuerzas para poder continuar en los malos momentos que he pasado y siempre preocupándose por mi bienestar. A mi padre Eliseo Herrera, que, aunque lamentablemente ya no me puede apoyar físicamente, siempre estuvo conmigo, siendo un gran modelo a seguir y siempre aconsejándome para hacer de mí una mejor persona en todo momento. También a mis hermanos Marcelo Herrera y Geraldina Herrera que en todo momento nunca han dudado un solo momento en darme su apoyo.

Agradecer a mis tíos Alexis Reyes y Marilyn Herrera, que desde muy pequeño me han apoyado incluso hasta el día de hoy, así como también a mis primos Kevin y Dennis con los cuales he compartido muchos de los mejores momentos que tengo en mi memoria.

Agradecer también a María Rivera Castillo, quien fue una de las personas que me ha cuidado desde que tengo memoria y que incluso hasta el día de hoy se preocupa por mi bienestar y no dudando nunca de darme su apoyo.

También un agradecimiento especial al Dr. Carlos Pocasangre quien ha sido una persona muy amable y responsable, apoyando mi desarrollo en este trabajo y dándome consejos e ideas para poder mejorar. Por último, agradecer a niña Reina por haberme apoyado y habiéndome compartido en numerosas ocasiones su sabiduría en mi desarrollo académico.

Luis Fernando Herrera Sevillano

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	6
GLOSARIO.....	7
RESUMEN.....	9
INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVOS	11
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
JUSTIFICACION	12
ALCANCES.....	13
LIMITACIONES	13
GENERALIDADES DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA.....	14
La atmosfera terrestre.....	14
El Aire	16
Contaminación atmosférica y del aire.....	17
Clasificación de contaminantes.....	18
Los contaminantes primarios	18
Los contaminantes secundarios.....	19
Fuentes de contaminación	20
Fuentes Naturales	20
Fuentes Artificiales	21
Difusión de los contaminantes en el aire.....	22
Emisión	23
Inmisión.....	24
Calidad del Aire	24
Materia particulada (PM10, PM2.5).....	26
Monóxido de Carbono (CO)	28
Ozono (O ₃)	28
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂).....	29
Dióxido de Azufre (SO ₂).....	29
Formaldehido	30
Factores climáticos que afectan la calidad del aire	31

Humedad La humedad, o la cantidad de vapor de agua presente en el aire, juega un papel crucial en la calidad del aire. Un alto nivel de humedad puede influir en la concentración y la dispersión de los contaminantes atmosféricos de varias maneras:	31
Temperatura	31
Normativas sobre la calidad del aire	32
Índice Centroamericano de Calidad del Aire	32
ESTACIÓN MÓVIL PARA LA CALIDAD DEL AIRE	36
Descripción de la Estación Móvil	36
Fabricación.....	37
Componentes.....	38
Lenguaje de Programación.....	45
Funcionamiento del Dispositivo.....	46
Integración de la etapa 3.5.....	49
Desafíos en la integración y solución técnica	52
VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS EN API.....	55
Plataforma iot Thingsboard.....	55
Presentación y construcción de dashboard.....	55
METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO PARA RECOLECCIÓN DE DATOS.....	58
Área de estudio.....	58
Recolección de datos.....	59
ANÁLISIS DE DATOS	60
Graficas de material particulado PM2.5 por hora.	61
Graficas de material particulado PM10 por hora.	74
Graficas de material particulado PM1.0 por hora.	87
Análisis diario de material particulado PM2.5 y PM10	94
Mapas de Calor	96
Discusión de resultados.....	98
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
BIBLIOGRAFÍA.....	105
ANEXOS.....	108

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura 1 <i>Composición de la atmosfera terrestre.</i>	16
Figura 2 <i>Fuentes de emisión e inmisión.</i>	23
Figura 3 <i>Comparación del tamaño del cabello y arena fina con partículas PM2.5 y PM10.</i>	27
Figura 4 <i>Microcontrolador ESP32.</i>	39
Figura 5 <i>Sensor PMS5003ST.</i>	40
Figura 6 <i>RTC DS3231</i>	41
Figura 7 <i>Modulo GPS NEO6MV2.</i>	42
Figura 8 <i>Batería Mi Power Bank 3 10000 mAh Ultra Compact</i>	43
Figura 9 <i>Modulo MicroSD</i>	44
Figura 10 <i>Pantalla OLED SSH1106</i>	45
Figura 11 <i>Vista frontal de la estación móvil</i>	48
Figura 12 <i>Componentes internos de la estación móvil.</i>	48
Figura 13 <i>Esquema Iot de la estación móvil 3.5</i>	50
Figura 14 <i>Etapas de conectividad GSM del medidor de calidad del aire.</i>	51
Figura 15 <i>Componentes internos dentro del gabinete de la estación móvil para la calidad del aire 3.5.</i>	52
Figura 16 <i>Batería tipo 18650</i>	53
Figura 17 <i>Powebank 5,000 mAh</i>	54
Figura 18 <i>Dashboard Telemetría-Calidad del aire en Thingsboard.</i>	56
Figura 19 <i>Mapa de Telemetría-Calidad del aire en Thingsboard</i>	57
Figura 20 <i>Rangos de valores del ICCA en Thingsboard.</i>	57
Figura 21 <i>Lista de mediciones registradas en Thingsboard</i>	58
Figura 22 <i>Ruta de estudio para la recolección de datos.</i>	59
Figura 23 <i>Registro de datos de las mediciones en Sonsonate Centro</i>	60
Figura 24 <i>Concentración PM2.5 del día 07/10/2024.</i>	61
Figura 25 <i>ICCA PM2.5 del día 07/10/2024.</i>	62
Figura 26 <i>Concentración PM2.5 del día 08/10/2024.</i>	62
Figura 27 <i>ICCA PM2.5 del día 08/10/2024</i>	63
Figura 28 <i>Concentración PM2.5 del día 10/10/2024.</i>	63
Figura 29 <i>ICCA PM2.5 del día 10/10/2024</i>	64
Figura 30 <i>Concentración PM2.5 del día 11/10/2024.</i>	64
Figura 31 <i>ICCA PM2.5 del día 11/10/2024.</i>	65
Figura 32 <i>Concentración PM2.5 del día 12/10/2024.</i>	65
Figura 33 <i>ICCA PM2.5 del día 12/10/2024</i>	66
Figura 34 <i>Concentración PM2.5 del día 13/10/2024.</i>	66
Figura 35 <i>ICCA PM2.5 del día 13/10/2024.</i>	67
Figura 36 <i>Concentración PM2.5 del día 14/10/2024.</i>	67
Figura 37 <i>ICCA PM2.5 del día 14/10/2024.</i>	68
Figura 38 <i>Concentración PM2.5 del día 15/10/2024.</i>	68
Figura 39 <i>ICCA PM2.5 del día 15/10/2024</i>	69
Figura 40 <i>Concentración PM2.5 del día 16/10/2024.</i>	69
Figura 41 <i>ICCA PM2.5 del día 16/10/2024.</i>	70
Figura 42 <i>Concentración PM2.5 del día 17/10/2024.</i>	70
Figura 43 <i>ICCA PM2.5 del día 17/10/2024.</i>	71
Figura 44 <i>Concentración PM2.5 del día 18/10/2024.</i>	71
Figura 45 <i>ICCA PM2.5 del día 18/10/2024.</i>	72

Figura 46 Concentración PM2.5 del día 19/10/2024.....	72
Figura 47 ICCA PM2.5 del día 19/10/2024.	73
Figura 48 Concentración PM2.5 del día 20/10/2024.....	73
Figura 49 ICCA PM2.5 del día 20/10/2024.	74
Figura 50 Concentración PM10 del día 07/10/2024.....	74
Figura 51 ICCA PM10 del día 07/10/2024.	75
Figura 52 Concentración PM10 del día 08/10/2024.....	75
Figura 53 ICCA PM10 del día 08/10/2024.	76
Figura 54 Concentración PM10 del día 10/10/2024.....	76
Figura 55 ICCA PM10 del día 10/10/2024.	77
Figura 56 Concentración PM10 del día 11/10/2024.....	77
Figura 57 ICCA PM10 del día 11/10/2024.....	78
Figura 58 Concentración PM10 del día 12/10/2024.....	78
Figura 59 ICCA PM10 del día 12/10/2024.....	79
Figura 60 Concentración PM10 del día 13/10/2024.....	79
Figura 61 ICCA PM10 del día 13/10/2024.....	80
Figura 62 Concentración PM10 del día 14/10/2024.....	80
Figura 63 ICCA PM10 del día 14/10/2024.....	81
Figura 64 Concentración PM10 del día 15/10/2024.....	81
Figura 65 ICCA PM10 del día 15/10/2024.....	82
Figura 66 Concentración PM10 del día 16/10/2024.....	82
Figura 67 ICCA PM10 del día 16/10/2024.....	83
Figura 68 Concentración PM10 del día 17/10/2024.....	83
Figura 69 ICCA PM10 del día 17/10/2024.....	84
Figura 70 Concentración PM10 del día 18/10/2024.....	84
Figura 71 ICCA PM10 del día 18/10/2024.....	85
Figura 72 Concentración PM10 del día 19/10/2024.....	85
Figura 73 ICCA PM10 del día 19/10/2024.....	86
Figura 74 Concentración PM10 del día 20/10/2024.....	86
Figura 75 ICCA PM10 del día 20/10/2024.....	87
Figura 76 Concentración PM1.0 del día 07/10/2024.....	87
Figura 77 Concentración PM1.0 del día 08/10/2024.....	88
Figura 78 Concentración PM1.0 del día 10/10/2024.....	88
Figura 79 Concentración PM1.0 del día 11/10/2024.....	89
Figura 80 Concentración PM1.0 del día 12/10/2024.....	89
Figura 81 Concentración PM1.0 del día 13/10/2024.....	90
Figura 82 Concentración PM1.0 del día 14/10/2024.....	90
Figura 83 Concentración PM1.0 del día 15/10/2024.....	91
Figura 84 Concentración PM1.0 del día 16/10/2024.....	91
Figura 85 Concentración PM1.0 del día 17/10/2024.....	92
Figura 86 Concentración PM1.0 del día 18/10/2024.....	92
Figura 87 Concentración PM1.0 del día 19/10/2024.....	93
Figura 88 Concentración PM1.0 del día 20/10/2024.....	93
Figura 89 Mapa de calor PM 2.5 en el periodo del 7 al 20 de octubre.....	96
Figura 90 Mapa de calor PM 10 en el periodo del 7 al 20 de octubre.....	97
Figura 91 Diagrama de caja y bigote para los datos obtenidos desde el 7 al 20 de octubre.....	97

Figura 92 Ubicación geográfica de la medición con la mayor concentración de material particulado 99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Composición química de la atmosfera	14
Tabla 2 Niveles del Índice Centroamericano de Calidad del Aire para material particulado PM 2.5	34
Tabla 3 Niveles del Índice Centroamericano de Calidad del Aire para material particulado PM 10	35
Tabla 4 Dia y hora de toma de datos.	60
Tabla 5 Resultados estadísticos del material PM 2.5 para el periodo del 7 al 13 de octubre.....	94
Tabla 6 Resultados estadísticos del material PM10 para el periodo del 7 al 13 de octubre.....	94
Tabla 7 Resultados estadísticos del material PM2.5 para el periodo del 14 al 20 de octubre.....	95
Tabla 8 Resultados estadísticos del material PM10 para el periodo del 14 al 20 de octubre.....	95
Tabla 9 Presupuesto de la estación móvil para la medición de calidad del aire 3.5.....	108

GLOSARIO

- **GSM:** Sistema global para las comunicaciones móviles.
- **Atmosfera:** Capa de gases que rodea a la Tierra y que es esencial para la vida, ya que proporciona el oxígeno necesario para la respiración y ayuda a regular la temperatura en la superficie.
- **Calidad del aire:** Medida de la pureza del aire en términos de la cantidad y concentración de contaminantes presentes en la atmósfera.
- **Concentración:** Cantidad de partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire en una unidad específica de volumen, masa o espacio. Se expresa generalmente en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) o miligramos por metro cúbico (mg/m^3), dependiendo de la cantidad de partículas presentes en una determinada cantidad de aire.
- **Dashboard:** Interfaz gráfica que muestra información clave, indicadores, métricas y datos relevantes de manera visual y fácil de entender.
- **Emisiones atmosféricas:** Liberación de sustancias o partículas en la atmósfera como resultado de diversas actividades humanas o procesos naturales.
- **ICCA:** El Índice Centroamericano de Calidad del Aire es un valor que representa el nivel de contaminación atmosférica y que a la vez indica los efectos en la salud humana asociados a este, dentro de una región determinada.
- **Inmisiones atmosféricas:** Se refiere a la entrada o introducción de sustancias contaminantes o contaminantes en el aire. Por ejemplo, puede referirse a la emisión de gases o partículas en la atmósfera que pueden tener efectos negativos en la calidad del aire.
- **Material particulado:** Pequeñas partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire. Estas partículas son lo suficientemente pequeñas como para permanecer en suspensión en la atmósfera durante períodos prolongados y pueden tener diversos orígenes y composiciones. El tamaño de estas partículas puede variar desde partículas finas hasta partículas gruesas.
- **PM1.0:** Partículas inhalables con tamaño menor que 1 micrómetros.
- **PM2.5:** Partículas inhalables con tamaño menor que 2.5 micrómetros.

- **PM10:** Partículas inhalables con tamaño menor que 10 micrómetros.
- **Thingsboard:** Es una plataforma IoT de código abierto para la recopilación, el procesamiento, la visualización y la gestión de dispositivos de datos.

RESUMEN

El presente proyecto es una continuación directa de los trabajos "Implementación de envío de datos en la nube, mediante la utilización de Thingsboard IoT, para la toma de datos de medidor de calidad de aire" y "Estudio de calidad del aire presente en el área metropolitana y su estado respecto a los índices centroamericanos". En esta nueva fase, se realizaron importantes mejoras y adiciones para optimizar el sistema de monitoreo de calidad del aire, resultando en la versión 3.5 de la estación móvil.

Una de las principales modificaciones fue la incorporación de una nueva etapa en la estación de monitoreo, que permite la comunicación GSM entre la estación móvil y la plataforma IoT Thingsboard. Esta etapa se construyó en una placa que integra dos componentes principales: el módulo GSM SIM800L y el microcontrolador ESP32, cada uno alimentado por fuentes de energía independientes.

El módulo GSM SIM800L es alimentado por una batería tipo 18650, la cual provee suficiente energía para mantener el SIM800L en funcionamiento durante el tiempo necesario para realizar las mediciones. Además, se incorporó un interruptor que permite encender o apagar el SIM800L según sea necesario.

Por otro lado, el microcontrolador ESP32 es alimentado por un powerbank robusto, que asegura un suministro continuo de energía para que el microcontrolador pueda desempeñar sus funciones sin interrupciones ni preocupaciones por el consumo energético.

Estas mejoras permiten una comunicación más eficiente y fiable entre la estación de monitoreo móvil y la plataforma IoT, facilitando la recopilación y análisis de datos de calidad del aire en el área de estudio. Con estas actualizaciones, la estación móvil ha alcanzado su versión 3.5, dotándola de suficientes herramientas para ser utilizada en una amplia variedad de escenarios de recolección de datos.

INTRODUCCIÓN

El proyecto consiste en la optimización de una estación móvil de calidad del aire, específicamente la versión 3.5, mediante la integración de comunicación GSM con el módulo SIM800L para transmitir datos en tiempo real a la plataforma Thingsboard. Dada la creciente urbanización y el aumento del tráfico en la ciudad, es fundamental contar con un monitoreo eficiente de la calidad del aire para evaluar los niveles de contaminación a los que están expuestos tanto los residentes como los transeúntes.

La estación móvil, ahora mejorada con la incorporación de conectividad GSM mediante el módulo SIM800L, permite la transmisión en tiempo real de los datos recolectados a la API Thingsboard. Esto facilita un monitoreo más ágil y eficaz de la calidad del aire en diferentes puntos estratégicos de la ciudad, utilizando parámetros como las partículas en suspensión (PM1.0, PM2.5, PM10), formaldehído, temperatura, humedad, y la ubicación geográfica (latitud, longitud, altitud).

Para verificar y comprobar el funcionamiento de la estación móvil, se realizarán mediciones a lo largo de una ruta importante en Sonsonate. Esta ruta ha sido seleccionada debido a su relevancia en el tránsito diario y su representatividad de las condiciones de aire que enfrentan tanto los habitantes como los visitantes de la ciudad. Mediante estas mediciones, se busca obtener una visión clara y precisa de la calidad del aire en Sonsonate, así como asegurar que la estación móvil opere de manera óptima en condiciones reales.

La calidad del aire es evaluada utilizando el Índice de Calidad del Aire Centroamericano (ICCA), que clasifica los niveles de contaminación en seis categorías: buena (0-50), satisfactoria (51-100), no satisfactoria (101-150), dañina para la salud (151-200), muy dañina para la salud (201-300) y peligrosa (301-500). Este índice se basa en los estándares de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- ❖ Optimizar la estación móvil de calidad del aire a su versión 3.5 para la recolección y transmisión de datos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Implementar la conectividad GSM en la estación móvil para permitir la transmisión en tiempo real de los datos de calidad del aire a la plataforma Thingsboard.
- ❖ Realizar mediciones de calidad del aire a lo largo de una ruta importante en Sonsonate, utilizando la estación móvil optimizada.
- ❖ Analizar los datos recolectados utilizando el Índice de Calidad del Aire Centroamericano (ICCA) para clasificar los niveles de contaminación.
- ❖ Evaluar el funcionamiento de la estación móvil en condiciones reales de campo, asegurando su fiabilidad y eficiencia en la transmisión de datos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La estación móvil de calidad del aire versión 3.0 presenta una limitación significativa: no posee la capacidad de transmitir datos en tiempo real a través de conectividad GSM, lo que restringe su utilidad en la monitorización continua y oportuna de la calidad del aire. Este inconveniente impide la recopilación de datos instantáneos y la transmisión eficiente a plataformas de análisis en la nube, lo que dificulta la toma de decisiones informadas en tiempo real sobre la calidad del aire. Ante el creciente desafío de la contaminación atmosférica y su impacto en la salud pública, resulta urgente mejorar la funcionalidad de esta estación móvil. La incorporación de una nueva etapa que integre la conectividad GSM permitirá ampliar las capacidades del medidor, facilitando la transmisión de datos a plataformas IoT como Thingsboard. Esta actualización es crucial para optimizar el monitoreo de la calidad del aire, hacer más eficientes las mediciones y proporcionar información más precisa y oportuna a los responsables de la gestión ambiental y la salud pública.

JUSTIFICACION

La implementación de conectividad GSM en la estación móvil es una mejora crucial para el sistema de monitoreo de calidad del aire, pues permitirá transmitir los datos recolectados en tiempo real a la plataforma Thingsboard, facilitando un análisis más ágil y detallado de la calidad del aire en diferentes puntos de un área de estudio. Esta actualización tecnológica no solo moderniza la estación, sino que optimiza el proceso de recolección de datos al hacer posible un monitoreo remoto y continuo. A través de la conectividad GSM, se logra una integración más eficiente con la nube, eliminando la necesidad de un sistema de transmisión por cables y garantizando la recopilación de datos en tiempo real, lo que mejora la capacidad de respuesta ante niveles alarmantes de contaminación. Además, esta mejora permitirá a los responsables de la gestión ambiental y de salud pública tomar decisiones más rápidas y fundamentadas, contribuyendo a la reducción de riesgos asociados con la contaminación del aire y a la implementación de políticas públicas efectivas. En este contexto, la optimización de la estación móvil de calidad del aire no solo responde a una necesidad tecnológica, sino también a un compromiso con la salud y el bienestar de la población, proporcionando herramientas más precisas y accesibles para el control de la contaminación atmosférica.

ALCANCES

- 1) Integrar el módulo GSM SIM800L en la estación móvil para asegurar una transmisión continua y confiable de datos a la plataforma Thingsboard.
- 2) Medir de calidad del aire en una ruta seleccionada en Sonsonate, recolectando datos sobre partículas en suspensión (PM1.0, PM2.5, PM10), formaldehído, temperatura, humedad, y ubicación geográfica.
- 3) Analizar los datos recolectados utilizando el Índice de Calidad del Aire Centroamericano (ICCA).
- 4) Evaluar el rendimiento de la estación móvil versión 3.5 en condiciones reales de campo para verificar su capacidad de operar de manera eficiente y transmitir datos en tiempo real.

LIMITACIONES

- 1) La efectividad de la comunicación GSM puede verse comprometida en áreas con señal deficiente, lo que limitaría la capacidad de transmitir datos en tiempo real y podría interrumpir el monitoreo.
- 2) Las condiciones ambientales, como tormentas o interferencias en la red, pueden afectar la conexión GSM, resultando en la pérdida temporal de datos o en retrasos en la transmisión.
- 3) La calidad de la señal GSM puede variar según la ubicación, lo que puede afectar la velocidad y fiabilidad de la transmisión de datos.
- 4) La incorporación del módulo GSM implica la necesidad de un mantenimiento regular y la posibilidad de fallos técnicos, lo que puede requerir intervenciones adicionales.

GENERALIDADES DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA

La atmosfera terrestre

La atmósfera es una mezcla de gases que rodea la Tierra. Ayuda a hacer posible la vida proporcionándonos aire para respirar, protegiéndonos de la dañina radiación ultravioleta (UV) proveniente del Sol, atrapando el calor para calentar el planeta y evitando diferencias extremas de temperatura entre el día y la noche. Sin la atmósfera, las temperaturas estarían muy por debajo del punto de congelación en toda la superficie de la Tierra. En cambio, el calor absorbido y atrapado por nuestra atmósfera mantiene la temperatura promedio de la superficie de nuestro planeta en unos agradables 15°C (59°F). Algunos de los gases de la atmósfera, como el dióxido de carbono, son particularmente buenos para absorber y atrapar radiación. Los cambios en las cantidades de estos gases afectan directamente a nuestro clima. (Boris Andrés Castillo Rosales & Lyan Donovan Segovia López, 2024; Ricardo Alberto León López et al., 2023)

Cada uno de los planetas de nuestro sistema solar tiene una atmósfera, pero ninguno de ellos tiene la misma proporción de gases o estructura en capas que la atmósfera de la Tierra.

El nitrógeno y el oxígeno son, con diferencia, los gases más comunes en nuestra atmósfera. El aire seco está compuesto por aproximadamente un 78% de nitrógeno (N₂) y aproximadamente un 21% de oxígeno (O₂). El restante menos del 1% de la atmósfera es una mezcla de gases, entre ellos argón (Ar) y dióxido de carbono (CO₂).

Tabla 1

Composición química de la atmosfera

Constituyente	Porcentaje
Nitrógeno	78
Oxígeno	20.9
Argón	9x10 ⁻¹
Dióxido de carbono	3 x10 ⁻²
Neón	1 x10 ⁻⁴
Helio	5 x10 ⁻⁵
Metano	1.5 x10 ⁻⁵
Kriptón	1.1 x10 ⁻⁵
Hidrogeno	5 x10 ⁻⁶

Constituyente	Porcentaje
Óxido Nitroso	3×10^{-6}
Xenón	8×10^{-7}
Monóxido de carbono	6×10^{-7}
Ozono	3×10^{-7}
Vapor de Agua	<4
Clorofluorocarbonos	1.3×10^{-9}

Nota. La tabla muestra la concentración porcentual de diferentes gases en la atmosfera terrestre.

La atmósfera también contiene cantidades variables de vapor de agua, en promedio alrededor del 1%. También hay muchas partículas pequeñas, sólidas o líquidas, llamadas aerosoles, en la atmósfera. Los aerosoles pueden estar formados por polvo, esporas y polen, sal del mar, ceniza volcánica, humo y contaminantes introducidos por la actividad humana.

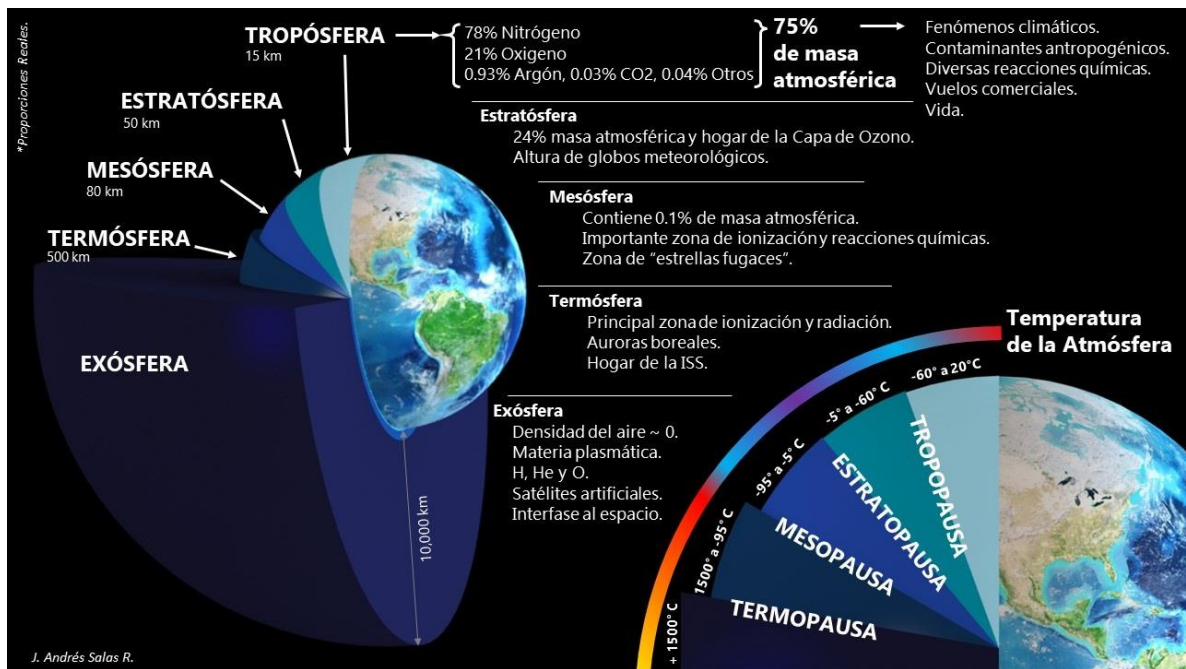
La atmósfera se vuelve más delgada (menos densa y con menor presión de aire) cuanto más se extiende desde la superficie de la Tierra. Poco a poco da paso al vacío del espacio. No existe una cima precisa de la atmósfera, pero el área entre 100 y 120 km (62 a 75 millas) sobre la superficie de la Tierra a menudo se considera el límite entre la atmósfera y el espacio porque el aire es muy fino aquí. Sin embargo, hay rastros mensurables de gases atmosféricos más allá de este límite, detectables a cientos de kilómetros/millas de la superficie de la Tierra.

Hay varias capas únicas en la atmósfera de la Tierra. Cada uno tiene temperaturas, presiones y fenómenos característicos. Vivimos en la troposfera, la capa más cercana a la superficie de la Tierra, donde se encuentran la mayoría de las nubes y donde ocurren casi todos los climas. Algunos aviones a reacción vuelan en la siguiente capa, la estratosfera, que contiene las corrientes en chorro y una región llamada capa de ozono. La siguiente capa, la mesosfera, es la más fría porque casi no hay moléculas de aire que absorban la energía térmica. Hay tan pocas moléculas para que la luz se refracte que el cielo también cambia de azul a negro en esta capa. Y más alejada de la superficie tenemos la termosfera, que absorbe gran parte de la radiación nociva que llega a la Tierra procedente del Sol, provocando que esta capa alcance temperaturas extremadamente altas. Más allá de la termosfera está la exosfera, que representa la transición de la atmósfera terrestre al espacio.

Las capas de la atmósfera terrestre se representan en la siguiente figura, organizadas según su altitud, temperatura y características específicas. Cada una de estas capas desempeña un papel crucial en los procesos climáticos, la protección del planeta y el desarrollo de la vida.

Figura 1

Composición de la atmósfera terrestre.



Nota. Pequeña infografía de la atmósfera que muestra en proporción real las capas de la atmósfera, además de mostrar otros datos importantes sobre la temperatura y funciones de las capas. Imagen extraída de (Milan Loiacono, 2024)

El Aire

El aire es un recurso común y limitado, esencial para la vida. Por ello, su uso debe estar regulado para evitar la degradación de su calidad debido a usos indebidos. Es crucial mantener su pureza para asegurar el desarrollo normal de los seres vivos y la conservación del patrimonio natural y artístico de la humanidad.

La composición química del aire se mantiene casi constante gracias a los procesos biogeoquímicos y las transformaciones cíclicas de sus componentes, como los ciclos del carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre. Estos ciclos se autorregulan mediante diversos mecanismos, pero las actividades humanas pueden acelerarlos, desequilibrarlos y movilizar sus reservas, lo que resulta en la presencia de contaminantes en la atmósfera. (Boris Andrés Castillo Rosales & Lyan Donovan Segovia López, 2024)

El aire es insípido, transparente, inodoro e incoloro en pequeñas cantidades, y está compuesto por una mezcla de gases que forman la atmósfera, incluyendo nitrógeno, oxígeno, dióxido de

carbono, neón y helio, entre otros. Es fundamental para la vida en la Tierra, ya que sin él no podrían existir los seres humanos, las plantas y los animales, ni llevar a cabo funciones vitales como la fotosíntesis, la respiración, la existencia del fuego, el sonido, el viento, las nubes y las lluvias.

Las funciones del aire están relacionadas con el clima y la sensación térmica debido a fenómenos como el enfriamiento, la movilidad, la presión y los niveles de humedad. La capa de ozono filtra la radiación ultravioleta del sol, protegiendo así la Tierra. Además, condiciones específicas del aire en la atmósfera pueden dar lugar a desastres naturales como huracanes y tornados. Los vientos se generan por la expansión y el movimiento del aire en la atmósfera.

Contaminación atmosférica y del aire

La contaminación atmosférica se refiere a la presencia de sustancias en la atmósfera en cantidades que causan molestias o representan un riesgo para la salud de las personas y otros seres vivos. Estas sustancias pueden ser de cualquier naturaleza y tener la capacidad de dañar materiales, reducir la visibilidad o producir olores desagradables. Generalmente, se considera contaminación atmosférica a aquellas alteraciones que tienen efectos perjudiciales sobre los seres vivos y los elementos materiales, excluyendo aquellas que son inofensivas. [\(Boris Andrés Castillo Rosales & Lyan Donovan Segovia López, 2024\)](#)

Los principales mecanismos de contaminación atmosférica incluyen procesos industriales que implican combustión, como los que ocurren en industrias, automóviles y sistemas de calefacción residencial, los cuales generan dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, entre otros contaminantes. Asimismo, algunas industrias emiten gases nocivos durante sus procesos productivos, como cloro o hidrocarburos que no se han quemado completamente.

La contaminación atmosférica puede tener un impacto local, cuando los efectos se sienten en las inmediaciones de la fuente emisora, o global, cuando el contaminante afecta el equilibrio del planeta y zonas alejadas de los focos emisores.

Clasificación de contaminantes

La mayoría de los contaminantes del aire afectan directamente la salud humana, ya que ingresan al cuerpo a través del sistema respiratorio o la piel. En otros casos, los contaminantes se trasladan del aire al suelo o cuerpos de agua, ingresando posteriormente a la cadena alimenticia. Los contaminantes son transportados desde la atmósfera a la superficie terrestre mediante la sedimentación de partículas en el aire y/o la absorción y arrastre del agua de lluvia.(Ricardo Alberto León López et al., 2023)

La composición química del aire se mantiene prácticamente constante debido a los procesos biogeoquímicos y las transformaciones cíclicas de sus componentes, especialmente los ciclos del carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre. Estos ciclos se autorregulan mediante diversos mecanismos; sin embargo, la actividad humana ha acelerado estos procesos, desequilibrándolos y movilizandolos reservas, lo que resulta en la presencia de contaminantes atmosféricos.(Boris Andrés Castillo Rosales, Lyan Donovan Segovia-López, et al., 2024)

La contaminación del aire puede clasificarse según su origen o su evolución. En cuanto a su origen, puede ser natural, como los incendios forestales, erupciones volcánicas, tormentas y procesos biológicos; o puede ser antropogénica, es decir, causada por actividades humanas como las emisiones industriales y la combustión de vehículos. Respecto a su evolución en la atmósfera, la contaminación se divide en dos categorías principales: contaminantes primarios, que son emitidos directamente al aire, y contaminantes secundarios, que se forman a partir de reacciones químicas de los contaminantes primarios en la atmósfera. Es importante destacar que la permanencia de un contaminante en la atmósfera varía según su naturaleza específica.

Los contaminantes primarios

Son aquellos que se emiten directamente a la atmósfera. Los principales contaminantes primarios y sus efectos:

- **Monóxido de Carbono (CO):** Este gas se produce debido a la combustión incompleta de materia orgánica, siendo el tráfico y la quema de combustibles fósiles sus principales fuentes de emisión. Es un gas inflamable y tóxico para los seres

humanos, incluso en bajas concentraciones. Además, es precursor del dióxido de carbono (CO_2) y del ozono (O_3).

- **Dióxido de Azufre (SO_2):** Principalmente emitido por actividades humanas como la quema de carbón y petróleo, aunque también se encuentra en la naturaleza, por ejemplo, en erupciones volcánicas. El SO_2 puede transformarse en ácido sulfúrico (H_2SO_4), contribuyendo a la lluvia ácida.
- **Óxidos de Nitrógeno (NO_x):** Este grupo incluye el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2), que provienen principalmente de los vehículos motorizados, incendios y volcanes. Los NO_x son fundamentales en la formación del smog y, al convertirse en ácido nítrico, también causan lluvia ácida.
- **Amoníaco (NH_3):** Un gas inflamable y tóxico que causa quemaduras, con emisiones significativas en la agricultura debido al uso de fertilizantes. Es uno de los pocos contaminantes cuya generación se mantiene estable.
- **Partículas en Suspensión (PM):** Compuestas por polvo, polen, cenizas, partículas metálicas, entre otros. Su peligrosidad depende del tamaño, ya que las partículas más pequeñas pueden ser absorbidas por la sangre, actuando como vehículos para sustancias nocivas.
- **Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs):** Hidrocarburos que se encuentran en estado gaseoso a temperatura ambiente. Estos compuestos tóxicos pueden generar oxidantes fotoquímicos como el ozono.
- **Metales Pesados:** Incluyen plomo (Pb) y mercurio (Hg), que son altamente peligrosos debido a su acumulación y persistencia en el medio ambiente. Las fuentes principales son instalaciones de combustión, producción de cemento y vidrio, e incineración de residuos.

Los contaminantes secundarios

Se forman a través de procesos químicos atmosféricos que actúan sobre contaminantes primarios o sobre compuestos no contaminantes en la atmósfera. Algunos de los contaminantes secundarios y sus efectos se detallan a continuación:

- **Ozono Troposférico ("Ozono Malo"):** Se forma a partir de la interacción de precursores como los COVs, CO y NO_x en presencia de luz solar. Este ozono, a

diferencia del ozono estratosférico que protege contra la radiación ultravioleta, es nocivo para la salud humana, causando problemas respiratorios y oculares. También afecta negativamente a las plantas, dañando los cultivos al interferir con la fotosíntesis.

- **Smog Fotoquímico:** Es una mezcla de ozono, NO_x, peróxido de hidrógeno y partículas ácidas, entre otros. Este tipo de niebla química es responsable de la "boina de contaminación" observada en muchas ciudades y se agrava por la inversión térmica.
- **Contaminación Ácida:** Ocurre cuando el suelo y el agua se acidifican ($\text{pH} < 7$). Este fenómeno no solo afecta al medio ambiente natural, sino también a estructuras urbanas, causando la erosión superficial de los edificios, conocida como "mal de la piedra". Esta alteración es el resultado de la deposición ácida de SO_x y NO_x.

Tanto los contaminantes primarios como los secundarios pueden depositarse en la superficie terrestre mediante precipitación seca o húmeda, afectando a personas, animales, ecosistemas acuáticos, bosques, cultivos y materiales. En todos los países existen límites impuestos a determinados contaminantes para proteger la salud de la población y su bienestar.

Fuentes de contaminación

La contaminación del aire proviene de una variedad de fuentes, tanto naturales como artificiales, que contribuyen a la degradación de la calidad del aire en zonas urbanas y rurales. Estas fuentes se clasifican en dos categorías principales: fijas y móviles. Las fuentes fijas incluyen actividades mineras e industriales, mientras que las fuentes móviles se refieren a las emisiones de vehículos de combustión interna, como el transporte público. Además, el suelo y el agua también pueden ser contribuyentes menores a la contaminación del aire. [\(Boris Andrés Castillo Rosales & Lyan Donovan Segovia López, 2024\)](#)

Fuentes Naturales

Las emisiones contaminantes generadas por procesos naturales abarcan diversas actividades en la geosfera, biosfera, atmósfera e hidrosfera:

- **Incendios forestales:** Ocurren de manera natural y liberan grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno, humo, polvo y cenizas.

- Erupciones volcánicas: Emiten compuestos sulfurados como dióxido de azufre (SO₂) y ácido sulfhídrico (H₂S), junto con una considerable cantidad de partículas que se dispersan con el viento.
- Descargas eléctricas: Durante las tormentas, las descargas eléctricas pueden oxidar el nitrógeno atmosférico, formando óxidos de nitrógeno.
- Océano: Las partículas de sal son liberadas al aire desde el océano y transportadas por los vientos.
- Procesos biológicos: La polinización por el viento en plantas como gramíneas, olivos y otras puede liberar polen y esporas que, al concentrarse en el aire, causan alergias respiratorias. Además, la descomposición anaeróbica de materia orgánica genera metano (CH₄).

Fuentes Artificiales

Las actividades humanas son responsables de la mayor parte de la contaminación del aire, principalmente debido al uso de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas. Entre las principales actividades humanas que generan contaminación se incluyen:

- Transporte: Los automóviles y aviones son grandes fuentes de contaminación. El ferrocarril y la navegación tienen un impacto menor debido a su lejanía de los centros urbanos. El grado de contaminación depende del tipo de combustible utilizado, el tipo de motor, el uso de catalizadores y la densidad del tráfico.
- Industria: Las actividades industriales como las centrales térmicas, cementeras, siderúrgicas, papeleras y químicas son altamente contaminantes.
- Calefacción doméstica: El uso de calentadores y otros aparatos que funcionan con combustibles fósiles (carbón, gas, diésel, gas natural) genera contaminación. La cantidad de contaminación depende del tipo de combustible y del diseño y mantenimiento de los equipos.
- Agricultura y ganadería: El uso intensivo de fertilizantes, grandes áreas de riego (arrozales) y la alta concentración de ganado aumentan la emisión de gases de efecto invernadero, como el metano. Además, el tratamiento de residuos sólidos mediante incineración contribuye a la contaminación.

Estas fuentes, tanto naturales como artificiales, juegan un papel crucial en la contaminación del aire, afectando la calidad del aire y, por ende, la salud y el bienestar de los seres vivos y el medio ambiente.

Difusión de los contaminantes en el aire

La dispersión y movimiento de los contaminantes en la atmósfera están influenciados por varios factores, incluyendo el clima, la topografía, el viento, la estabilidad atmosférica, la radiación solar y la precipitación. El viento, definido como el movimiento del aire, juega un papel crucial en la concentración de contaminantes en una región específica. A mayor velocidad del viento, menor será la concentración de contaminantes en esa área.

La radiación solar también es un factor significativo, especialmente en la formación de ozono, ya que facilita la combinación de vapores orgánicos con óxidos de nitrógeno. Por otro lado, la lluvia actúa como un agente de limpieza natural al eliminar partículas contaminantes del aire, lo que ayuda a reducir las partículas generadas por la construcción y ciertos procesos industriales. En grandes ciudades situadas en áreas de topografía compleja, como valles o regiones montañosas, las concentraciones de contaminantes suelen ser más altas debido a la dificultad para su dispersión.

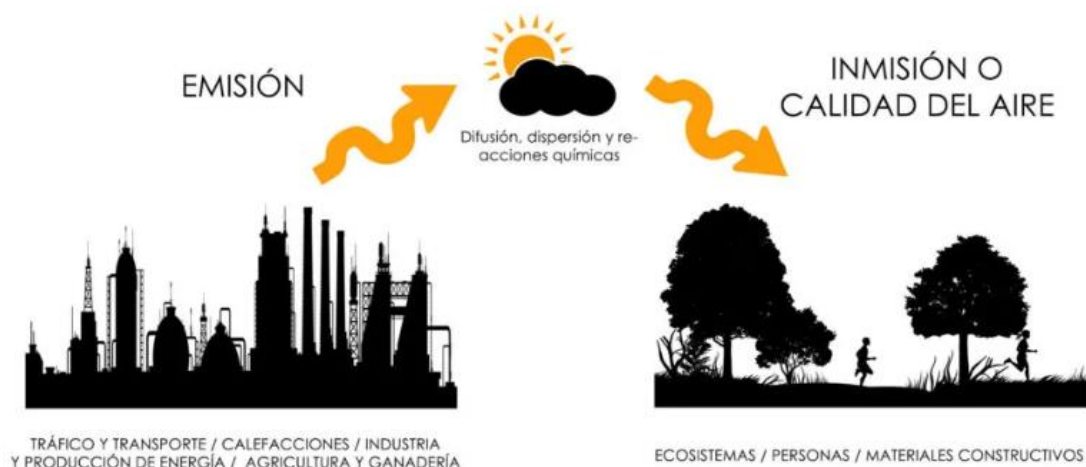
La contaminación del aire sigue varios procesos y factores clave. Primero, se produce la emisión de contaminantes, cuyos niveles dependen de las características de las fuentes emisoras y las condiciones en las que ocurren estas emisiones. Una vez emitidos, los contaminantes permanecen en la atmósfera durante un tiempo conocido como tiempo de residencia, el cual varía según la reactividad química de cada contaminante, la capacidad de la lluvia para limpiar la atmósfera y la habilidad del medio ambiente para dispersarlos.

La fase final de la contaminación atmosférica considera los efectos de los contaminantes sobre los seres vivos, las estructuras (como edificios) y las propiedades intrínsecas de la atmósfera, tales como la reducción de la visibilidad y la alteración del balance térmico del sistema. La contaminación del aire comienza cuando las sustancias contaminantes son liberadas al aire desde diversas fuentes, creando diferentes niveles de emisión. Una vez en la atmósfera, los contaminantes pasan por varios procesos de transporte y transformación, incluyendo la dilución y reacciones químicas. Estos procesos determinan la concentración específica de cada contaminante en un lugar determinado, conocida como nivel de inmisión.

Los niveles de inmisión, o calidad del aire, son esenciales para evaluar el impacto de un contaminante en la salud humana y el medio ambiente. (Boris Andrés Castillo Rosales & Lyan Donovan Segovia López, 2024)

Figura 2

Fuentes de emisión e inmisión.



Nota. La imagen muestra los procesos de emisión, difusión, dispersión y reacciones químicas relacionados con la contaminación ambiental. Imagen extraída de (Envira, 2020)

Emisión

El concepto de emisión es fundamental y se refiere a la liberación de sustancias contaminantes al medio ambiente desde diversas fuentes, tales como chimeneas industriales, superficies comerciales e industriales, chimeneas residenciales, vehículos, locomotoras y aeronaves. La cantidad de contaminantes que una fuente de emisión libera a la atmósfera durante un período determinado se mide a la salida de la fuente.

La generación de contaminantes atmosféricos continúa a través de diversos procesos como transporte, difusión, mezcla o acumulación, los cuales están influenciados por fenómenos meteorológicos que determinan el potencial de contaminación. Además, un conjunto de reacciones químicas transforma los contaminantes, ya que la atmósfera es un medio oxidante que recibe energía solar y contiene sustancias químicas altamente reactivas, como el hidroxilo y otros radicales libres. El resultado final de estos procesos permite determinar los valores de emisión de contaminantes, lo cual indica la calidad del aire.

Inmisión

El término inmisión se refiere a la recepción de contaminantes en el medio ambiente, ya sea en el aire, suelo o agua, procedentes de una fuente emisora. También se utiliza para describir los niveles de concentración de sustancias contaminantes en un medio determinado. Las emisiones de partículas sólidas, gases o vapores, que son perjudiciales o molestos para la vida, especialmente para los seres humanos, se transmiten a la atmósfera a través de focos emisores.

La inmisión no es simplemente la suma de las sustancias emitidas, ya que hay disoluciones y reabsorciones que ocurren naturalmente en la atmósfera. Además, las reacciones naturales o la combinación de diferentes tipos de emisiones pueden agravar el problema. La inmisión se relaciona con la cantidad de contaminantes presentes en una atmósfera específica después de haber sido transportados, dispersados, mezclados y haber entrado en contacto con organismos vivos y materiales afectados por ellos.

Cuando los niveles de inmisión no son adecuados, la calidad del aire disminuye, lo que genera efectos negativos sobre diversos receptores, incluyendo seres humanos, animales, plantas y ecosistemas en general. Los factores que influyen en la dinámica de la dispersión de los contaminantes y sus concentraciones incluyen las características de emisión, las condiciones atmosféricas, y las características geográficas y topográficas.

Calidad del Aire

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), una de cada nueve muertes a nivel global es consecuencia de condiciones relacionadas con la contaminación atmosférica. En 2016, se atribuyeron alrededor de 249,000 muertes prematuras a la contaminación del aire exterior y aproximadamente 83,000 a la contaminación del aire en interiores debido al uso de combustibles sólidos en los hogares en las Américas.

En 2019, la OMS estimó que el 37% de las muertes prematuras vinculadas a la contaminación del aire exterior se debieron a cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, mientras que el 18% y el 23% de las muertes se relacionaron con enfermedades pulmonares obstructivas crónicas e infecciones respiratorias agudas, respectivamente. El 11% de las muertes fueron atribuidas a cáncer de las vías respiratorias.

La guía de la OMS sobre la calidad del aire abarca contaminantes como material particulado, monóxido de carbono, ozono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre. Existen diferencias significativas entre grupos poblacionales y ubicaciones geográficas; por ejemplo, los residentes cercanos a carreteras o zonas industriales están expuestos a altos niveles de contaminación ambiental exterior, mientras que aquellos que usan combustibles sólidos como fuente de energía doméstica pueden ser los más afectados por la contaminación del aire en interiores.

El impacto más significativo en la salud es la mortalidad infantil, con más de la mitad de las muertes de niños menores de cinco años debidas a infecciones agudas de las vías respiratorias. La mayoría de las muertes atribuibles a la contaminación atmosférica en la población general están relacionadas con enfermedades no transmisibles. De acuerdo con la OMS, el 36% de las muertes por cáncer de pulmón, el 35% de la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), el 34% de los accidentes cerebrovasculares y el 27% de las cardiopatías isquémicas son atribuibles a la contaminación atmosférica.

En El Salvador, la calidad del aire ha empeorado a lo largo de los años debido al crecimiento poblacional, el aumento del parque vehicular, la quema de desechos sólidos y agrícolas, entre otros factores. En 1997, FUSADES llevó a cabo un monitoreo de la calidad del aire y descubrió que los niveles de contaminantes superaban los valores guía de la OMS. En 2012, el Ministerio del Medio Ambiente, en coordinación interinstitucional, realizó el "Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio del Aire de El Salvador: 2009", identificando los sectores prioritarios para la intervención y control de emisiones contaminantes, tales como partículas PM10 y PM2.5, monóxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y ozono. [\(José Francisco Chávez Cristóbal & Lidia Salamanca, 2007\)](#)

El material particulado PM10 y PM2.5 proviene principalmente de la combustión de leña en los sectores residencial, comercial e industrial, representando el 40% del total de estos contaminantes, seguido por la quema de basura a cielo abierto y agrícola (16%) y las emisiones vehiculares. En cuanto al monóxido de carbono (CO), se genera principalmente por la combustión incompleta de combustibles en vehículos, siendo las camionetas a gasolina responsables del 34.7%, los automóviles particulares y motocicletas del 22.3% y el 12.3%,

respectivamente. La combustión de leña en sectores residenciales, comerciales e industriales contribuye con un 19.1%.[\(Francisco Alexander Aguilera González, 2020\)](#)

Las emisiones anuales de fuentes fijas fueron de aproximadamente 58 a 178 toneladas, con el 69.2% de SO₂, el 21.3% de gases orgánicos reactivos (GOR) y el 7.4% de NO₂. El estudio "Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio del Aire de El Salvador: 2009" sirvió como base para acciones que mejoraron la gestión de la calidad del aire a nivel nacional.

Actualmente, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) es responsable de informar sobre la concentración de material particulado con un diámetro menor a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}). Esta información se obtiene de los datos registrados por la red de estaciones de monitoreo de la calidad del aire en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), ubicadas en el Centro de Gobierno, la Escuela Militar y la Universidad Don Bosco. Los datos pueden ser consultados en la página web del MARN - Calidad del Aire.[\(Ministerio de Medio Ambiente de El Salvador, 2018, 2024\)](#)

Materia particulada (PM₁₀, PM_{2.5}).

Las partículas en suspensión (PM) en el aire no son un solo contaminante, sino más bien una mezcla de muchas especies químicas. Es una mezcla compleja de sólidos y aerosoles compuesta de pequeñas gotas de líquido, fragmentos sólidos secos y núcleos sólidos con recubrimientos líquidos. Las partículas varían ampliamente en tamaño, forma y composición química y pueden contener iones inorgánicos, compuestos metálicos, carbono elemental, compuestos orgánicos y compuestos de la corteza terrestre. Las partículas se definen por su diámetro a efectos de regulación de la calidad del aire. Las que tienen un diámetro de 10 micrones o menos (PM₁₀) son inhalables hacia los pulmones y pueden provocar efectos adversos para la salud. Las partículas finas se definen como partículas de 2.5 micrones o menos de diámetro (PM_{2.5}). Por lo tanto, PM_{2.5} comprende una porción de PM₁₀.[\(Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2024; Boris Andrés Castillo Rosales, Lyan Donovan Segovia-López, et al., 2024; Francisco Alexander Aguilera González, 2020; Ricardo Alberto León López et al., 2023\)](#)

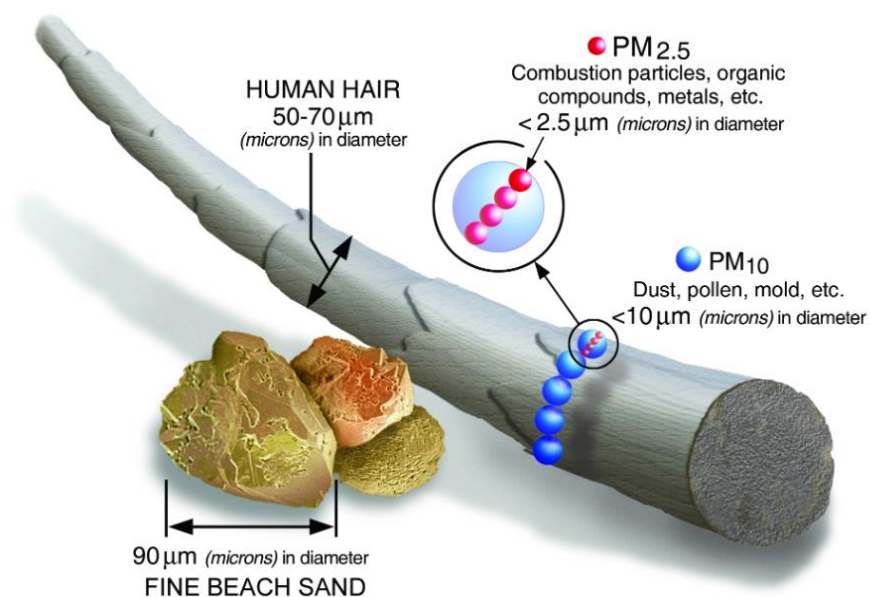
Las PM₁₀ y PM_{2.5} a menudo provienen de diferentes fuentes de emisiones y también tienen diferentes composiciones químicas. Las emisiones procedentes de la combustión de gasolina, petróleo, diésel o madera producen gran parte de la contaminación PM_{2.5} que se encuentra

en el aire exterior, así como una proporción significativa de PM10. PM10 también incluye polvo de sitios de construcción, vertederos y agricultura, incendios forestales y quema de maleza/residuos, fuentes industriales, polvo arrastrado por el viento de tierras abiertas, polen y fragmentos de bacterias.(Francisco Alexander Aguilera González, 2020)

Las PM pueden emitirse directamente desde fuentes (contaminantes primarios) o formarse en la atmósfera a través de reacciones químicas de gases (contaminantes secundarios) como el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NOX) y ciertos compuestos orgánicos. Estos compuestos orgánicos pueden ser emitidos tanto por fuentes naturales, como árboles y vegetación, como por fuentes artificiales (antropógenos), como procesos industriales y gases de escape de vehículos de motor. Los tamaños relativos de las partículas PM10 y PM2.5 se comparan en la siguiente figura.

Figura 3

Comparación del tamaño del cabello y arena fina con partículas PM2.5 y PM10.



Nota. La imagen muestra los tamaños del material particulado (PM) y cómo se encuentran suspendidos en el ambiente, provenientes de fuentes como polvo, humo y reacciones químicas. Imagen extraída de (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2024)

Monóxido de Carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas incoloro, inodoro e insípido que se produce como resultado de la combustión incompleta de materiales que contienen carbono, tales como el gas natural, el carbón, el petróleo y la madera. Es altamente tóxico para los seres humanos y los animales cuando se inhala en altas concentraciones.

Este gas se forma principalmente en situaciones donde la ventilación es inadecuada, como en sistemas de calefacción y calderas defectuosos, motores de automóviles funcionando en garajes cerrados, chimeneas obstruidas o generadores de gasolina utilizados en espacios cerrados. También puede acumularse en espacios confinados como minas, pozos y bodegas.

La inhalación de monóxido de carbono puede tener graves efectos en la salud humana. Este gas se une a la hemoglobina en la sangre, dificultando el transporte de oxígeno a los tejidos del cuerpo. Los síntomas de intoxicación por monóxido de carbono incluyen dolor de cabeza, mareos, náuseas, debilidad, confusión y pérdida del conocimiento. En casos graves, puede causar daño cerebral, coma e incluso la muerte.

Ozono (O₃)

El ozono es un gas presente en la atmósfera terrestre en cantidades relativamente bajas. Se forma naturalmente en la atmósfera a través de la interacción de la radiación ultravioleta del sol con las moléculas de oxígeno (O₂).

En la estratosfera, el ozono forma la "capa de ozono", que actúa como un escudo protector al filtrar la mayor parte de la radiación ultravioleta (UV) del sol, evitando que llegue a la superficie de la Tierra. La radiación UV puede ser dañina para los seres vivos, ya que puede causar quemaduras solares, aumentar el riesgo de cáncer de piel y afectar los ecosistemas.

Sin embargo, en la troposfera, la capa más baja de la atmósfera, el ozono tiene un efecto negativo. El ozono troposférico se forma por la reacción de contaminantes emitidos por actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles y las emisiones de los vehículos, con la luz solar. Este tipo de ozono, conocido como "ozono troposférico" o "ozono a nivel del suelo", es considerado un contaminante del aire y puede ser perjudicial para la salud humana y el medio ambiente.

La exposición prolongada al ozono a nivel del suelo puede causar problemas respiratorios como asma, reducir la función pulmonar, irritar los ojos y las vías respiratorias, y agravar enfermedades cardiovasculares. Para reducir los niveles de ozono troposférico, es importante controlar las emisiones de contaminantes precursores del ozono, como los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), que se generan principalmente por la quema de combustibles fósiles y actividades industriales. Además, se deben promover prácticas sostenibles y el uso de tecnologías más limpias para minimizar la liberación de estos contaminantes a la atmósfera.

Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

El dióxido de nitrógeno es un gas incoloro y denso que pertenece a la familia de los óxidos de nitrógeno. Se forma como resultado de la combustión de combustibles fósiles, como el petróleo, el gas natural y el carbón, especialmente en procesos industriales y en el escape de los vehículos de motor.

Este gas es un contaminante atmosférico importante y contribuye a la formación del smog y la lluvia ácida. También es un precursor del ozono troposférico, un contaminante secundario que puede causar problemas respiratorios y afectar la salud humana. La exposición prolongada al dióxido de nitrógeno puede causar irritación pulmonar, dificultad para respirar, disminución de la función pulmonar y un aumento del riesgo de infecciones respiratorias. Las personas con enfermedades respiratorias crónicas, como el asma, son especialmente susceptibles a los efectos del dióxido de nitrógeno.

Dióxido de Azufre (SO₂)

El dióxido de azufre es un gas incoloro con un olor acre y sofocante. En condiciones normales de temperatura y presión, es más denso que el aire. Este gas se produce principalmente durante la combustión de combustibles fósiles que contienen azufre, como el petróleo y el carbón. También puede generarse en procesos industriales, como la producción de metales no ferrosos, la fabricación de papel y la producción de productos químicos.

El dióxido de azufre tiene diversas aplicaciones industriales, como en la producción de ácido sulfúrico, uno de los productos químicos más importantes en la industria. También se utiliza como agente blanqueador en la industria de alimentos y bebidas, así como en la preservación de frutas secas y la elaboración de vinos. Sin embargo, el dióxido de azufre puede tener

efectos perjudiciales para la salud y el medio ambiente. Al liberarse a la atmósfera, puede reaccionar con otros compuestos para formar partículas finas de sulfato, que contribuyen a la formación de niebla y lluvia ácida. La exposición prolongada al dióxido de azufre puede irritar los pulmones y las vías respiratorias, y empeorar los síntomas en personas con enfermedades respiratorias preexistentes, como el asma.

Formaldehído

El formaldehído es una sustancia química inflamable, incolora y de olor fuerte que se produce industrialmente y se utiliza en materiales de construcción como tableros de partículas, madera contrachapada y otros productos de madera prensada. Además, se utiliza habitualmente como fungicida, germicida y desinfectante, y como conservante en morgues y laboratorios médicos. El formaldehído también se encuentra naturalmente en el medio ambiente. Se produce durante la descomposición del material vegetal en el suelo y durante procesos químicos normales en la mayoría de los organismos vivos. También es un producto de combustión que se encuentra en el humo del tabaco.

Las personas están expuestas principalmente al inhalar gas o vapor de formaldehído del aire o al absorber líquidos que contienen formaldehído a través de la piel. Los trabajadores que producen formaldehído o productos que contienen formaldehído, así como los técnicos de laboratorio, ciertos profesionales de la salud y los empleados de la funeraria, pueden estar expuestos a niveles más altos de formaldehído que las personas de la población general.

El público en general puede estar expuesto al formaldehído al respirar aire contaminado procedente de fuentes como productos de madera prensada, humo de tabaco y emisiones de los tubos de escape de los automóviles. Otra fuente potencial de exposición al formaldehído es el uso de aparatos que queman combustible sin ventilación, como estufas de gas, estufas de leña y calentadores de queroseno.

Los estudios de trabajadores expuestos a altos niveles de formaldehído, como trabajadores industriales y embalsamadores, han encontrado que el formaldehído causa leucemia mieloide y cánceres raros, incluidos los cánceres de los senos paranasales, la cavidad nasal y la nasofaringe.

La Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. recomienda el uso de productos de madera prensada “para exteriores” para limitar la exposición al formaldehído en el hogar. Los niveles de formaldehído en hogares y lugares de trabajo también se pueden reducir garantizando una ventilación adecuada, temperaturas moderadas y niveles reducidos de humedad mediante el uso de aires acondicionados y deshumidificadores.

Factores climáticos que afectan la calidad del aire

Humedad

La humedad, o la cantidad de vapor de agua presente en el aire, juega un papel crucial en la calidad del aire. Un alto nivel de humedad puede influir en la concentración y la dispersión de los contaminantes atmosféricos de varias maneras:

1. **Interacción con Partículas:** La humedad puede hacer que las partículas suspendidas en el aire, como el material particulado (PM), se aglomeren, formando partículas más grandes y pesadas que pueden sedimentar más rápidamente. Esto puede reducir temporalmente la concentración de PM en el aire, pero también puede llevar a una mayor deposición de contaminantes en superficies terrestres y acuáticas.
2. **Formación de Contaminantes Secundarios:** La humedad alta favorece las reacciones químicas en la atmósfera, facilitando la formación de contaminantes secundarios. Por ejemplo, en presencia de dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x), la humedad puede contribuir a la formación de ácido sulfúrico (H₂SO₄) y ácido nítrico (HNO₃), que son componentes clave de la lluvia ácida.
3. **Disminución de la Calidad del Aire Interior:** En ambientes interiores, la alta humedad puede aumentar la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV) de materiales de construcción y muebles, empeorando la calidad del aire interior.
4. **Impacto en la Salud Humana:** La combinación de alta humedad y contaminantes atmosféricos puede agravar problemas respiratorios en personas sensibles, como aquellos con asma o enfermedades pulmonares crónicas.

Temperatura

La temperatura también afecta significativamente la calidad del aire, influenciando tanto la formación como la dispersión de contaminantes:

1. Formación de Ozono Troposférico: Las altas temperaturas aceleran las reacciones fotoquímicas entre los óxidos de nitrógeno (NOx) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), resultando en una mayor formación de ozono troposférico (O₃). Este es un contaminante secundario que puede causar problemas respiratorios y otros efectos adversos para la salud.
2. Dispersión de Contaminantes: La temperatura influye en la estabilidad atmosférica. Durante el día, el calentamiento de la superficie terrestre puede crear corrientes ascendentes que ayudan a dispersar los contaminantes verticalmente, diluyendo su concentración cerca de la superficie. Sin embargo, en condiciones de inversión térmica, donde una capa de aire caliente atrapa el aire frío y contaminado cerca del suelo, la dispersión se reduce drásticamente, llevando a una acumulación de contaminantes.
3. Emisiones de Contaminantes: Las altas temperaturas pueden incrementar las emisiones de contaminantes de fuentes naturales y antropogénicas. Por ejemplo, los vehículos y las plantas industriales tienden a emitir más contaminantes en climas cálidos debido a la mayor volatilidad de los combustibles y a una mayor actividad industrial.
4. Salud Humana: Las altas temperaturas, combinadas con altos niveles de contaminación, pueden aumentar el riesgo de golpes de calor y exacerbar enfermedades cardiovasculares y respiratorias.

Normativas sobre la calidad del aire

Las normativas sobre la calidad del aire están diseñadas para proteger la salud pública y el medio ambiente, estableciendo límites y directrices para la concentración de contaminantes en el aire. Estas normativas varían según el país y la región, pero a menudo se basan en recomendaciones de organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Para nuestro caso hemos optado por el Índice Centroamericano de la calidad del aire (ICCA).([Ministerio de Salud de El Salvador, 2002](#))

Índice Centroamericano de Calidad del Aire

A causa de todos los problemas que trae consigo la presencia de elementos contaminantes en el aire, es importante medir el nivel de pureza de esta. Existen muchos indicadores que toman

en cuenta diferentes enfoques, pero el Índice Centroamericano de Calidad del Aire (ICCA) es uno el cual toma como parámetro principal los efectos a la salud que pueden sufrir las personas al exponerse a aire contaminado. Para ello el ICCA se subdivide en 6 niveles en una escala que va desde 0 a 500, en donde el 0 se interpreta como un aire totalmente puro libre de contaminantes y el 500 como un aire totalmente toxico y dañino para la salud.([Boris Andrés Castillo Rosales, Lyan Donovan Segovia López, et al., 2024; Jessica A. Johnson & Alan C. Chan, 2009](#))

Tabla 2

Niveles del Índice Centroamericano de Calidad del Aire para material particulado PM 2.5

Rango ICCA	Estado del Aire	Concentración $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Descripción
0-50	SALUDABLE	0-15.3	Aire libre de impurezas, sin ningún impacto a la salud.
50-100	REGULAR	15.3-40.2	Aire ligeramente lleno de impurezas, sin ningún impacto a la salud.
100-150	DEFICIENTE	40.2-65.4	Adultos mayores y niños con enfermedades respiratorias deben evitar estar expuesto a este nivel de concentración por largos periodos de tiempo.
150-200	PERJUDICIAL	65.4-159	Personas con antecedentes o enfermedades respiratorias deben evitar inhalar aire con este nivel de concentración por largos periodos de tiempo.
200-300	TOXICO	159-250	Cualquier persona sin importar sus antecedentes respiratorios debe evitar estar expuesto a este nivel de contaminación por cortos periodos de tiempo.
300-500	ALTAMENTE TOXICO	250-500	Se debe abandonar el lugar en el cual se encuentra este nivel de concentración inmediatamente.

Nota. La tabla muestra la escala de la normativa ICCA para el material particulado PM2.5. Tabla extraída de (Boris Andrés Castillo Rosales, Lyan Donovan Segovia-López, et al., 2024; Ministerio de Medio Ambiente de El Salvador, 2024; Ortiz Moreano Erika Paulina & Tigsi Jiménez Víctor Alfonso, 2020; Sistema de la Integración Centroamericana, 2009)

Tabla 3*Niveles del Índice Centroamericano de Calidad del Aire para material particulado PM 10*

Rango ICCA	Estado del Aire	Concentración $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Descripción
0-50	SALUDABLE	0-54	Aire libre de impurezas, sin ningún impacto a la salud.
50-100	REGULAR	54-154	Aire ligeramente lleno de impurezas, sin ningún impacto a la salud.
100-150	DEFICIENTE	154-254	Adultos mayores y niños con enfermedades respiratorias deben evitar estar expuesto a este nivel de concentración por largos periodos de tiempo.
150-200	PERJUDICIAL	254-354	Personas con antecedentes o enfermedades respiratorias deben evitar inhalar aire con este nivel de concentración por largos periodos de tiempo.
200-300	TOXICO	354-424	Cualquier persona sin importar sus antecedentes respiratorios debe evitar estar expuesto a este nivel de contaminación por cortos periodos de tiempo.
300-500	ALTAMENTE TOXICO	424-604	Se debe abandonar el lugar en el cual se encuentra este nivel de concentración inmediatamente.

Nota. La tabla muestra la escala de la normativa ICCA para el material particulado PM10. Tabla extraída de (Boris Andrés Castillo Rosales, Lyan Donovan Segovia-López, et al., 2024; Ministerio de Medio Ambiente de El Salvador, 2024; Ortiz Moreano Erika Paulina & Tigi Jiménez Víctor Alfonso, 2020; Sistema de la Integración Centroamericana, 2009)

En las dos tablas anteriores se define un rango tanto del ICCA (no existe este índice para las partículas PM1) como de la concentración en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para los 6 diferentes niveles de peligro. Para emplear de buena manera las tablas, se debe medir el valor de concentración de las partículas PM2.5 o PM10 en el área de investigación para determinar en qué rango de concentración e ICCA se trabajará utilizando la tabla correspondiente. Una vez obtenido el valor de concentración y definido el rango, se debe aplicar la siguiente formula. (Boris Andrés

Castillo Rosales, Lyan Donovan Segovia López, et al., 2024; Carlos Javier Chicojay Morales, 2022)

$$ICCA = \frac{ICCA_{sup} - ICCA_{inf}}{C_{sup} - C_{inf}} (C_{medida} - C_{inf}) + ICCA_{inf} \quad (1)$$

Donde.

- $ICCA_{sup}$: Valor superior del ICCA del rango.
- $ICCA_{inf}$: Valor inferior del ICCA del rango.
- C_{sup} : Valor superior de concentración del rango.
- C_{inf} : Valor inferior de concentración del rango.
- C_{medida} : Valor de concentración medido.

El valor de los rangos depende de C_{medida}

ESTACIÓN MÓVIL PARA LA CALIDAD DEL AIRE

Descripción de la Estación Móvil

Una estación móvil para la calidad del aire es un dispositivo portátil diseñado para monitorizar y medir la calidad del aire en diversas ubicaciones. Estas estaciones están equipadas con sensores y equipos de análisis capaces de medir varios contaminantes atmosféricos, tales como partículas suspendidas (PM10, PM2.5), óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃) y compuestos orgánicos volátiles (COV). Aunque sus mediciones pueden ser menos precisas en comparación con las estaciones fijas más avanzadas, son herramientas valiosas para obtener datos en tiempo real y seguir la calidad del aire en diferentes lugares.

Estos dispositivos suelen ser compactos y fáciles de transportar, permitiendo su traslado a diversas ubicaciones para realizar mediciones instantáneas. Pueden ser utilizados por entidades gubernamentales, investigadores, organizaciones ambientales y empresas para evaluar la calidad del aire en áreas urbanas, industriales o en sitios específicos de interés.

Los datos recogidos por las estaciones móviles de calidad del aire pueden emplearse para realizar análisis a largo plazo, identificar patrones de contaminación, evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad del aire y tomar medidas correctivas cuando sea necesario. Además, estos datos también pueden servir para elaborar mapas de contaminación del aire y aumentar la conciencia pública sobre los problemas ambientales.

Fabricación

En primer lugar, es importante destacar que el dispositivo que se describirá a continuación fue desarrollado por estudiantes de la Universidad Nacional de El Salvador como parte de su proyecto de graduación. Este trabajo está documentado con el título de “Monitoreo de Calidad de Aire Ambiental en el Marco de Prevención de Riesgos Laborales dentro del Campus Central de la Universidad de El Salvador”, presentado el 23 de marzo de 2023. (Omar Otoniel Flores Cortez et al., 2019; Ricardo Alberto León López et al., 2023)

Además, este proyecto es una continuación directa del estudio titulado “Estudio de Calidad del Aire Presente en el Área Metropolitana y su Estado respecto a los Índices Centroamericanos”, presentado en marzo de 2024.

La finalidad de continuar con el proyecto de monitoreo de calidad del aire, inicialmente desarrollado por los estudiantes de la Universidad Nacional de El Salvador, es ampliar y mejorar las capacidades del dispositivo existente mediante la integración de tecnologías avanzadas. En particular, la implementación de conectividad GSM y la plataforma ThingsBoard permitirá alcanzar varios objetivos clave:

1. Monitoreo en Tiempo Real: La conectividad GSM permitirá que los datos recolectados por el dispositivo de monitoreo de calidad del aire sean transmitidos en tiempo real a la plataforma ThingsBoard. Esto posibilitará un seguimiento continuo y en vivo de los niveles de contaminación atmosférica en diversas ubicaciones, lo que es crucial para la identificación rápida de situaciones críticas y la toma de decisiones informadas.
2. Acceso Remoto a Datos: Utilizando la plataforma ThingsBoard, los datos podrán ser accesibles de manera remota desde cualquier dispositivo con conexión a internet. Esto facilitará el acceso a la información tanto para investigadores como para autoridades

gubernamentales y otras partes interesadas, sin la necesidad de estar físicamente presentes en el lugar de monitoreo.

3. **Análisis y Visualización Avanzada:** ThingsBoard ofrece herramientas de análisis y visualización avanzadas que permitirán interpretar los datos de manera más eficiente. La creación de gráficos, mapas de contaminación y reportes detallados ayudará a entender mejor los patrones de contaminación y su evolución a lo largo del tiempo.

4. **Escalabilidad y Flexibilidad:** La utilización de GSM y ThingsBoard proporciona una solución escalable y flexible que puede adaptarse a futuros requerimientos y expansiones del proyecto. Esto incluye la posibilidad de agregar más sensores o dispositivos de monitoreo en diferentes ubicaciones, integrándolos en un sistema centralizado y eficiente.

Componentes

1. ESP32 WROOM.

La placa ESP32 es un módulo desarrollado por ESPRESSIF, esta placa se caracteriza por su potente capacidad de procesamiento, además de incluir bluetooth y wifi.

1.1. Características principales:

- Procesador dual Core Xtensa® LX6 de 32 bits.
- Velocidad de reloj entre 160 MHz y 240 MHz.
- Memoria RAM de 520 Kb. • Wifi integrado.
- Bluetooth 4.2 2.4 GHz; BT 2.0 y 4.0 BLE.
- 36 GPIO (entrada/salida de propósito general) pines

Figura 4

Microcontrolador ESP32



Nota. La imagen muestra el ESP32, un microcontrolador de bajo consumo con conectividad Wi-Fi y Bluetooth, utilizado en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT), automatización y dispositivos electrónicos. Imagen extraída de ([Boris Andrés Castillo Rosales & Lyan Donovan Segovia López, 2024](#))

2. Sensor de calidad de aire PMS5003ST.

El sensor de calidad de aire PMS5003ST es un dispositivo desarrollado por la empresa Plantower, este sensor es capaz de medir 6 variables físicas con una gran precisión, el material particulado en aire de los tamaños $1.0\mu\text{m}$, $2.5\mu\text{m}$ y $10\mu\text{m}$ además de la temperatura, humedad y formaldehído.

2.1. Características principales.

- Tasa de rango de falsa alarma.
- Respuesta en tiempo real.
- Diámetro mínimo de partícula distinguible: 0.3 micrómetros.
- Alto rendimiento anti-interferencia debido a la estructura de patente de blindaje de seis lados.
- Dirección opcional de entrada y salida de aire para adaptarse a diferentes diseños.

Figura 5

Sensor PMS5003ST



Nota. La imagen muestra el sensor PMS5003ST, diseñado para medir material particulado (PM), temperatura y humedad en el ambiente, ampliamente utilizado en monitoreo de calidad del aire. Imagen extraída de ([Boris Andrés Castillo Rosales & Lyan Donovan Segovia López, 2024](#))

3. Reloj de tiempo real RTC DS3231.

El módulo RTC nos permite llevar la fecha y hora en nuestro proyecto, el módulo se basa en la EEPROM AT24C32 DE ATMEL, el dispositivo usa el protocolo i2C.

3.1. Características principales.

- Reloj de tiempo real que cuenta hora, minuto, segundo, día, mes, año.
- Batería de respaldo CR1220. • Voltajes de alimentación: 2V a 5.5V.
- Interfaz I2C.
- Indicador de voltaje.
- Temperatura de operación: 40°C a 85°C.
- Dimensiones: 4.0 cm x 1.5 cm x 0.7 cm.

Figura 6

RTC DS3231



Nota. La imagen muestra el RTC DS3231, un reloj de tiempo real de alta precisión con compensación de temperatura, utilizado para mantener la hora en sistemas electrónicos. Imagen extraída de [\(Boris Andrés Castillo Rosales & Lyan Donovan Segovia López, 2024\)](#)

4. Módulo GPS NEO6MV2.

El módulo GPS nos proporciona la ubicación del dispositivo, el dispositivo está basado en el chip NEO 6M, este chip usa la tecnología Ublox, e incluye una antena GPS con conector UFL, también posee una batería y memoria eeprom que permite almacenar los últimos datos de ubicación y así lograr una detección más rápida.

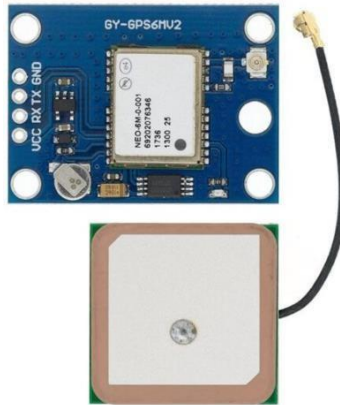
4.1. Características principales.

- Rango de Voltaje de Alimentación: 3.3V a 5V
- Corriente de funcionamiento: 45 mA
- Comunicación: UART
- Velocidad de comunicación: 9600 bps
- Memoria: EEPROM
- Interface: TTL serial
- Indicador de señal: LED
- Pines de módulo: VCC, RX, TX y GND
- Sistema de coordenadas: WGS-84

- Frecuencia receptora: L1 (1575.42 Mhz)

Figura 7

Modulo GPS NEO6MV2



Nota. La imagen muestra el módulo GPS NEO-6M V2, un receptor de alta precisión utilizado para obtener datos de ubicación y tiempo en proyectos de navegación y rastreo. Imagen extraída de ([Boris Andrés Castillo Rosales & Lyan Donovan Segovia López, 2024](#))

5. Batería Mi Power Bank 3 10000 mAh Ultra Compact.

La fuente de alimentación empleada para el proyecto es la “Mi power bank 3” de Xiaomi una batería portátil de 10000mAh, con un diseño muy compacto y con una gran capacidad de suministrar energía, además de contar con el modo de carga rápida para tener el menor tiempo posible fuera de funcionamiento el dispositivo.

5.1. Características principales.

- Diseño compacto y ligero, pesa 200g.
- Alta capacidad de almacenamiento de energía.
- Carga simultanea de hasta 3 dispositivos.
- Carga rápida bidireccional USB-C.
- Compatible con carga de baja corriente.
- Chips CI de alta calidad para mayor seguridad.

- Indicador LED para el nivel de carga de la batería.

Figura 8

Batería Mi Power Bank 3 10000 mAh Ultra Compact



Nota. La imagen muestra la batería Mi Power Bank 3 de 10000 mAh, una fuente de energía portátil y compacta para dispositivos electrónicos. Imagen extraída de ([Boris Andrés Castillo Rosales & Lyan Donovan Segovia López, 2024](#))

6. Módulo microSD

El módulo de memoria microSD es un dispositivo que nos permite insertar una memoria microSD a nuestros proyectos y almacenar los datos generados por sensores, se deben configurar el orden de ingreso de estos datos, además de especificar el nombre de archivo donde se guardara y el formato del mismo, en el caso de nuestro proyecto se ha optado por usar el formato csv, (comma separated values) el cual nos permite exportar fácilmente los datos a Excel.

6.1. Características principales.

- Voltaje de alimentación DC: 5V
- Comunicación SPI
- Consumo menor a 200mA
- Dimensiones 24mm x 42mm x 12mm

Figura 9

Modulo MicroSD



Nota. La imagen muestra un módulo microSD, utilizado para expandir el almacenamiento en proyectos electrónicos y almacenar datos en tarjetas microSD. Imagen extraída de (Boris Andrés Castillo Rosales & Lyan Donovan Segovia López, 2024)

7. Pantalla OLED SSH1106

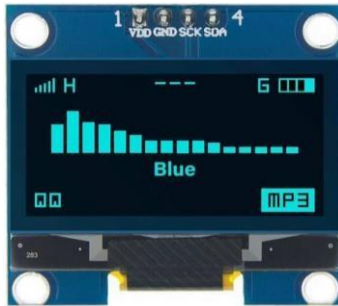
La pantalla oled es una pantalla basada en el driver sh1106, que nos permite mostrar letras y gráficos en una pantalla de 128x64 pixeles, la cual puede trabajar con voltajes de 3.3v y 5v.

7.1. Características principales.

- Tipo de display: OLED
- Voltaje de operación: 3.3V – 5V
- Resolución 128 x 64 pixeles
- Monocromo Pixeles blancos
- Interfaz I2C
- Peso 5g

Figura 10

Pantalla OLED SSH1106



Nota. La imagen muestra un módulo microSD, utilizado para expandir el almacenamiento en proyectos electrónicos y almacenar datos en tarjetas microSD. Imagen extraída de (Boris Andrés Castillo Rosales & Lyan Donovan Segovia López, 2024)

Lenguaje de Programación

El lenguaje de programación utilizado es un intérprete de Python 3, especialmente adaptado para operar en microcontroladores y entornos con recursos limitados. Un intérprete es una capa lógica de software que se sitúa entre el código y el hardware, procesando el código de programación para que el hardware (como ordenadores o microcontroladores) pueda ejecutar las instrucciones descritas.

MicroPython es una versión de Python que incluye un subconjunto reducido de la biblioteca estándar de Python, optimizado para funcionar en microcontroladores y sistemas embebidos. Su diseño busca ser lo más compatible posible con Python estándar, facilitando la transferencia de código desde un entorno de escritorio a un microcontrolador.

Entre las características que distinguen a MicroPython de otros sistemas embebidos, se encuentran:

- a) Amplitud de Librerías: Al igual que Python, MicroPython ofrece una amplia variedad de librerías que facilitan la ejecución de diversas tareas.
- b) Editor de Código Propio: Incluye un editor de código sencillo, adecuado para su entorno de uso.

c) Extensibilidad: MicroPython permite a los usuarios avanzados extender sus capacidades utilizando funciones de bajo nivel en lenguajes como C o C++. Esto posibilita la combinación de código de ejecución rápida a bajo nivel con el código de MicroPython.

Con MicroPython, es posible realizar una variedad de tareas, como controlar las entradas y salidas de un microcontrolador, hacer parpadear un LED, obtener lecturas de señales analógicas y digitales, generar señales PWM, y controlar servomotores y pantallas (OLED, NeoPixel, etc.). También permite realizar comunicaciones mediante protocolos I2C y SPI. En ciertos microcontroladores, como el ESP32, es posible establecer conexiones de red y WiFi, ampliando aún más sus capacidades y aplicaciones.

Funcionamiento del Dispositivo

Cuando se enciende el dispositivo, muestra un mensaje de bienvenida en la pantalla. Después de este mensaje, el dispositivo comienza su rutina de funcionamiento, que inicia con la obtención de las coordenadas de ubicación, incluyendo latitud, longitud, altitud, dilución de posición horizontal, tiempo satelital y la cantidad de satélites usados para la medición. Luego, realiza la lectura de material particulado de $1.0\mu\text{m}$, $2.5\mu\text{m}$ y $10\mu\text{m}$, así como la medición de temperatura, humedad y formaldehído. Toda esta información es procesada y almacenada por el microcontrolador central en la memoria disponible del dispositivo. Tras completar las mediciones, el dispositivo entra en un bucle de espera antes de la siguiente medición, con un intervalo predeterminado de 30 segundos, que puede ajustarse usando los botones del dispositivo.

El dispositivo cuenta con varios botones para diferentes funciones, dichos botones se muestran en la figura 11. El botón amarillo, conocido como el "botón de configuración", permite al usuario acceder al modo de configuración del tiempo de muestreo. Al presionar este botón, se enciende un LED rojo, indicando que el dispositivo está en modo de configuración. En este modo, no se realizan lecturas de GPS ni mediciones de calidad del aire. Durante la configuración, el botón rojo, o "botón de aumento", incrementa el intervalo de medición en 30 segundos hasta un máximo de 300 segundos (5 minutos). Por otro lado, el botón negro, o "botón de disminución", reduce el intervalo en 30 segundos hasta un mínimo de 30 segundos. Una vez seleccionado el intervalo deseado, se presiona nuevamente el botón

de configuración para guardar el nuevo tiempo de espera, momento en el cual el LED rojo se apagará.

Fuera del modo de configuración, el dispositivo realiza las mediciones según el intervalo establecido. Durante este tiempo, los botones "aumento" y "disminución" tienen funciones adicionales. Presionando el botón de aumento, el dispositivo ignora el tiempo de espera y realiza una nueva medición de inmediato. Si se presiona el botón de disminución durante el bucle de espera, el dispositivo muestra las seis lecturas de la medición anterior: latitud, longitud, altitud, PM1.0, PM2.5 y PM10.

Botón Configuración (Config): Este botón permite ajustar el intervalo entre las tomas de muestras. Al presionarlo, se ilumina un LED rojo, indicando que el dispositivo está en modo de configuración.

Botón (+): En el modo de configuración, este botón incrementa el tiempo de muestreo hasta un máximo de 5 minutos. Fuera de este modo, permite saltar el intervalo de espera y realizar una lectura inmediata en caso de datos corruptos.

Botón (-): En modo de configuración, este botón disminuye el tiempo de muestreo hasta un mínimo de 30 segundos. Fuera del modo de configuración, muestra en pantalla los datos de la última lectura: PM1.0, PM2.5, PM10, latitud, longitud y altitud.

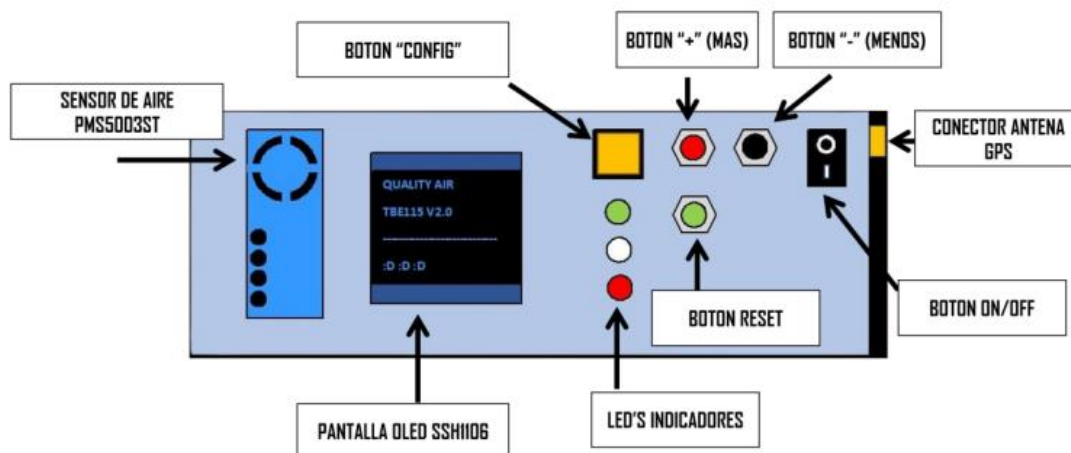
LED Blanco: Este LED se enciende durante la lectura de datos y se apaga una vez finalizada la medición.

LED Verde: Indica el estado de recepción del GPS. Si no hay señal o el dispositivo no ha determinado su posición, el LED permanece apagado. Parpadea cada segundo cuando hay recepción.

LED Rojo: Este LED se ilumina al presionar el botón de configuración, indicando que el dispositivo está en modo de configuración, durante el cual no se realizan lecturas.

Figura 11

Vista frontal de la estación móvil



Nota. La imagen muestra la vista frontal de la estación móvil, destacando los botones de control utilizados para activar y gestionar sus diferentes funciones operativas. Imagen extraída de (Boris Andrés Castillo Rosales & Lyan Donovan Segovia López, 2024)

El dispositivo con todos sus componentes ya en el gabinete se ve de la siguiente forma:

Figura 12

Componentes internos de la estación móvil.



Nota. La imagen muestra la vista superior de la estación móvil donde se encuentran instalados todos los componentes. Imagen extraída de ([Boris Andrés Castillo Rosales & Lyan Donovan Segovia López, 2024](#))

Integración de la etapa 3.5

Se implementaron dos funcionalidades al prototipo desarrollado.

- Se implementó el uso del protocolo ESP-NOW para poder ampliar la capacidad de microcontroladores ESP32 en el medidor.
- Se agregó un módulo SIM800L para el uso de la red celular mediante la tecnología GSM

Las dos mejoras permiten superar ciertas limitantes que tenía el medidor en su versión 3.0 y que al implementarlas funcionará en la versión 3.5. Las limitantes que poseía el medidor eran la imposibilidad de enviar la información sin la necesidad de un modem con conexión Wifi.

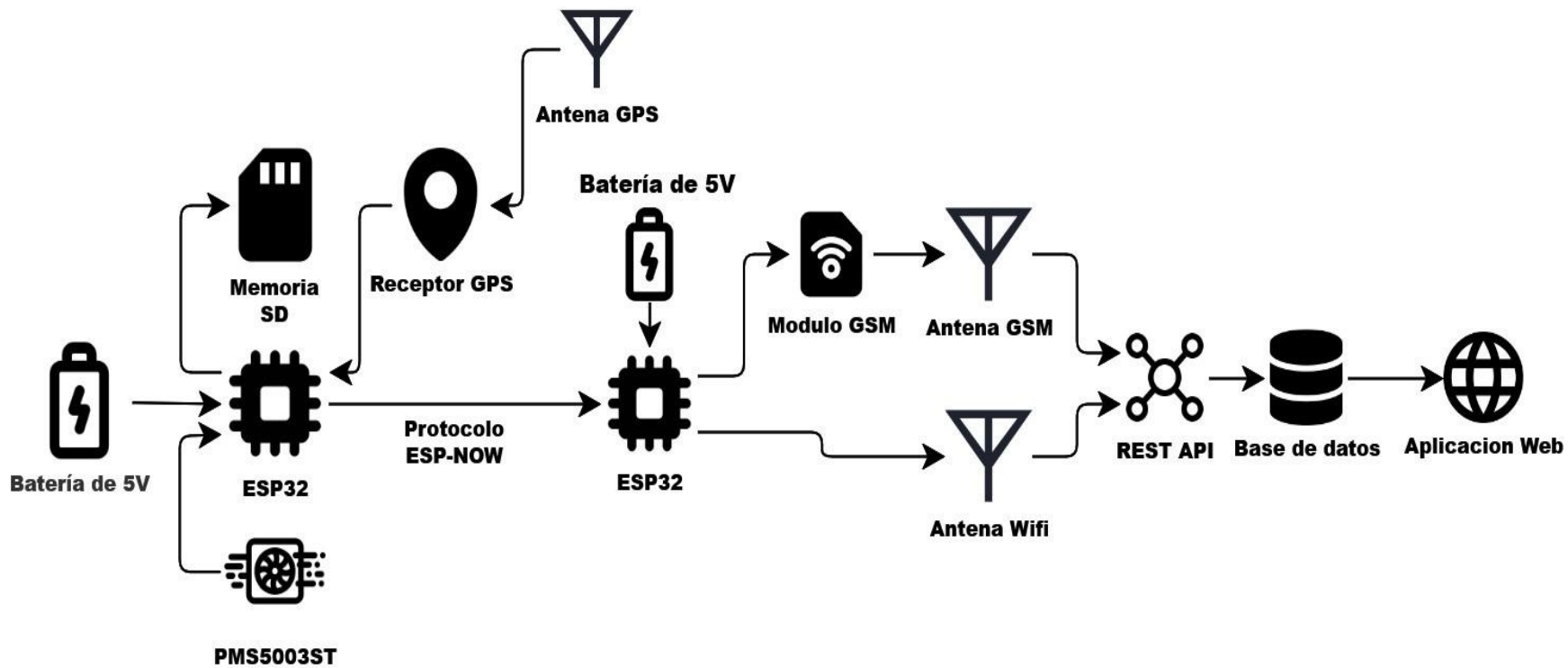
El uso del ESP-NOW permitió agregar un nuevo microcontrolador ESP32 que funcione de forma paralela al microcontrolador principal. Este protocolo permite la intercomunicación entre 2 microcontroladores ESP32([Dnislam Urazayev et al., 2023](#)), se utilizó este protocolo para enviar la información capturada por el sensor PMS5003ST del primer microcontrolador ESP32 al segundo de forma inalámbrica y este último mediante el uso del módulo SIM800L permite enviar la información a internet mediante el uso de la tecnología GSM ([SIMcom, 2013](#)), y no únicamente por Wifi.

Esta mejora permitirá tener más pines disponibles para futuros sensores, como también la posibilidad de enviar los datos medidos a internet para su visualización de forma remota aun cuando no exista cobertura por red Wifi.

Para visualizar de mejor manera la construcción de la estación móvil, en la siguiente figura se muestra el esquema IoT con los componentes que conforman la versión más actualizada, además de la incorporación de la conectividad en la nube.

Figura 13

Esquema Iot de la estación móvil 3.5



Nota. La figura muestra el esquema IoT del medidor de calidad del aire, que integra sensores y conectividad para monitorear y transmitir datos en tiempo real.

El proceso de implementación implica varias etapas:

Selección del Módulo: El módulo SIM800L fue elegido por su compatibilidad con los microcontroladores existentes y su costo bajo en el mercado.

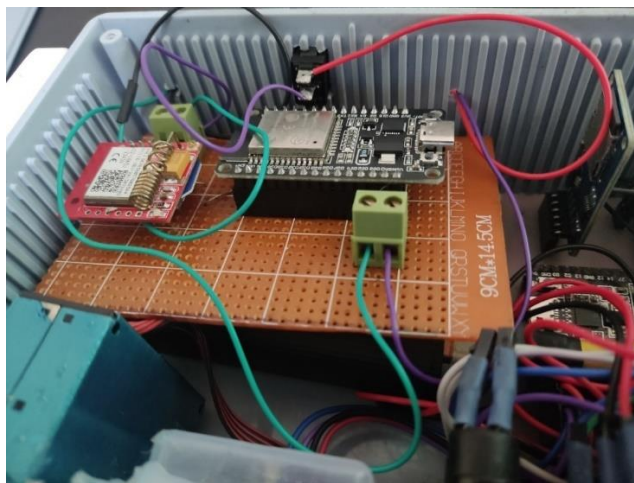
Conexión Física: El módulo se conecta al microcontrolador a través de puertos serie, asegurando una comunicación estable.

Configuración del Software: Se desarrolló un firmware específico para gestionar la comunicación GSM, incluyendo la configuración de APN, autenticación y manejo de errores.

Pruebas de Conectividad: Se realizaron pruebas exhaustivas para asegurar que la estación puede enviar datos de manera confiable a través de la red celular en diferentes condiciones de señal. La implementación física de la función de conectividad GSM se muestra en la siguiente figura:

Figura 14

Etapa de conectividad GSM del medidor de calidad del aire.



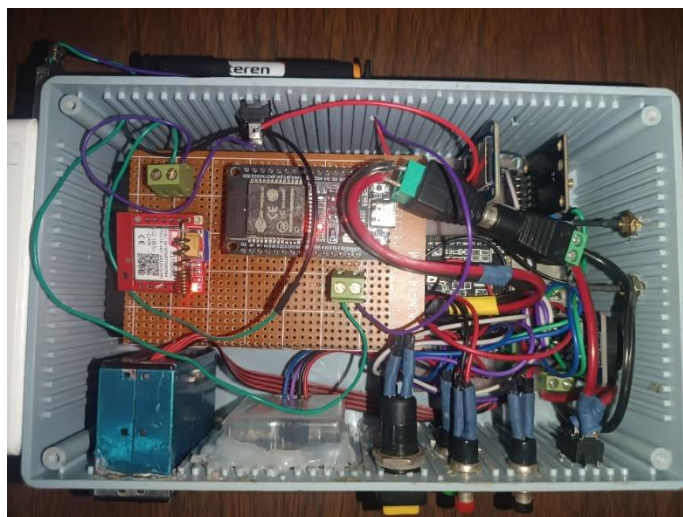
Nota. La imagen muestra la vista superior de la etapa de conectividad GSM del medidor de calidad del aire, con los componentes encargados de la transmisión de datos mediante redes móviles.

Con esa etapa integrada, la estación móvil 3.5 tiene la funcionalidad de comunicarse con thingsboard mediante GSM.

De esta forma queda implementada la estación móvil para la calidad del aire 3.5:

Figura 15

Componentes internos dentro del gabinete de la estación móvil para la calidad del aire 3.5



Nota. La imagen muestra la vista superior con la etapa GSM integrada al medidor de calidad del aire, destacando su conexión para la transmisión de datos a través de redes móviles.

Desafíos en la integración y solución técnica

La integración del módulo GSM SIM800L y el microcontrolador ESP32 en la estación de monitoreo implicó varios desafíos técnicos debido a la falta de puertos libres en la pcb y a que el módulo sim 800L demanda un alto amperaje para su correcto funcionamiento. A continuación, se detallan estos desafíos y las soluciones implementadas para superarlos:

1. Gestión de Energía: Uno de los principales retos fue asegurar un suministro de energía constante y fiable para ambos componentes, ya que el módulo SIM800L y el ESP32 tienen diferentes requisitos de energía.

Módulo SIM800L: Se incorporó una batería tipo 18650 de 3.7V y 2200mAh para alimentar específicamente el módulo SIM800L. Esta batería proporciona la corriente necesaria para las ráfagas de transmisión de datos, asegurando un funcionamiento estable.

Figura 16

Batería tipo 18650



Nota. La imagen muestra la vista trasera del medidor donde se ha integrado la batería 18650 que alimenta el módulo SIM800L, además se muestra su switch correspondiente.

ESP32: Para el ESP32, se utilizó un power bank de 5000 mAh, a 5.0V con una corriente máxima de 2.0A para asegurar el funcionamiento óptimo. Además cuenta con una tecnología inteligente que permite la detección de la carga a alimentar y se enciende automáticamente.

Figura 17

Powebank 5,000 mAh



Nota. La imagen muestra la parte lateral derecha del medidor donde se ha agregado el powebank que alimenta el segundo ESP32

2. Compatibilidad de Voltaje

El módulo GSM SIM800L requiere una tensión de alimentación de 3.4V a 4.4V, recomendándose 4.0V, y puede consumir hasta 2A en picos durante la transmisión. El ESP32 opera con una tensión de 3.3V y puede consumir hasta 500 mA durante picos de transmisión Wi-Fi.

Solución: Se seleccionaron fuentes con valores de voltaje adecuado para asegurar que cada componente funcione óptimamente.

3. Optimización del Consumo de Energía

Minimizar el consumo de energía para prolongar la vida útil de las baterías y el power bank.

Solución: Para controlar y optimizar el consumo de energía se instaló un switch que conecta la batería tipo 18650 con el módulo gsm sim 800l. Para prolongar la duración de la batería y de la vida útil del sim 800l. Con el power bank alimentador del ESP32 al tener un módulo de funcionamiento inteligente, se implementó un adaptador tipo USB para controlar el uso de dicha fuente.

VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS EN API

Plataforma iot Thingsboard

La plataforma Thingsboard juega un papel crucial en el proyecto, ya que permite la visualización y el análisis en tiempo real de los datos recolectados por la estación móvil de medición de calidad del aire. A través de la integración con el módulo GSM SIM800L, los datos sobre partículas en suspensión (PM1.0, PM2.5, PM10), formaldehído, temperatura, humedad y parámetros geográficos (latitud, longitud, altitud) son enviados automáticamente a la plataforma, donde se pueden monitorear de manera remota.

Thingsboard ofrece un entorno visual interactivo que convierte los datos crudos en gráficos intuitivos y fáciles de interpretar. Estos gráficos incluyen barras, líneas y mapas geográficos que permiten una rápida identificación de las condiciones de calidad del aire en diversas zonas. Cada parámetro medido es visualizado de forma independiente, lo que facilita el análisis y la comparación de las variables.

Uno de los elementos clave de la visualización es la creación de tableros interactivos, donde los usuarios pueden personalizar las vistas y elegir qué datos desean visualizar en tiempo real. Estos tableros pueden incluir gráficos históricos, que permiten observar tendencias a lo largo del tiempo, y mapas interactivos que muestran la ubicación de la estación móvil, brindando una visión clara de los lugares con niveles elevados de contaminación.

La plataforma también permite la configuración de alertas en tiempo real, que notifican a los usuarios cuando los niveles de contaminación superan los umbrales establecidos, como el caso del Índice de Calidad del Aire (ICCA).

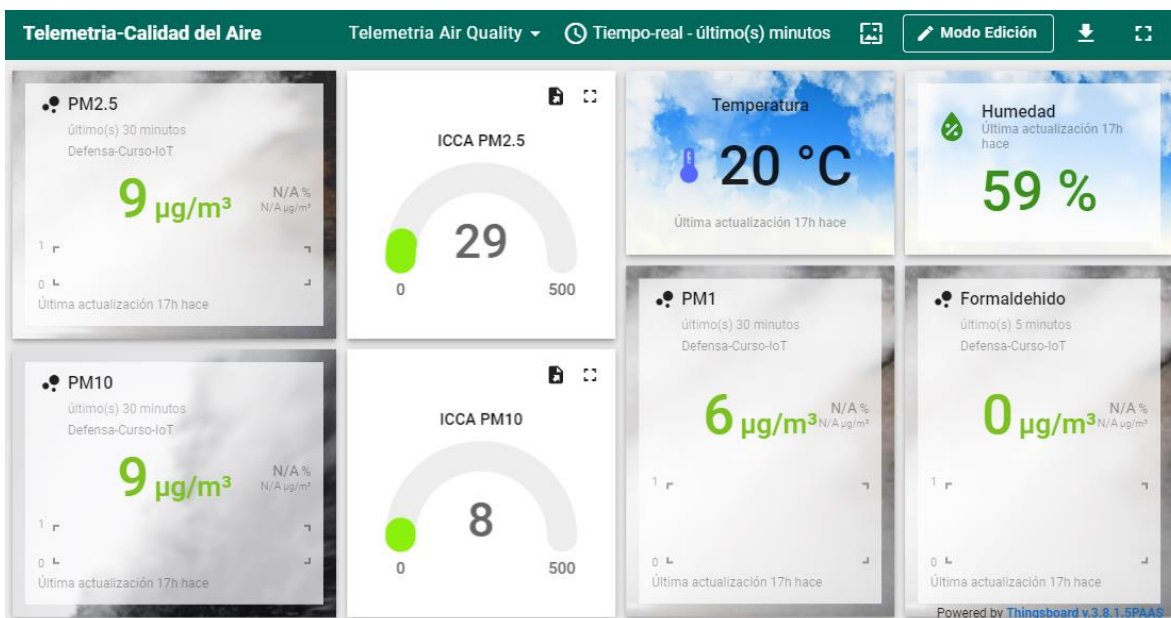
Presentación y construcción de dashboard en Thingsboard

El dashboard desarrollado en Thingsboard permite la visualización en tiempo real de los datos recolectados por la estación móvil de calidad del aire. Este dashboard ha sido diseñado para ofrecer una interfaz intuitiva y de fácil comprensión, permitiendo a los usuarios monitorear los parámetros clave de la calidad del aire en diferentes ubicaciones de manera eficiente.

El dashboard que se ha diseñado para la visualización de los datos medidos por la estación móvil se muestran en la siguiente figura”

Figura 18

Dashboard Telemetría-Calidad del aire en Thingsboard



Nota. La imagen muestra la configuración del dashboard Telemetría-Calidad del Aire que se ha diseñado para mostrar los valores de la calidad del aire en tiempo real.

En el dashboard, se muestran los valores de las partículas en suspensión (PM1.0, PM2.5, PM10), formaldehído, temperatura, humedad y parámetros geográficos como latitud, longitud y altitud. Para cada uno de estos parámetros, se han implementado gráficos interactivos que permiten observar las variaciones en tiempo real, con opciones para ver los datos en diferentes formatos, como líneas de tiempo, gráficos de barras y medidores.

Un aspecto destacado del dashboard es la integración de mapas interactivos, donde se visualiza la ubicación de la estación móvil, lo que facilita la identificación de áreas con mayores niveles de contaminación. Además, los datos se actualizan automáticamente cada vez que la estación móvil transmite nueva información, lo que garantiza que los usuarios siempre tengan acceso a datos actualizados.

Figura 19

Mapa de Telemetría-Calidad del aire en Thingsboard

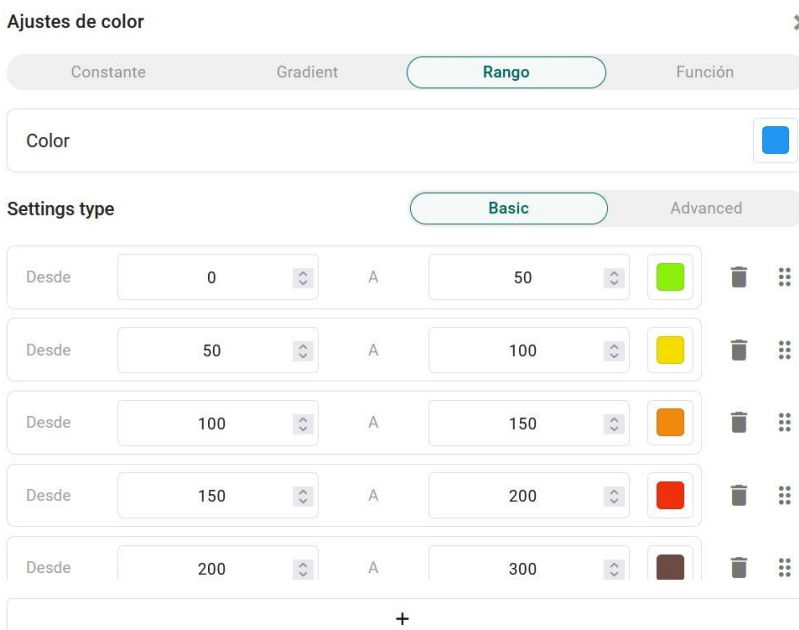


Nota. La imagen muestra la visualización en tiempo real de la ubicación de la estación móvil junto a los valores que se han medido.

El dashboard también incluye la funcionalidad de rangos configurables, las cuales notifican a los usuarios cuando los niveles de contaminación superan los límites predefinidos, por ejemplo, basados en el Índice de Calidad del Aire (ICCA).

Figura 20

Rangos de valores del ICCA en Thingsboard.



Nota. La imagen muestra la configuración correspondiente para los diferentes niveles del ICCA y su respectivo color de identificación.

Además de los gráficos en tiempo real, el dashboard ofrece reportes históricos, que permiten analizar las tendencias de la calidad del aire a lo largo del tiempo, comparando distintos períodos y facilitando la identificación de patrones en la contaminación del aire.

Figura 21

Lista de mediciones registradas en Thingsboard

Telemetria Air Quality									
Fecha	Hora	Latitud	Longitud	PM1	PM2.5	ICCA PM2.5	PM10	ICCA PM10	For
2024/11/17	16:01:14	NO DATA	NO DATA	6	9	29	9	8	0
2024/11/17	16:00:29	NO DATA	NO DATA	8	11	36	11	10	0
2024/11/17	15:58:14	NO DATA	NO DATA	8	11	36	11	10	0

Ítems por página: 1 - 10 de 200 < >

Nota. En la figura se muestra el historial de las mediciones con cada una de las variables que la estación móvil registra en Thingsboard.

METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

Área de estudio

En la región occidental de El Salvador. En los últimos años, Sonsonate ha experimentado un crecimiento poblacional y comercial significativo, lo que ha llevado a un aumento en la cantidad de vehículos en circulación y una mayor cantidad de obras de construcción para proveer vivienda y locales comerciales.

Este crecimiento ha generado una mayor emisión de humo por parte de los automóviles y polvo proveniente de las construcciones, afectando la calidad del aire y, por ende, la calidad de vida de los habitantes ([Ministerio de Salud de El Salvador, 2002](#)). Además, Sonsonate cuenta con varias zonas de alta concentración de personas, como el Hospital Nacional General "Dr. Jorge Mazzini Villacorta", donde se encuentran pacientes hospitalizados que pueden verse gravemente afectados por una mala calidad del aire. También se encuentran restaurantes, iglesias, colegios y escuelas donde residen niños y adolescentes, quienes son especialmente vulnerables a los efectos negativos de la contaminación atmosférica.

Figura 22

Ruta de estudio para la recolección de datos.



Nota. La figura muestra la ruta de interés que comienza desde la Universidad de Sonsonate, localizada en el barrio El Ángel, y se extiende hasta el final de la Mega Plaza, situada en la colonia Sensunapán. Durante este trayecto, se atraviesan importantes calles y avenidas del municipio, como la Avenida Fray Felipe de Jesús Moraga y la Carretera a Acajutla, que son puntos neurálgicos tanto para el tráfico vehicular como para la actividad comercial y residencial.

Recolección de datos

La recolección de datos se efectuó los días, lunes 7, martes 8, jueves 10, viernes 11, sábado 12, domingo 13, lunes 14, martes 15, miércoles 16, jueves 17, viernes 18, sábado 19 y domingo 20 del mes de octubre del 2024 entre las horas de la mañana. La ruta seleccionada es una arteria importante de Sonsonate centro, ya que en ella transita una muy alta cantidad de peatones y vehículos debido a los centros académicos, parques, iglesias, hospitales y clínicas médicas. Para el análisis de la calidad del aire en el municipio de Sonsonate, se ha recopilado un conjunto de datos que reflejan las concentraciones de diversos contaminantes a lo largo de diferentes horas del día, tal como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 23

Registro de datos de las mediciones en Sonsonate Centro

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	FECHA	HORA	LATITUD	LONGITUD	PM 1.0 [ug/m³]	PM 2.5 [ug/m³]	PM 10 [ug/m³]	TEMPERATURA [°C]	HUMEDAD [%]	FORMALDEHÍDO [ppb]	SATELITES	ALTURA [m]	DILUCION DE P.	TIEMPO S.
2	2024/10/07	07:02:45	13.73182	-89.71958	22	32	32	24	84.4	0	3	0.5	4.04	13:04:46
3	2024/10/07	07:03:31	13.73032	-89.72059	16	26	29	24	80.7	0.2	6	271.4	1.55	13:05:28
4	2024/10/07	07:04:13	13.730312	-89.72063	21	30	31	24	81	0	6	271.6	1.54	13:06:09
5	2024/10/07	07:05:35	13.729775	-89.72096	32	42	42	24.1	82.1	0	7	277	1	13:07:32
6	2024/10/07	07:07:46	13.728765	-89.72155	79	112	115	24.2	82.9	0.2	8	267	1.04	13:09:44
7	2024/10/07	07:08:29	13.728408	-89.72171	39	53	55	24.3	80.8	0.2	8	267.6	0.94	13:10:26
8	2024/10/07	07:09:11	13.728062	-89.72188	20	31	34	24.4	80.3	0.2	8	266.2	0.96	13:11:06
9	2024/10/07	07:10:37	13.727469	-89.72238	24	34	35	24.6	80.1	0	8	264.7	0.87	13:12:30
10	2024/10/07	07:11:15	13.727232	-89.72264	18	29	29	24.6	80.4	0	8	271.1	0.96	13:13:11
11	2024/10/07	07:12:42	13.72662	-89.72313	15	22	24	24.7	80.8	0.2	9	258.9	0.84	13:14:32
12	2024/10/07	07:13:20	13.726615	-89.72313	35	48	49	24.6	81.2	0	9	258.4	0.84	13:14:33
13	2024/10/07	07:14:38	13.725979	-89.72363	72	95	99	24.6	82	0.4	9	252.4	0.83	13:16:28
14	2024/10/07	07:16:01	13.725322	-89.72409	27	38	39	24.9	79.5	0.1	8	252.1	0.88	13:17:56
15	2024/10/07	07:16:44	13.725019	-89.72435	19	27	27	25.2	78.4	0	9	248.5	0.92	13:18:38
16	2024/10/07	07:18:12	13.724707	-89.72456	30	42	43	25.5	78.6	0.1	8	248.9	0.92	13:19:25
17	2024/10/07	07:20:20	13.723566	-89.72543	22	31	31	25.7	77.8	0	9	242.4	0.83	13:22:10
18	2024/10/07	07:20:58	13.723218	-89.72565	35	48	49	25.9	77.1	0	9	242.7	0.83	13:22:54
19	2024/10/07	07:21:42	13.722904	-89.72591	85	112	115	25.9	77.1	0	8	240.8	0.98	13:23:39
20	2024/10/07	07:22:27	13.722898	-89.72591	222	276	280	26.1	76.1	0.1	8	241.1	0.98	13:23:40
21	2024/10/07	07:23:50	13.722383	-89.72635	26	35	37	26.3	74.5	0.2	8	234.8	0.88	13:25:40
22	2024/10/07	07:24:28	13.722408	-89.7264	23	33	34	26.4	74.7	0.1	9	236.5	0.83	13:26:20

Nota. La imagen muestra el registro de los datos recolectados por la estación móvil.

ANÁLISIS DE DATOS

Se realizaron mediciones de calidad del aire a lo largo de una ruta de Sonsonate centro. Estas mediciones incluirán concentraciones de material particulado PM1.0, PM2.5 y PM10, así como formaldehído, junto con valores de humedad y temperatura ambiental.

Tabla 4

Día y hora de toma de datos.

Día	Hora
7/10/2024	07:02:45 a.m - 08:03:50 a.m
8/10/2024	06:59:28 a.m - 08:14:50 a.m
10/10/2024	06:58:58 a.m - 08:16:23 a.m
11/10/2024	06:57:07 a.m - 08:06:06 a.m
12/10/2024	07:00:40 a.m - 08:16:54 a.m
13/10/2024	06:57:51 a.m - 08:14:17 a.m
14/10/2024	06:57:35 a.m - 08:12:49 a.m
15/10/2024	06:53:52 a.m - 07:54:11 a.m
16/10/2024	06:59:06 a.m - 08:03:03 a.m
17/10/2024	06:53:59 a.m - 07:57:06 a.m
18/10/2024	06:54:25 a.m - 07:55:28 a.m
19/10/2024	06:46:14 a.m - 07:49:56 a.m

Día	Hora
20/10/2024	06:48:32 a.m - 07:51:27 a.m

Nota. La tabla muestra los días y su respectivo horario en el que se realizaron las mediciones en la ruta de Sonsonate Centro.

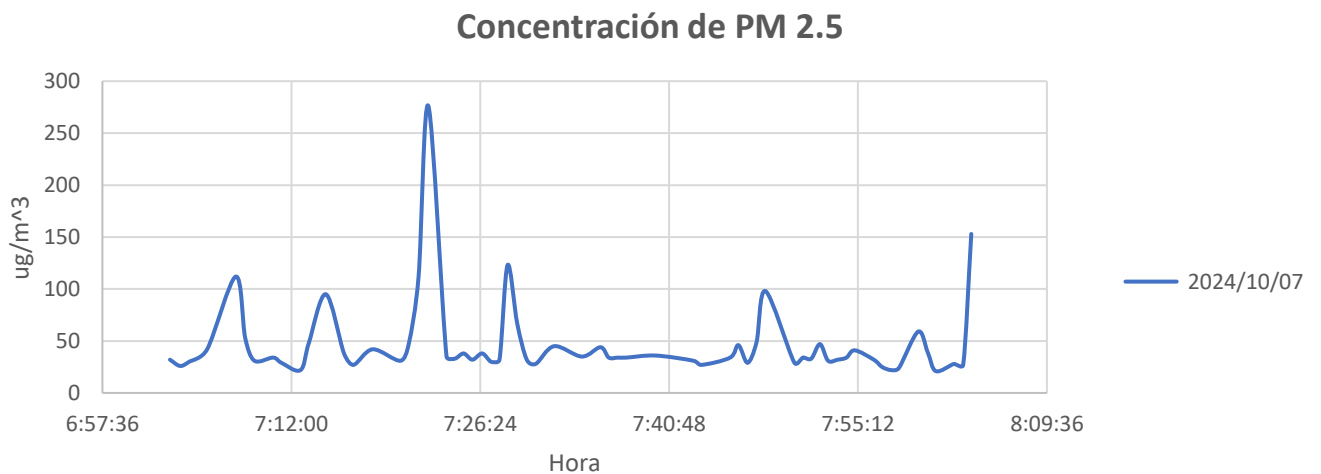
A continuación, se presentan las diferentes graficas del material particulado PM1.0, PM2.5 y PM10.

Graficas de material particulado PM2.5 por hora.

7 de octubre 2024

Figura 24

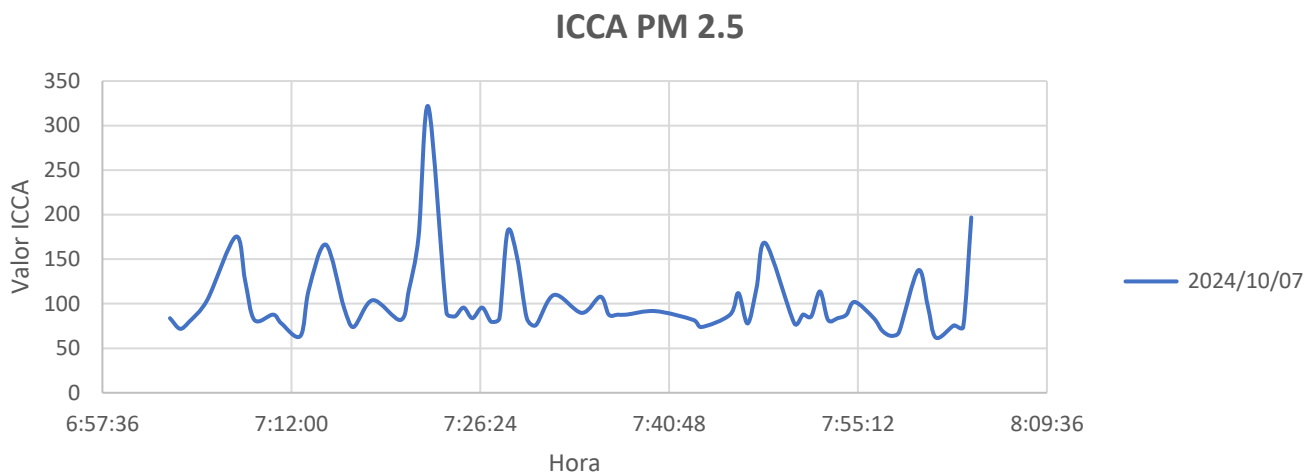
Concentración PM2.5 del día 07/10/2024.



Nota. La figura muestra una serie de tiempo de la concentración PM2.5 con los datos registrados el 7 de octubre del 2024, donde se aprecian picos en las concentraciones, el más llamativo pertenece una concentración superior a los 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 25

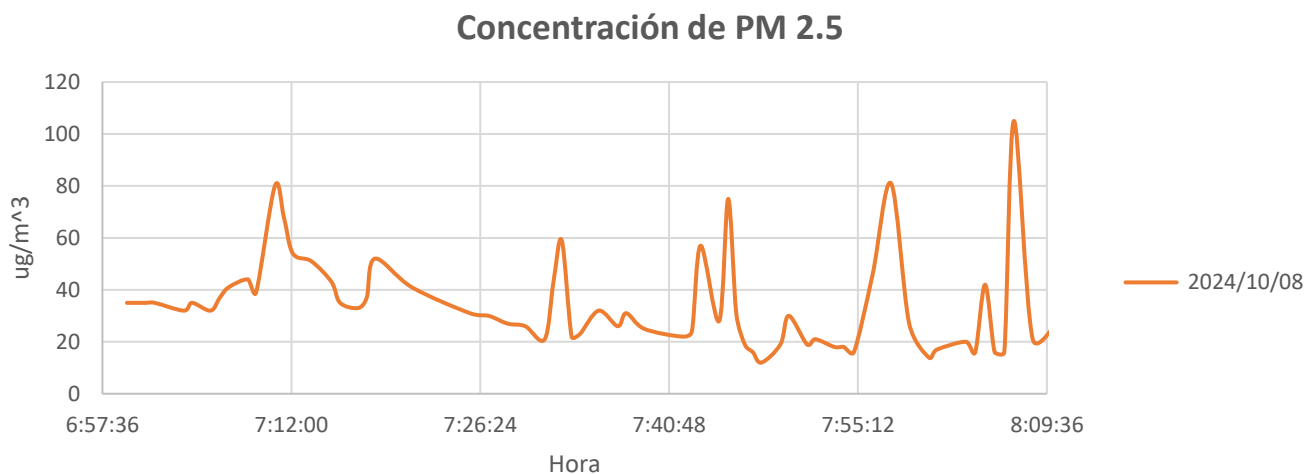
ICCA PM2.5 del día 07/10/2024.



Nota. Gráfico ICCA 2.5 del día 7 de octubre del 2024 con rango promedio deficiente 8 de octubre 2024

Figura 26

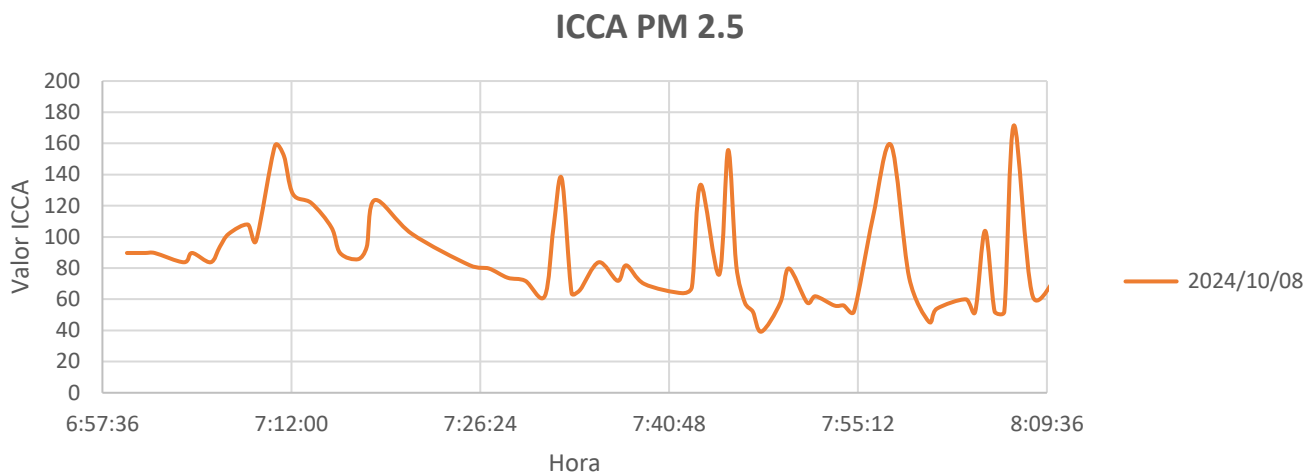
Concentración PM2.5 del día 08/10/2024.



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM2.5 perteneciente al día 8 de octubre del 2024, donde la concentración pico es un poco superior a los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 27

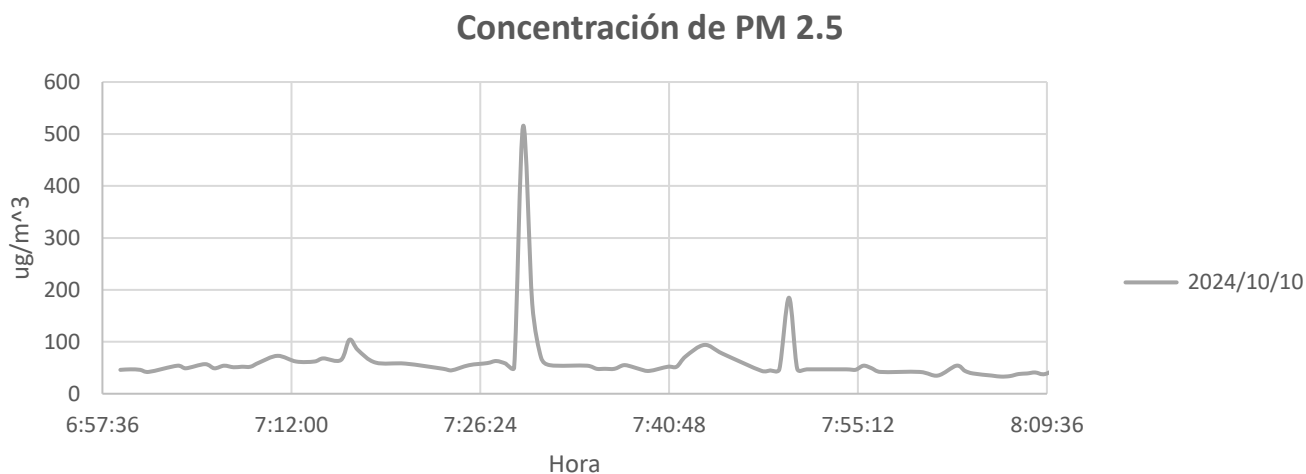
ICCA PM2.5 del día 08/10/2024



Nota. Gráfico ICCA PM2.5 del día 8 de octubre del 2024 con rango promedio regular 10 de octubre 2024

Figura 28

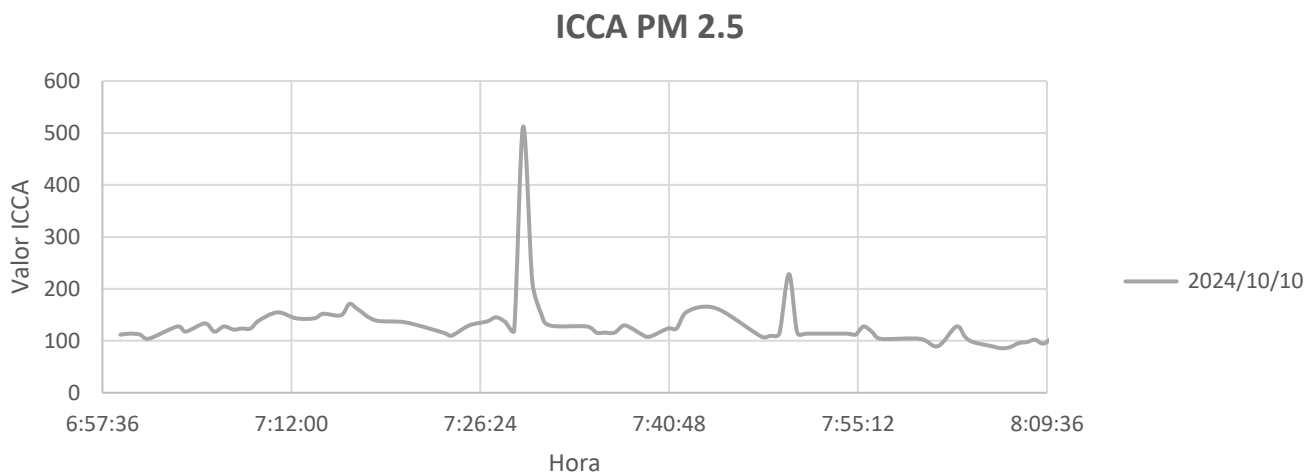
Concentración PM2.5 del día 10/10/2024



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM2.5 perteneciente al día 10 de octubre del 2024 donde se observa el valor atípico ligeramente superior a los 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 29

ICCA PM2.5 del día 10/10/2024

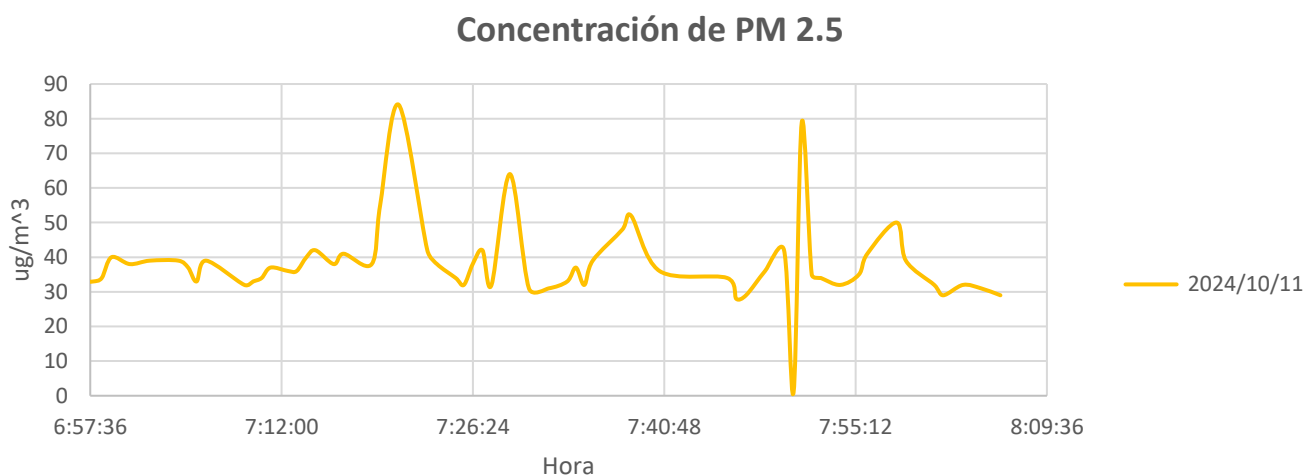


Nota. Gráfico ICCA PM2.5 del día 10 de octubre del 2024 con rango promedio deficiente.

11 de octubre 2024

Figura 30

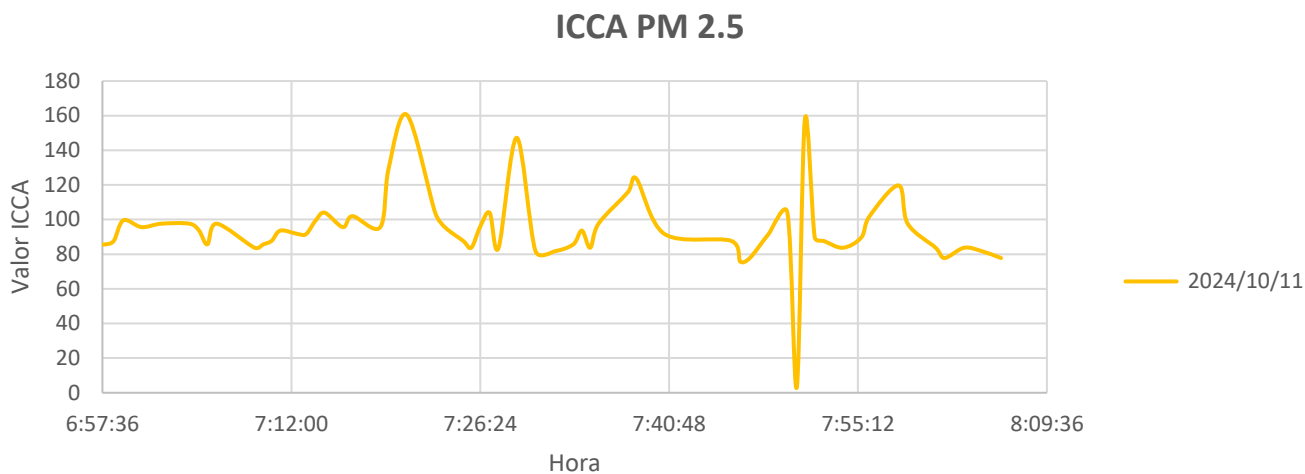
Concentración PM2.5 del día 11/10/2024



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM2.5 perteneciente al día 11 de octubre del 2024 donde se observa que la concentración no supera los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, además del valor atípico de 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 31

ICCA PM2.5 del día 11/10/2024.

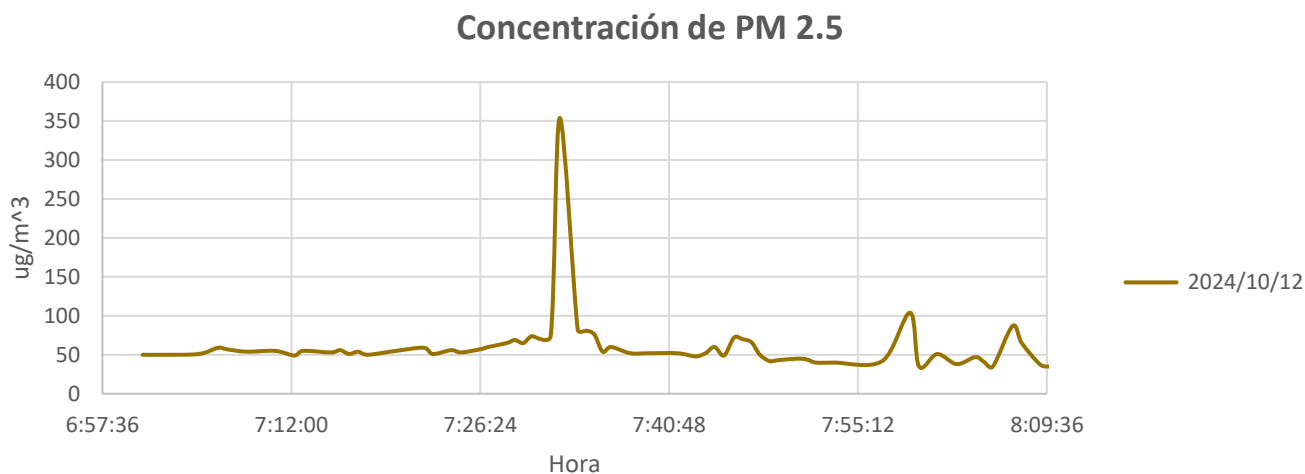


Nota. Gráfico ICCA PM2.5 del día 11 de octubre del 2024 con rango promedio regular.

12 de octubre 2024

Figura 32

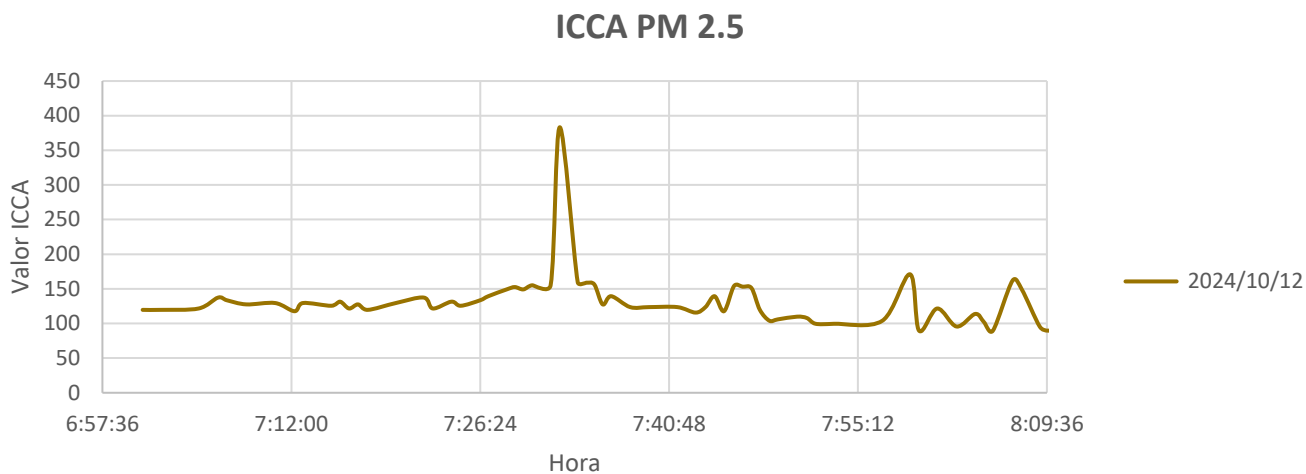
Concentración PM2.5 del día 12/10/2024



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM2.5 perteneciente al día 12 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia debajo de los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un valor atípico un poco superior a los 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 33

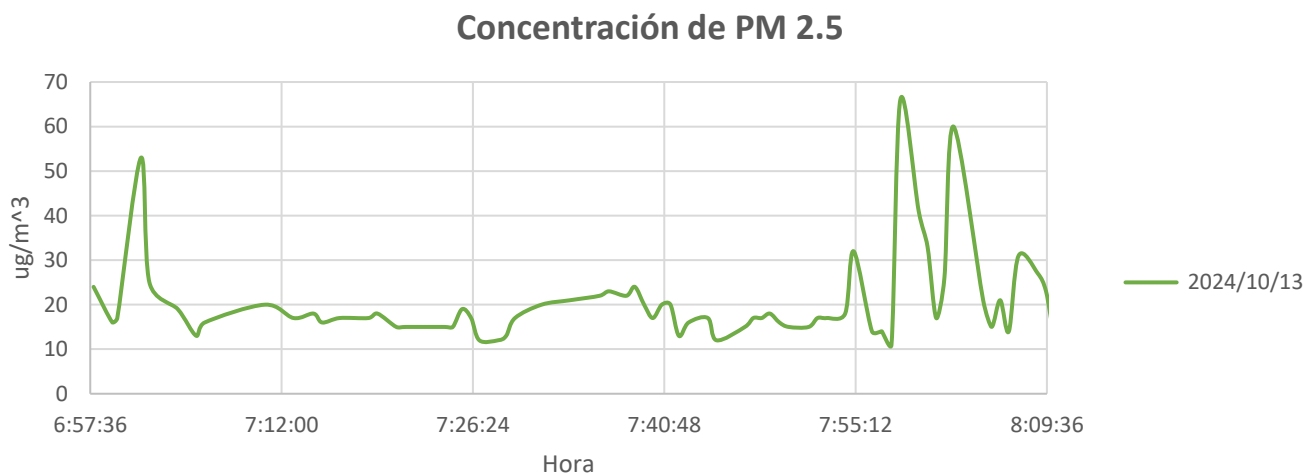
ICCA PM2.5 del día 12/10/2024



Nota. Gráfico ICCA PM2.5 del día 12 de octubre del 2024 con rango promedio deficiente 13 de octubre 2024

Figura 34

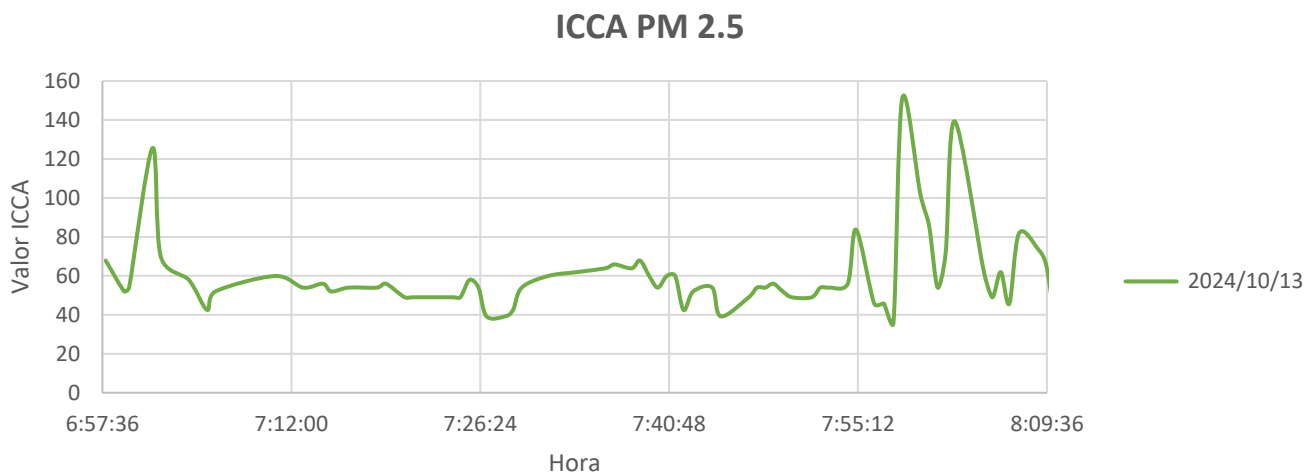
Concentración PM2.5 del día 13/10/2024.



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM2.5 perteneciente al día 13 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia debajo de los 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 35

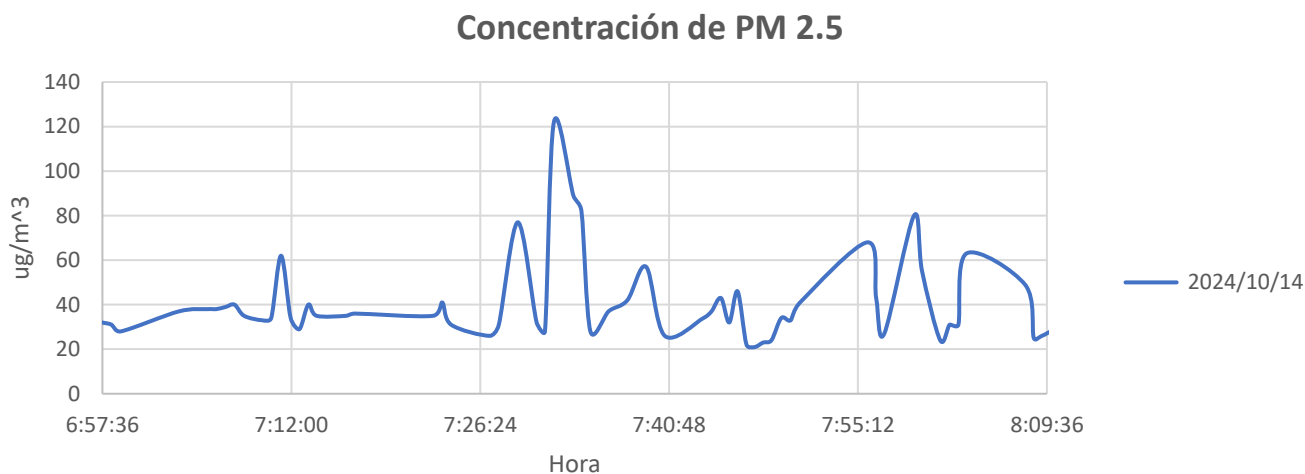
ICCA PM2.5 del día 13/10/2024.



Nota. Gráfico ICCA PM2.5 del día 13 de octubre del 2024 con rango promedio regular 14 de octubre 2024

Figura 36

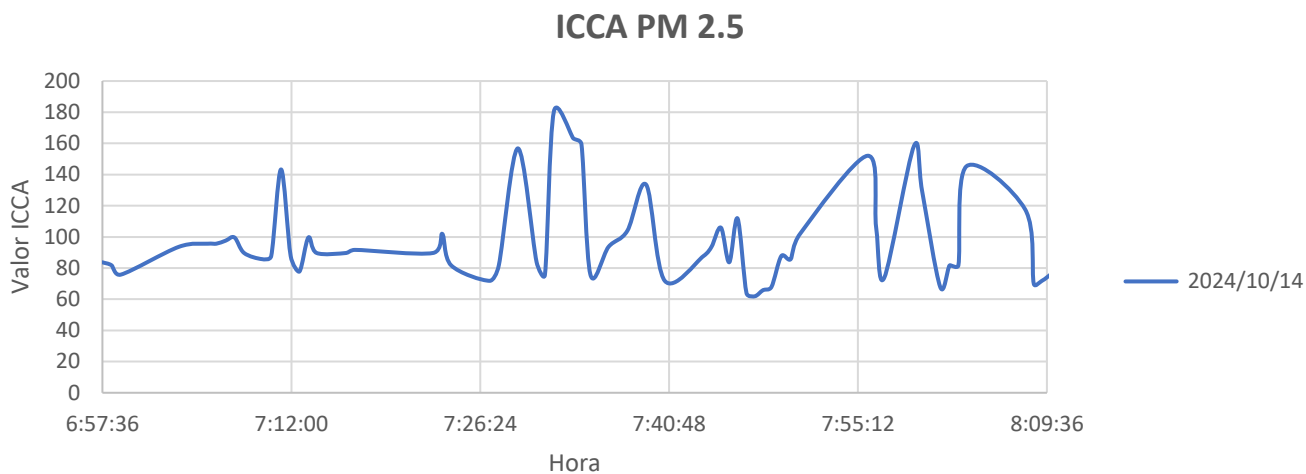
Concentración PM2.5 del día 14/10/2024



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM2.5 perteneciente al día 14 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia debajo de los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pero con un pico de más de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 37

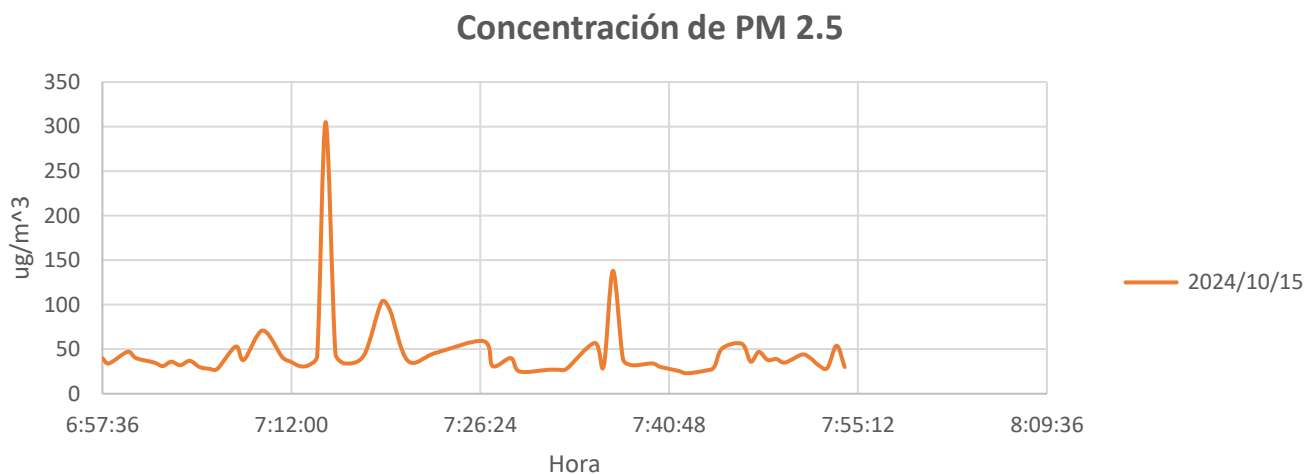
ICCA PM2.5 del día 14/10/2024.



Nota. Gráfico ICCA PM2.5 del día 14 de octubre del 2024 con rango promedio regular 15 de octubre 2024

Figura 38

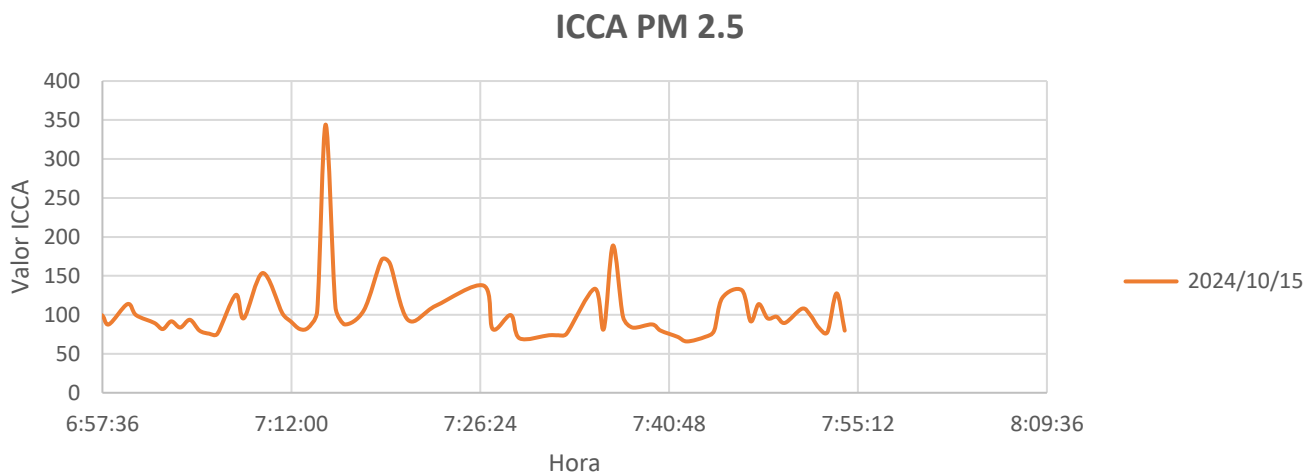
Concentración PM2.5 del día 15/10/2024



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM2.5 perteneciente al día 15 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia debajo de los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pero con un pico de más de 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y otro muy cercano a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 39

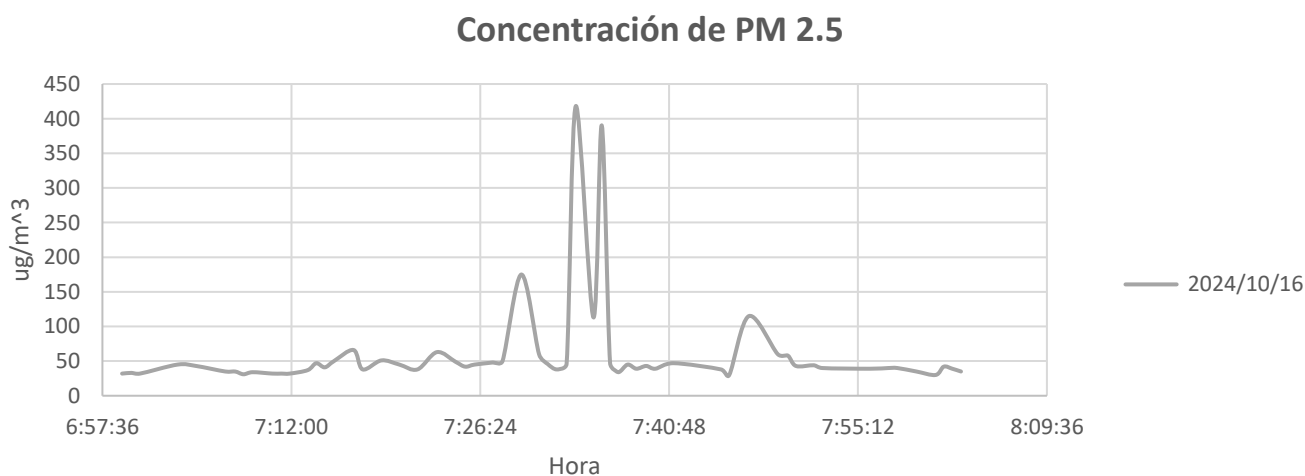
ICCA PM2.5 del día 15/10/2024



Nota. Gráfico ICCA PM2.5 del día 15 de octubre del 2024 con rango promedio deficiente 16 de octubre 2024

Figura 40

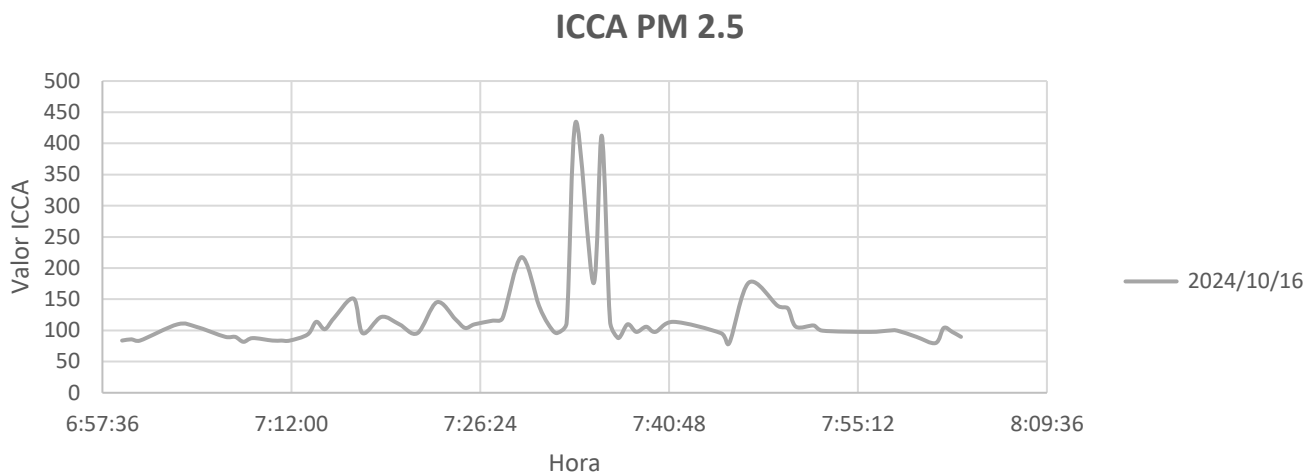
Concentración PM2.5 del día 16/10/2024.



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM2.5 perteneciente al día 16 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia debajo de los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pero con un pico de más de 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, otro alrededor de los 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el ultimo superior a los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 41

ICCA PM2.5 del día 16/10/2024.

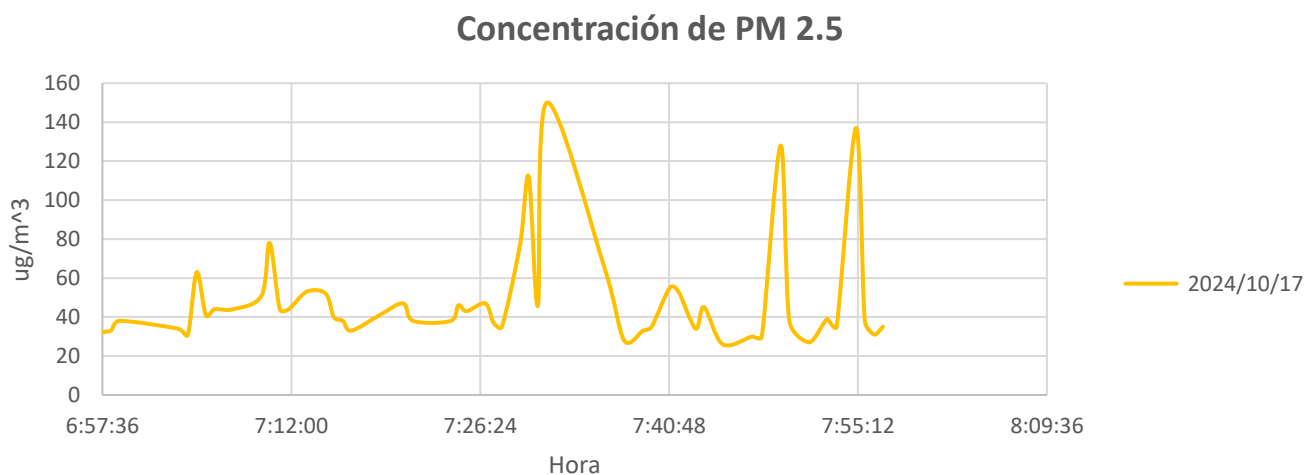


Nota. Gráfico ICCA PM2.5 del día 16 de octubre del 2024 con rango promedio deficiente

17 de octubre 2024

Figura 42

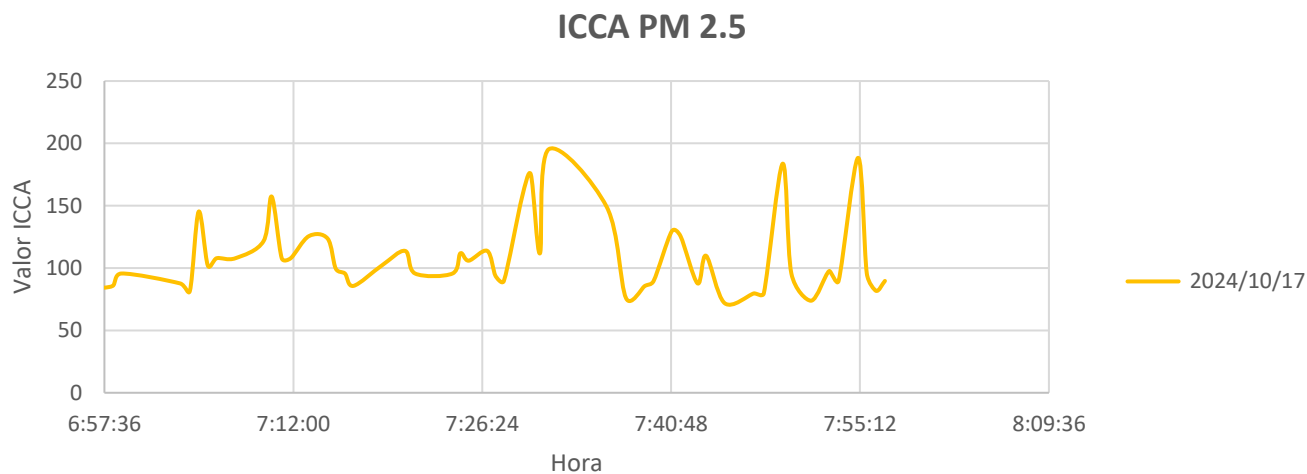
Concentración PM2.5 del día 17/10/2024.



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM2.5 perteneciente al día 17 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia debajo de los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pero con 4 picos entre los 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y los 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 43

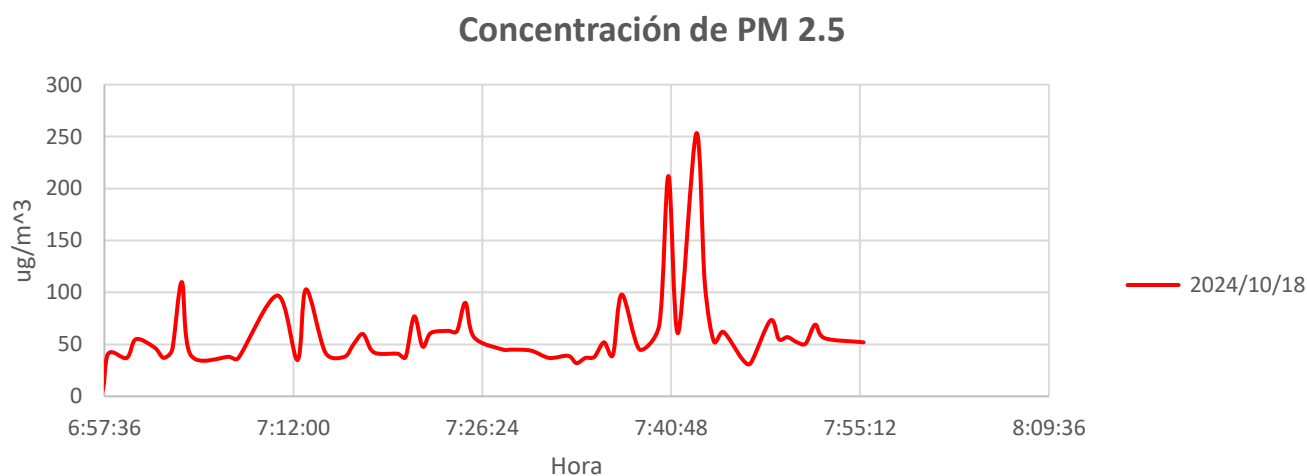
ICCA PM2.5 del día 17/10/2024.



Nota. Gráfico ICCA PM2.5 del día 17 de octubre del 2024 con rango promedio deficiente 18 de octubre 2024

Figura 44

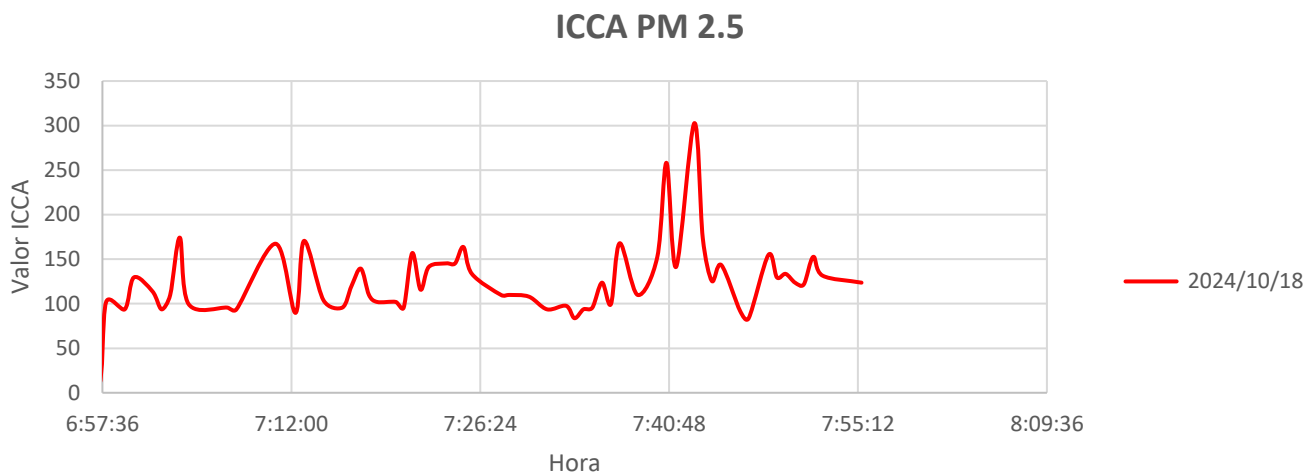
Concentración PM2.5 del día 18/10/2024



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM2.5 perteneciente al día 18 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia inferior a los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pero con dos valores picos superiores a los $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Figura 45

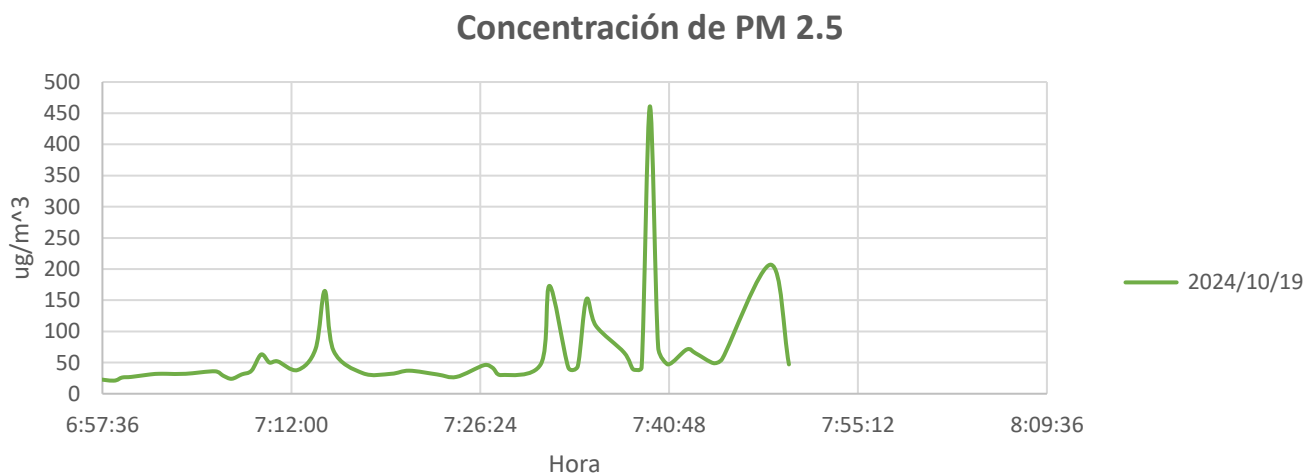
ICCA PM2.5 del día 18/10/2024.



Nota. Gráfico ICCA PM2.5 del día 18 de octubre del 2024 con rango promedio deficiente 19 de octubre 2024

Figura 46

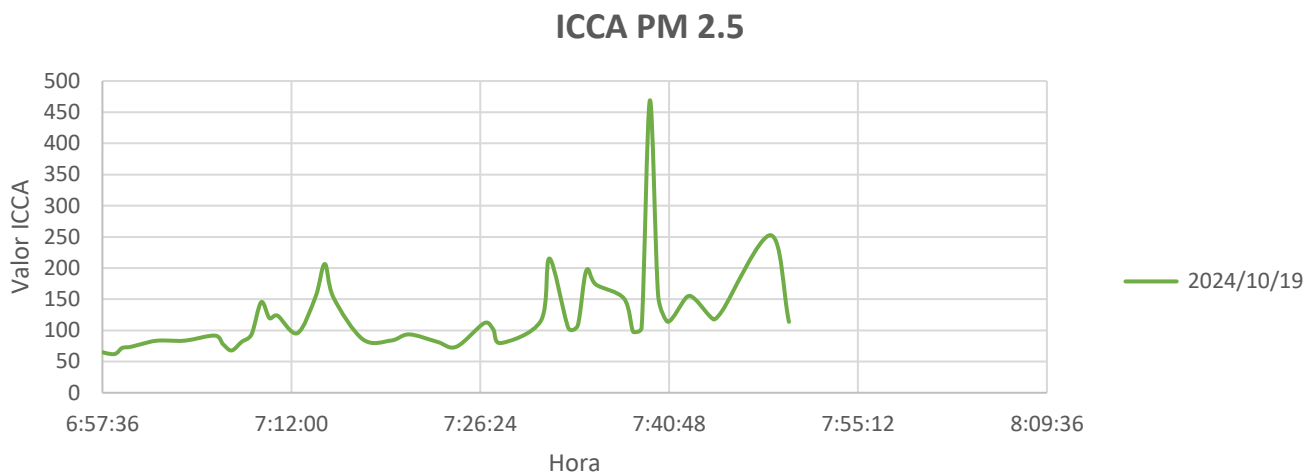
Concentración PM2.5 del día 19/10/2024



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM2.5 perteneciente al día 19 de octubre del 2024 donde se observa un valor pico preocupante superior a los 450 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 47

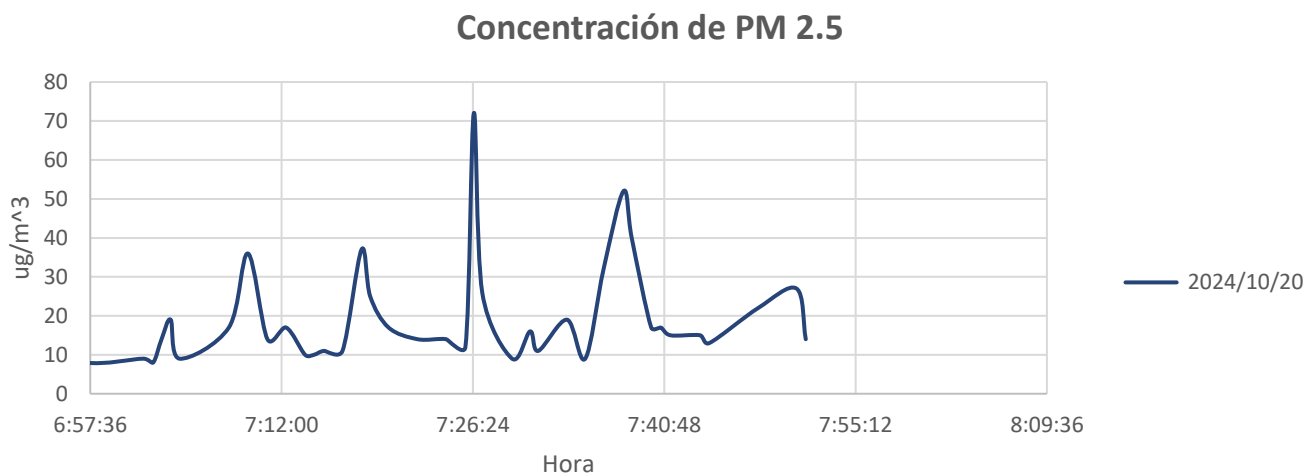
ICCA PM2.5 del día 19/10/2024.



Nota. Gráfico ICCA PM2.5 del día 19 de octubre del 2024 con rango promedio deficiente 20 de octubre 2024

Figura 48

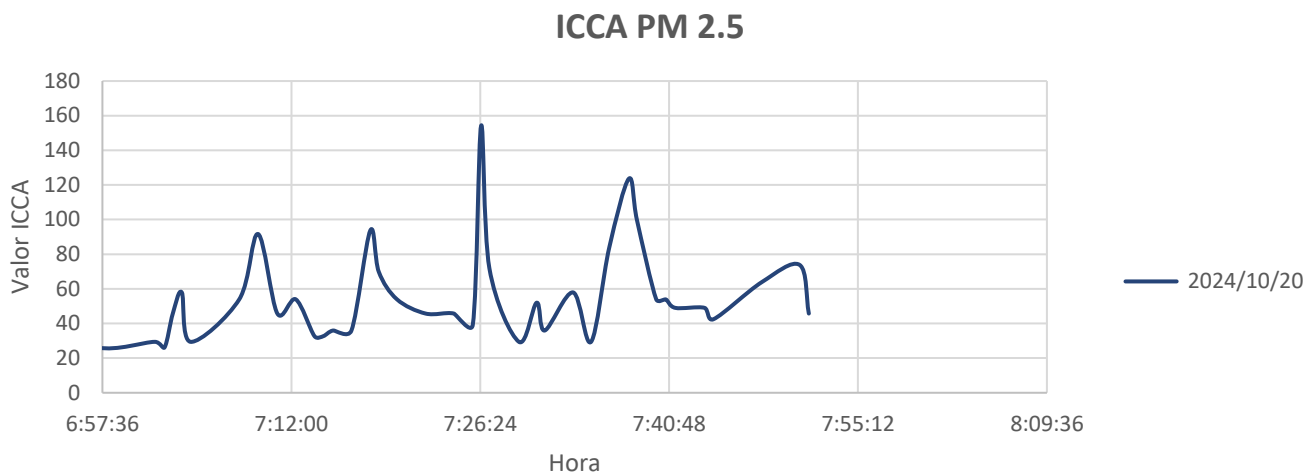
Concentración PM2.5 del día 20/10/2024.



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM2.5 perteneciente al día 20 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia muy positiva inferior a los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un valor pico superiore a los 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 49

ICCA PM2.5 del día 20/10/2024.



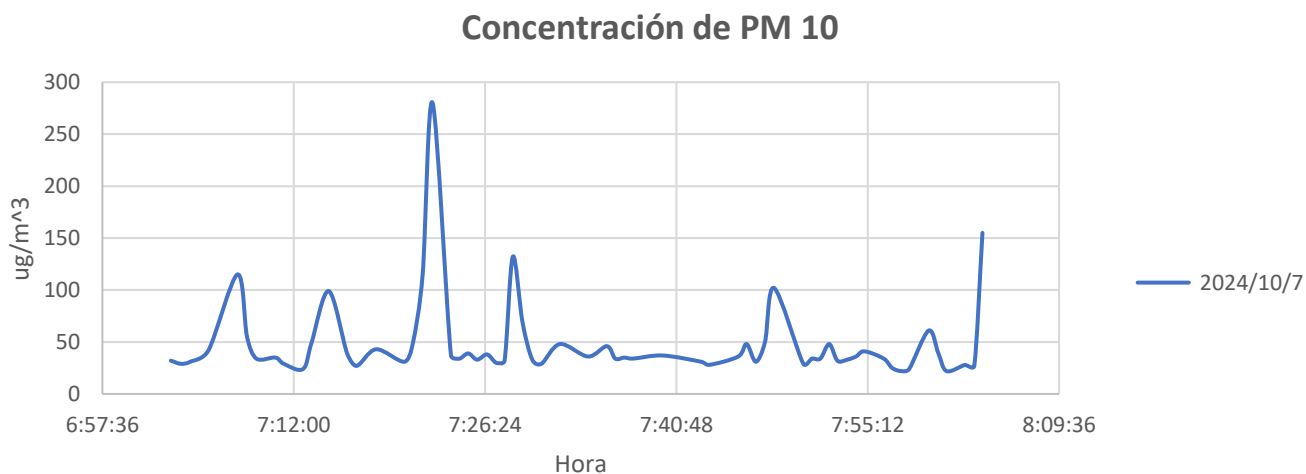
Nota. Gráfico ICCA PM2.5 del día 20 de octubre del 2024 con rango promedio regular

Graficas de material particulado PM10 por hora.

7 de octubre 2024

Figura 50

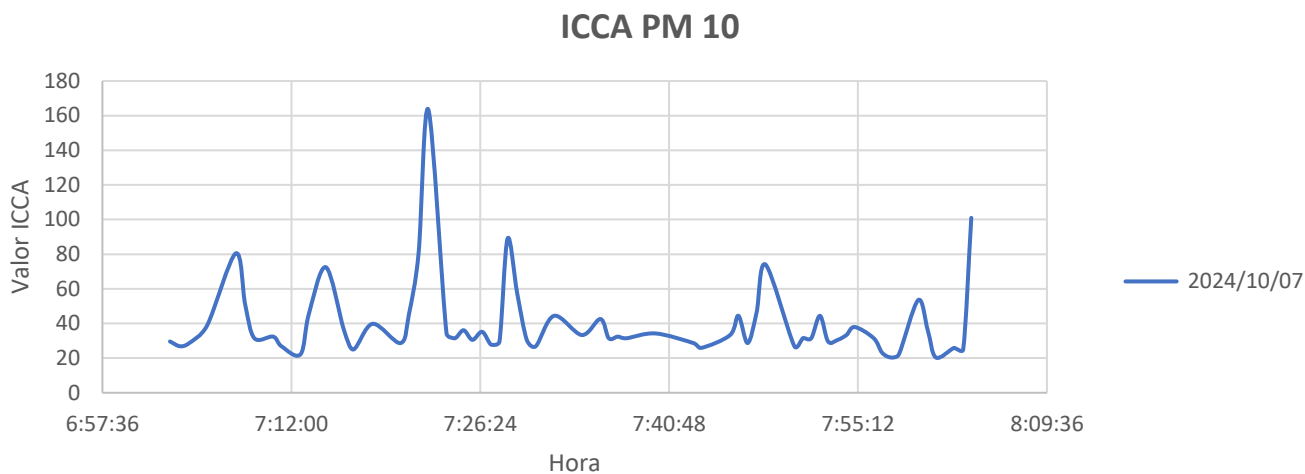
Concentración PM10 del día 07/10/2024.



Nota. La figura muestra una serie de tiempo de la concentración PM10 con los datos registrados el 7 de octubre del 2024 con un pico de 280 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 51

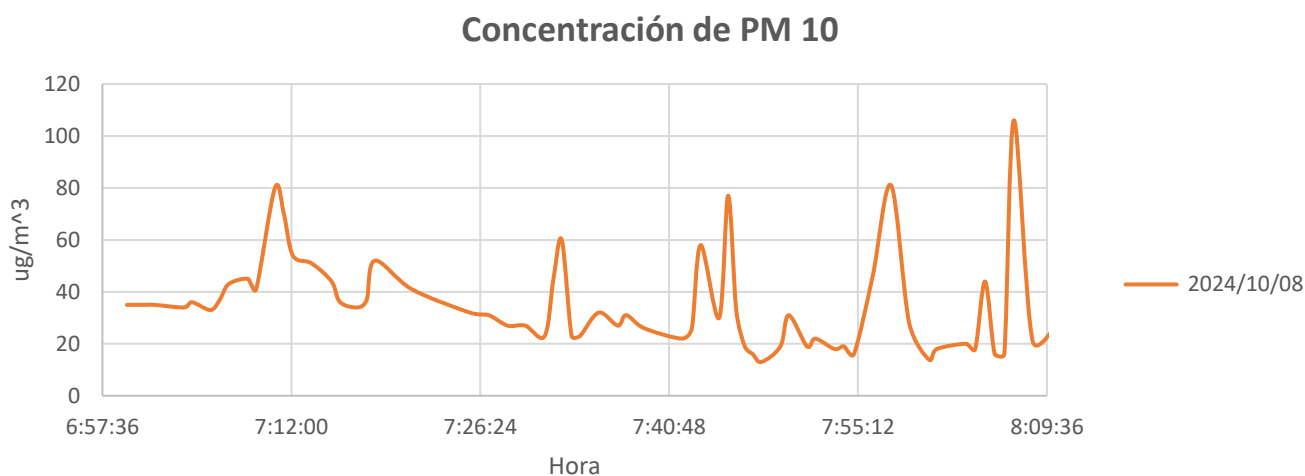
ICCA PM10 del día 07/10/2024.



Nota. Gráfico ICCA PM10 del día 7 de octubre del 2024 con rango promedio saludable 8 de octubre 2024

Figura 52

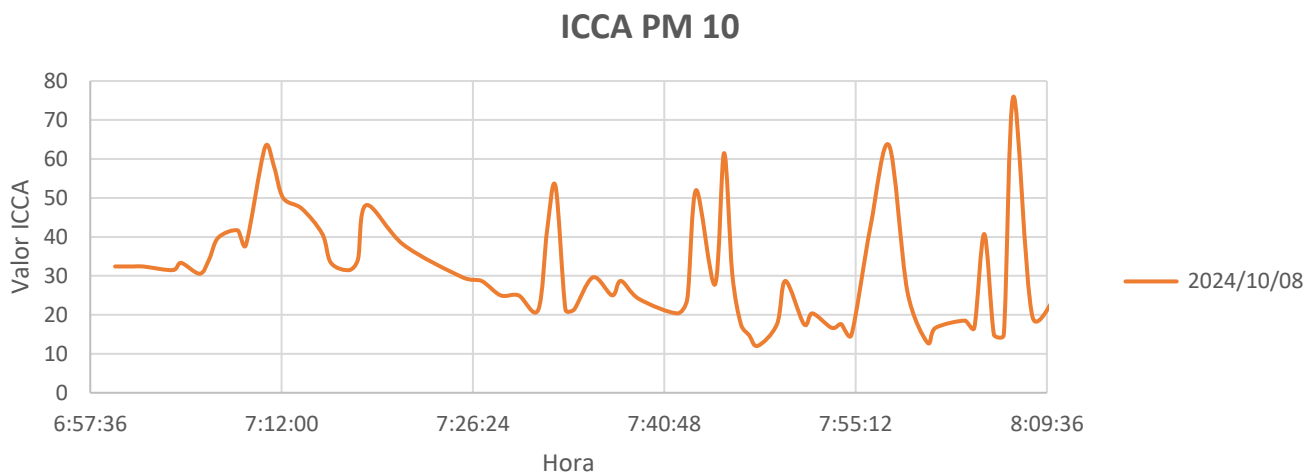
Concentración PM10 del día 08/10/2024.



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM10 perteneciente al día 8 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia muy positiva, inferior a los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con solo un valor pico apenas superior a los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 53

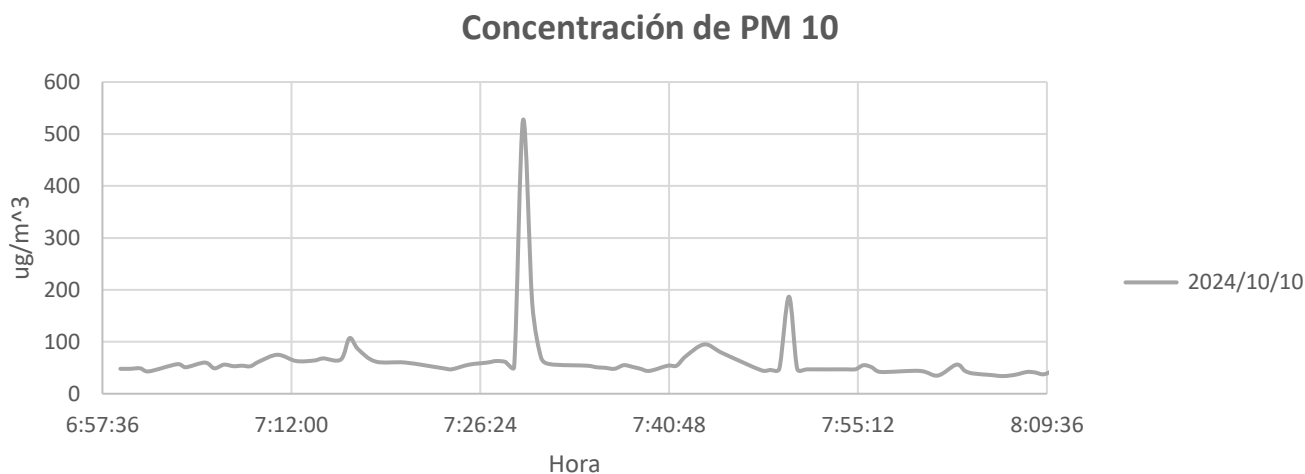
ICCA PM10 del día 08/10/2024.



Nota. Gráfico ICCE PM10 del día 8 de octubre del 2024 con rango promedio saludable 10 de octubre 2024

Figura 54

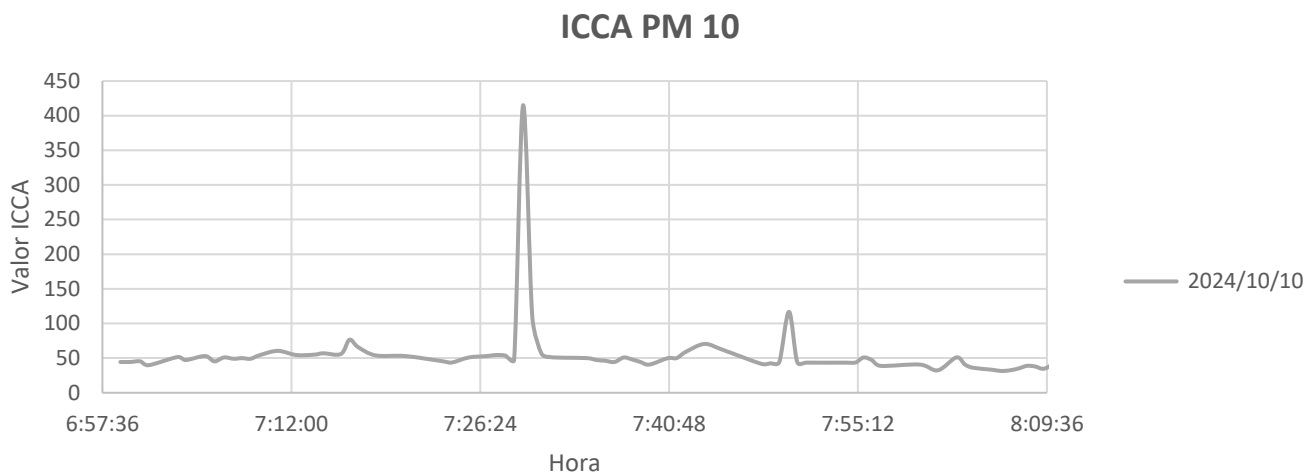
Concentración PM10 del día 10/10/2024.



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM10 perteneciente al día 10 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia muy positiva, inferior a los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un valor pico muy llamativo de $526 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y otro de $187 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 55

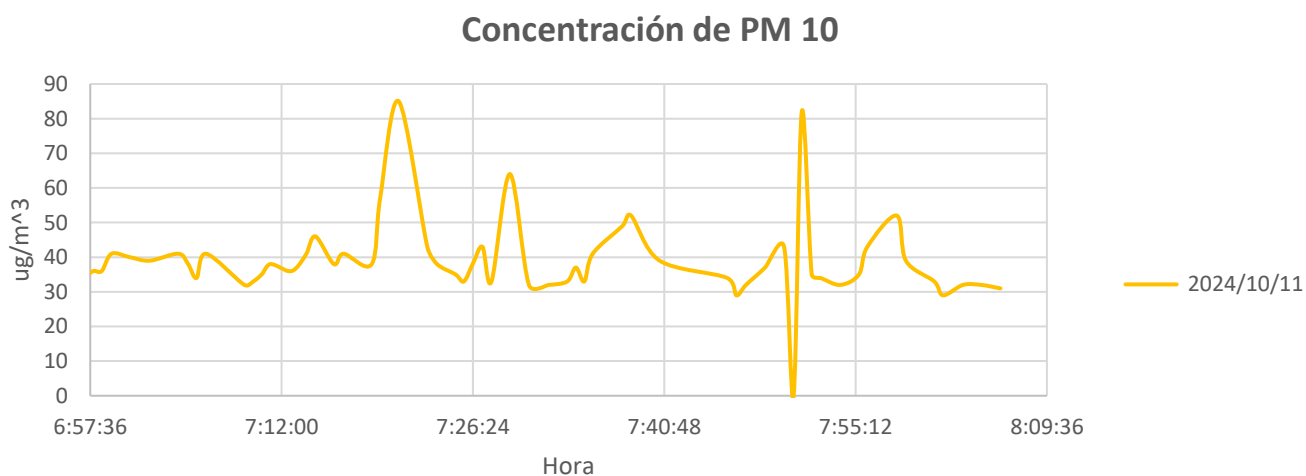
ICCA PM10 del día 10/10/2024.



Nota. Gráfico ICCA PM10 del día 10 de octubre del 2024 con rango promedio regular 11 de octubre 2024

Figura 56

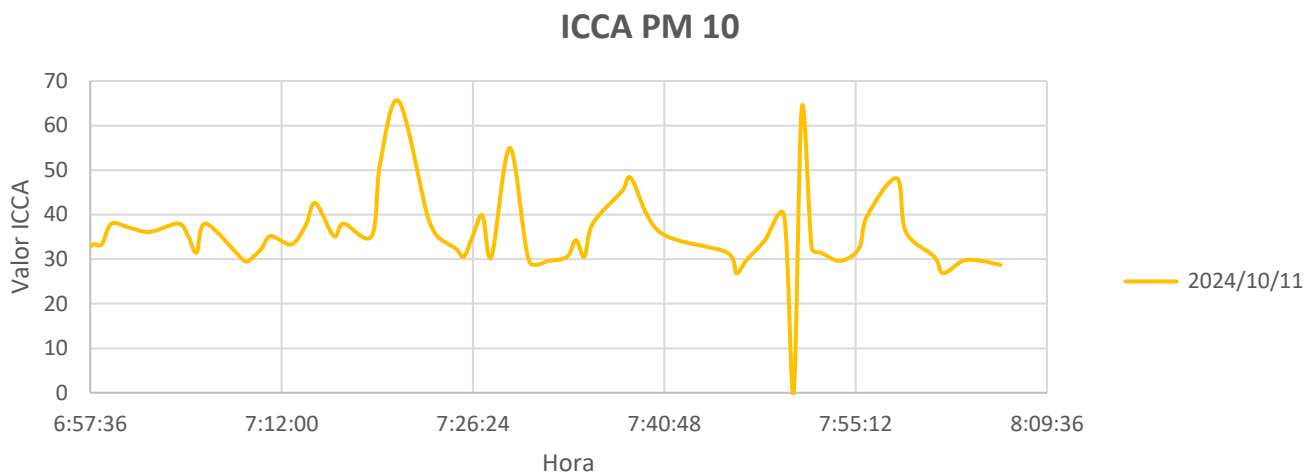
Concentración PM10 del día 11/10/2024.



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM10 perteneciente al día 11 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia muy positiva, inferior a los $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un valor muy llamativo de $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 57

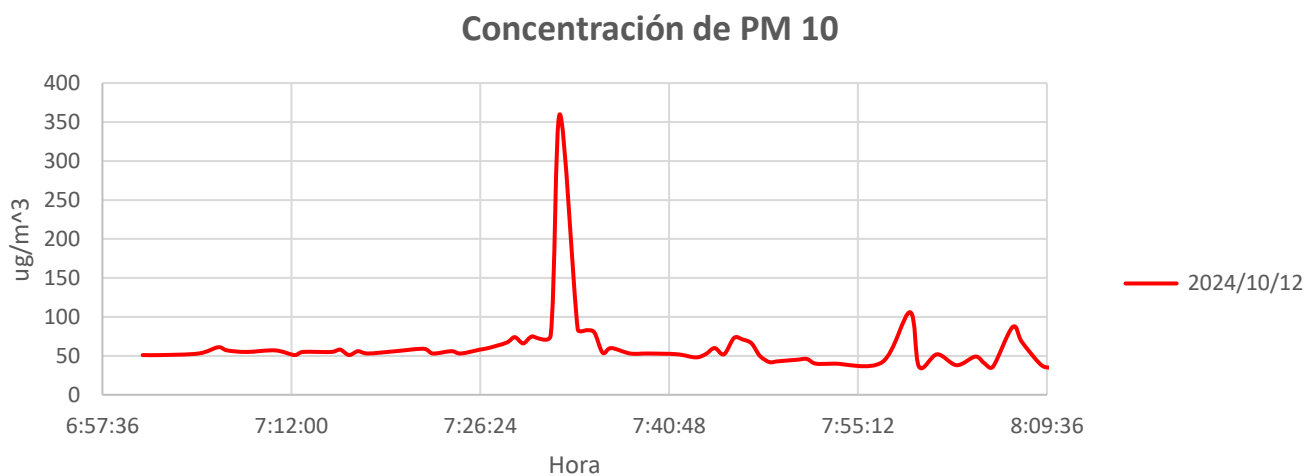
ICCA PM10 del día 11/10/202



Nota. Gráfico ICCE PM10 del día 11 de octubre del 2024 con rango promedio saludable 12 de octubre 2024

Figura 58

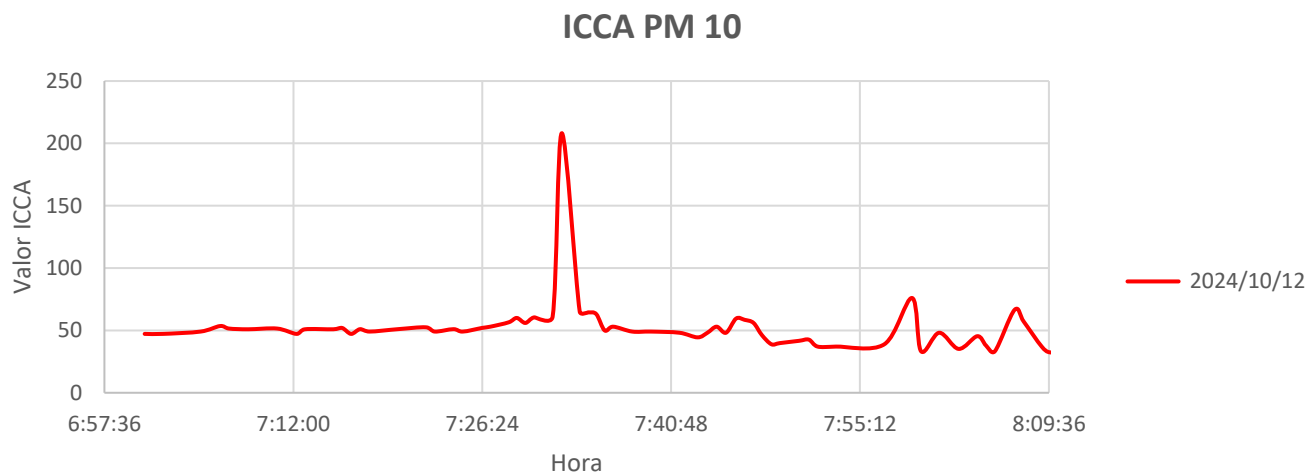
Concentración PM10 del día 12/10/2024



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM10 perteneciente al día 12 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia muy positiva, inferior a los 100 µg/m³, con un valor pico alarmante de 360 µg/m³.

Figura 59

ICCA PM10 del día 12/10/2024



Nota. Gráfico ICCA PM10 del día 12 de octubre del 2024 con rango promedio regular 13 de octubre 2024

Figura 60

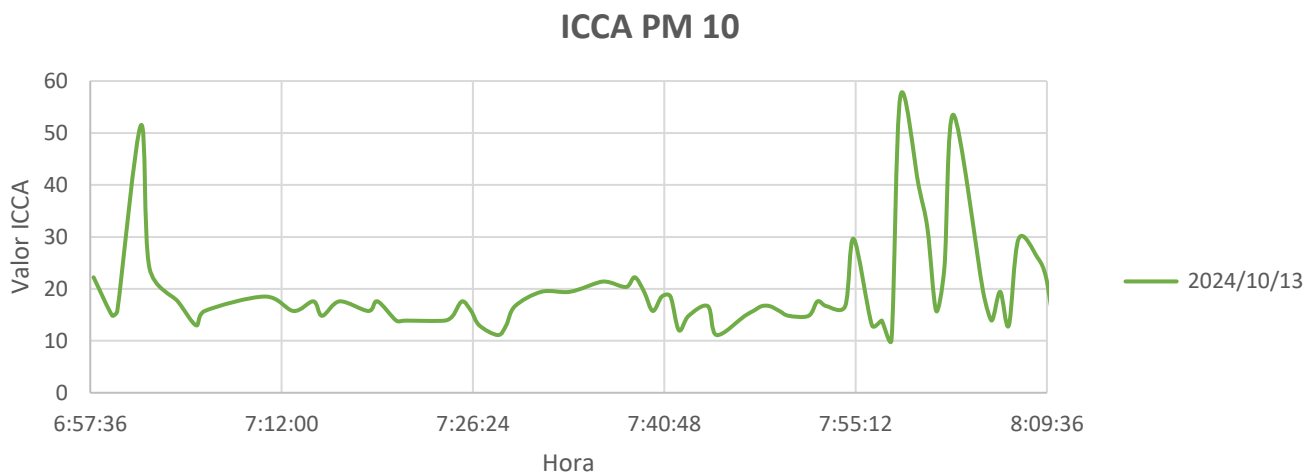
Concentración PM10 del día 13/10/2024.



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM10 perteneciente al día 13 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia muy alentadora, inferior a los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un valor máximo de 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 61

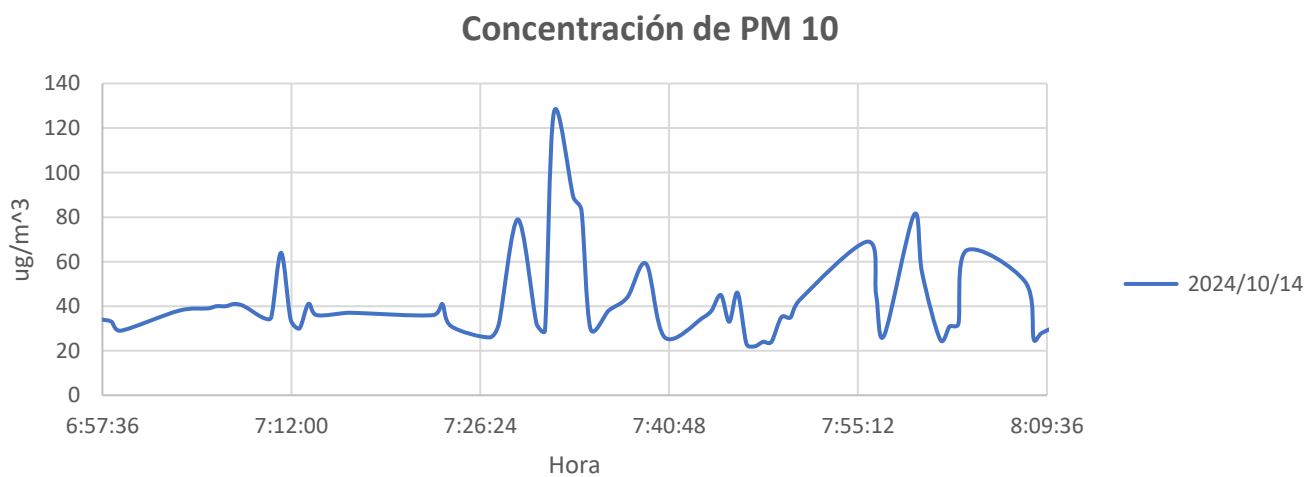
ICCA PM10 del día 13/10/2024



Nota. Gráfico ICCA PM10 del día 13 de octubre del 2024 con rango promedio saludable
14 de octubre 2024

Figura 62

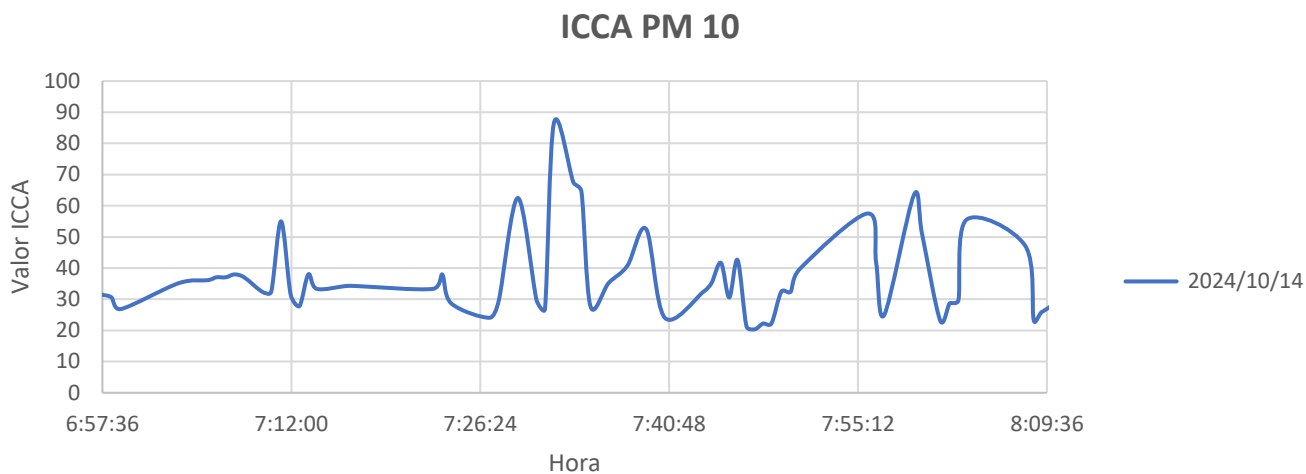
Concentración PM10 del día 14/10/2024.



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM10 perteneciente al día 14 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia muy alentadora, inferior a los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un valor atípico de $127 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 63

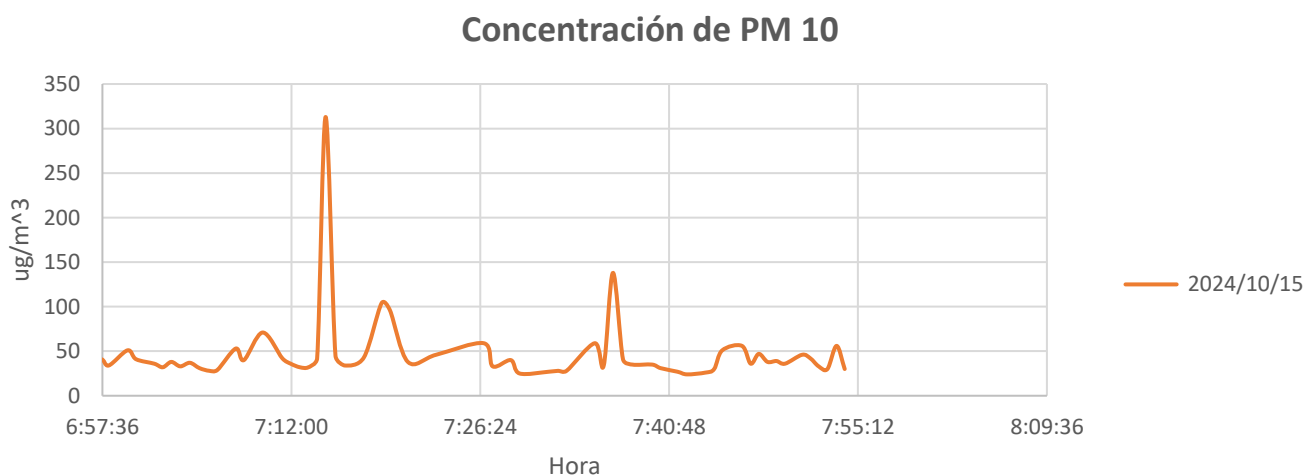
ICCA PM10 del día 14/10/2024.



Nota. Gráfico ICCA PM10 del día 14 de octubre del 2024 con rango promedio saludable 15 de octubre 2024

Figura 64

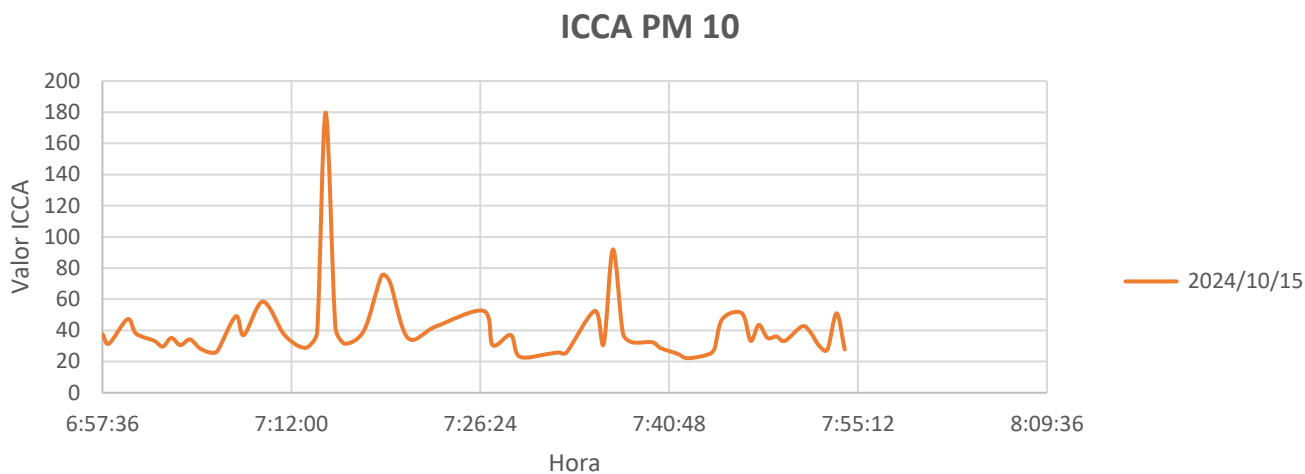
Concentración PM10 del día 15/10/2024.



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM10 perteneciente al día 15 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia muy positiva, inferior a los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un valor atípico alarmante de $313 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y otro pico de $138 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 65

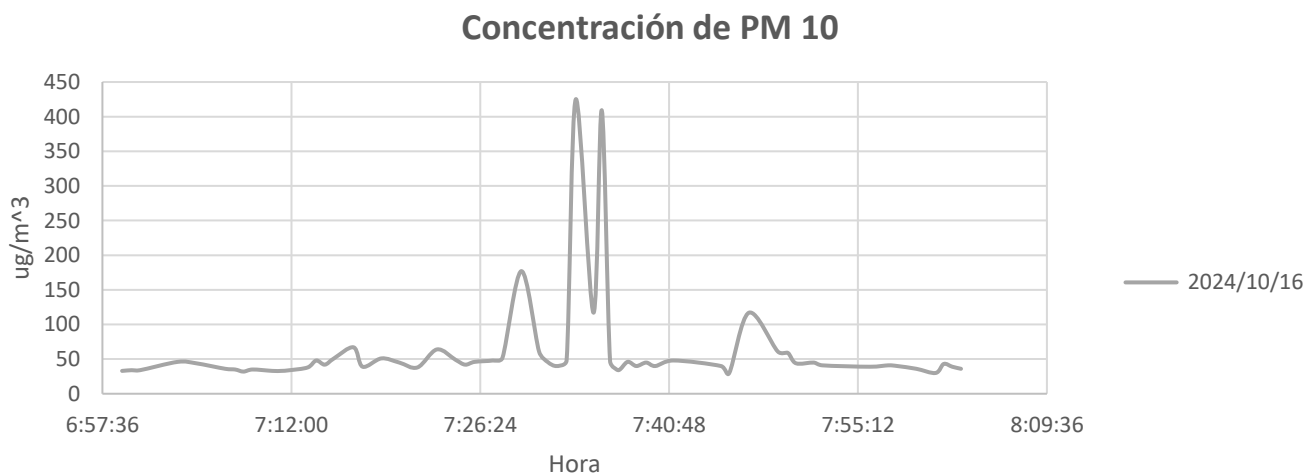
ICCA PM10 del día 15/10/2024.



Nota. Gráfico ICCA PM10 del día 15 de octubre del 2024 con rango promedio saludable 16 de octubre 2024

Figura 66

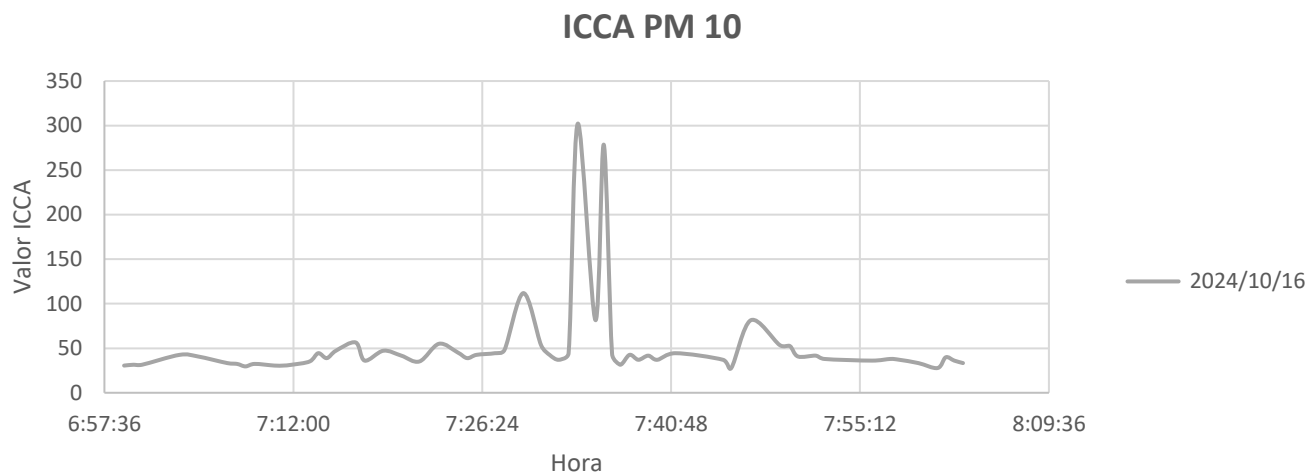
Concentración PM10 del día 16/10/2024



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM10 perteneciente al día 16 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia muy positiva, inferior a los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con valores alarmantes de 425 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 409 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 67

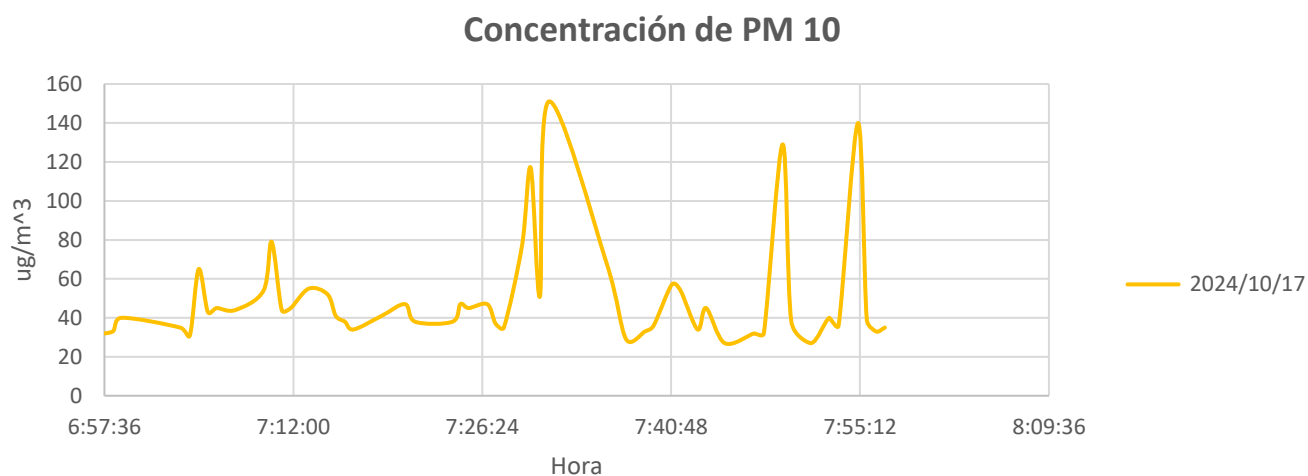
ICCA PM10 del día 16/10/2024.



Nota. Gráfico ICCA PM10 del día 16 de octubre del 2024 con rango promedio regular 17 de octubre 2024

Figura 68

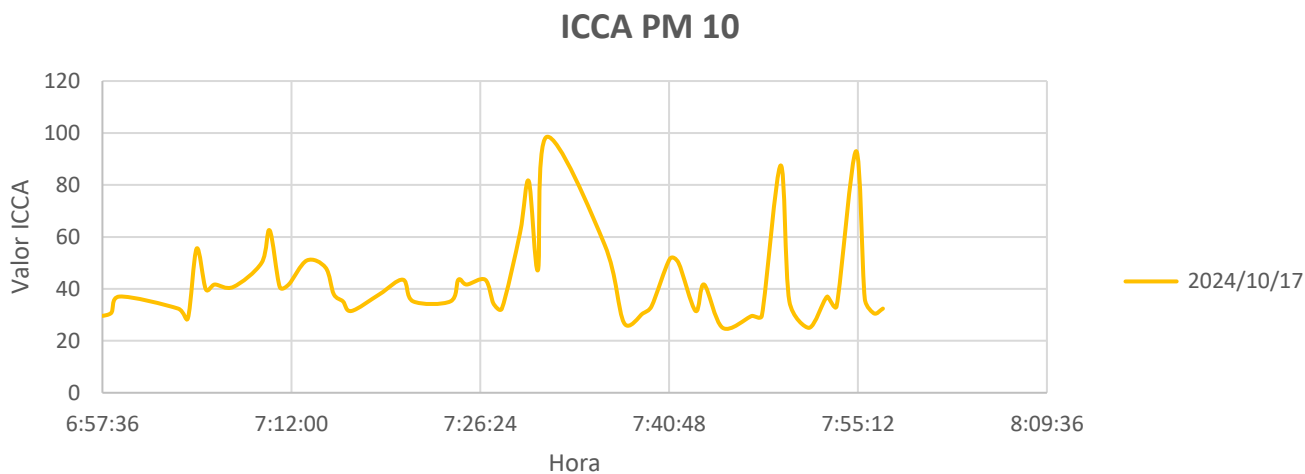
Concentración PM10 del día 17/10/2024.



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM10 perteneciente al día 17 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia muy positiva, inferior a los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con valores atípicos de $117 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $151 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $129 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 69

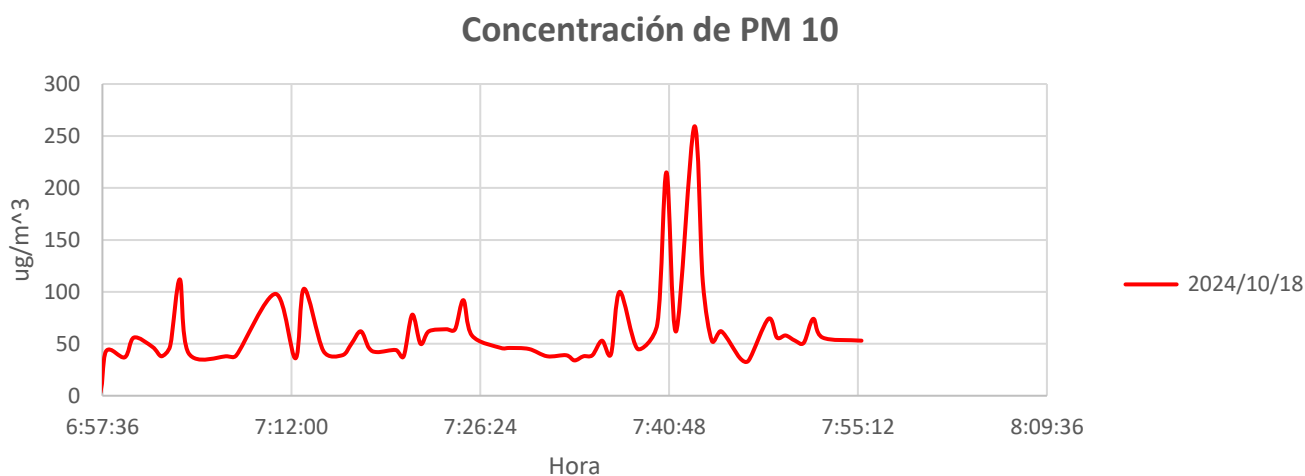
ICCA PM10 del día 17/10/2024.



Nota. Gráfico ICCA PM10 del día 17 de octubre del 2024 con rango promedio saludable 18 de octubre 2024

Figura 70

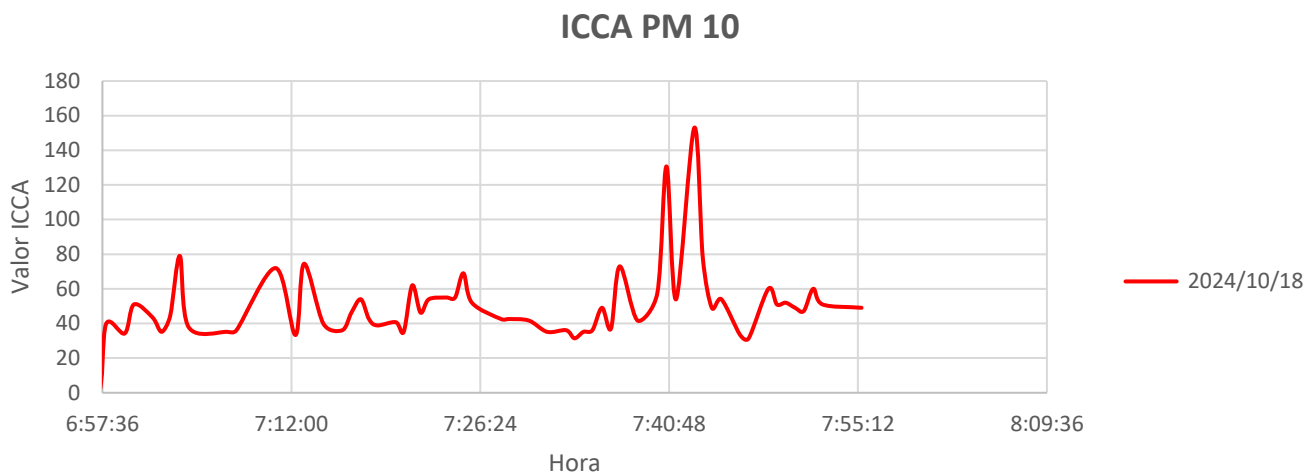
Concentración PM10 del día 18/10/2024.



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM10 perteneciente al día 18 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia entre los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con valores atípicos de 215 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el pico de 259 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 71

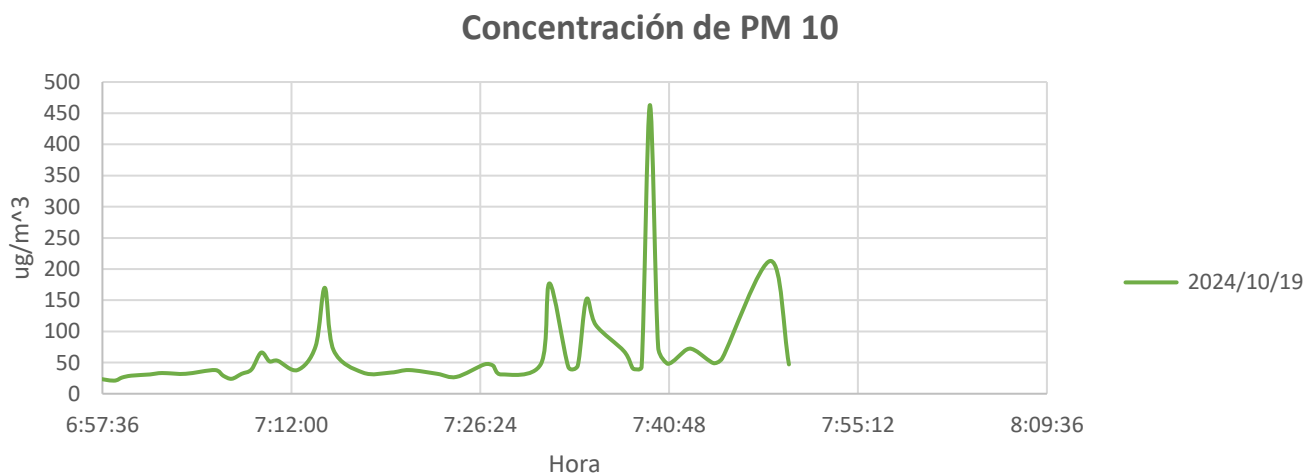
ICCA PM10 del día 18/10/2024.



Nota. Gráfico ICCA PM10 del día 18 de octubre del 2024 con rango promedio saludable
19 de octubre 2024

Figura 72

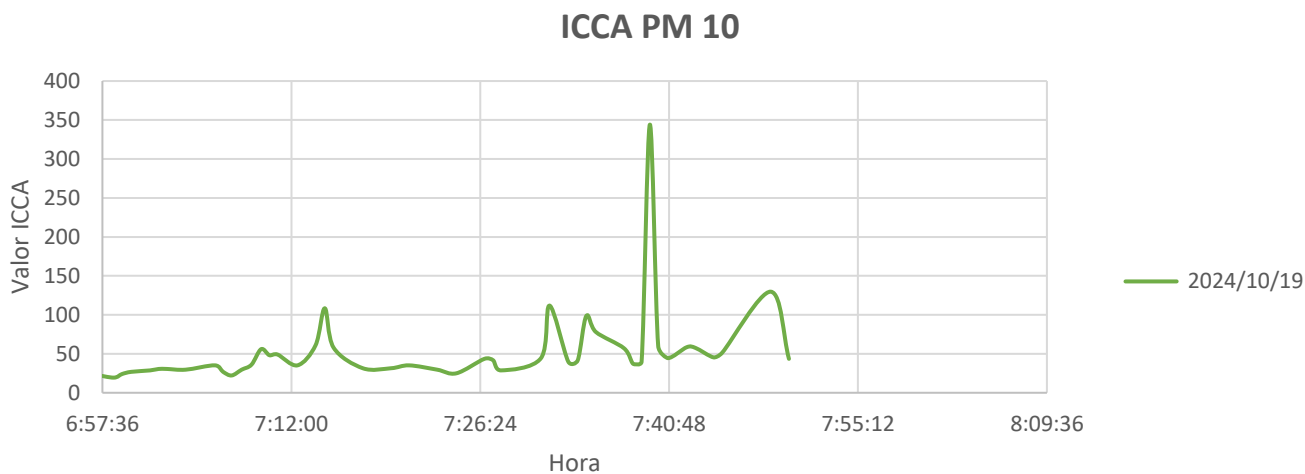
Concentración PM10 del día 19/10/2024.



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM10 perteneciente al día 19 de octubre del 2024 donde se observa el valor pico alarmante de $463 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y valores atípicos de $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $177 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $151 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $213 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 73

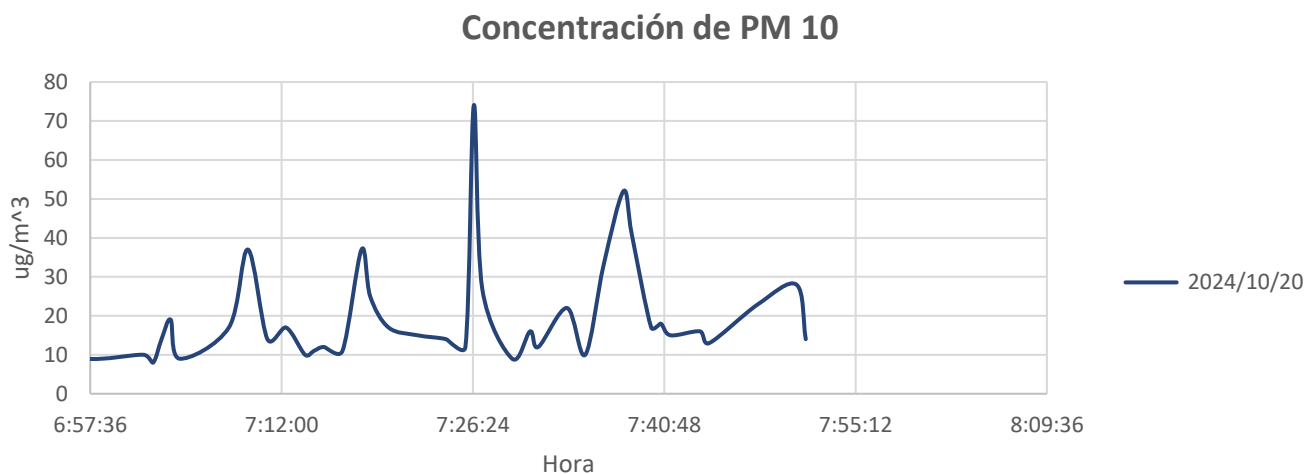
ICCA PM10 del día 19/10/2024.



Nota. Gráfico ICCA PM10 del día 19 de octubre del 2024 con rango promedio saludable 20 de octubre 2024

Figura 74

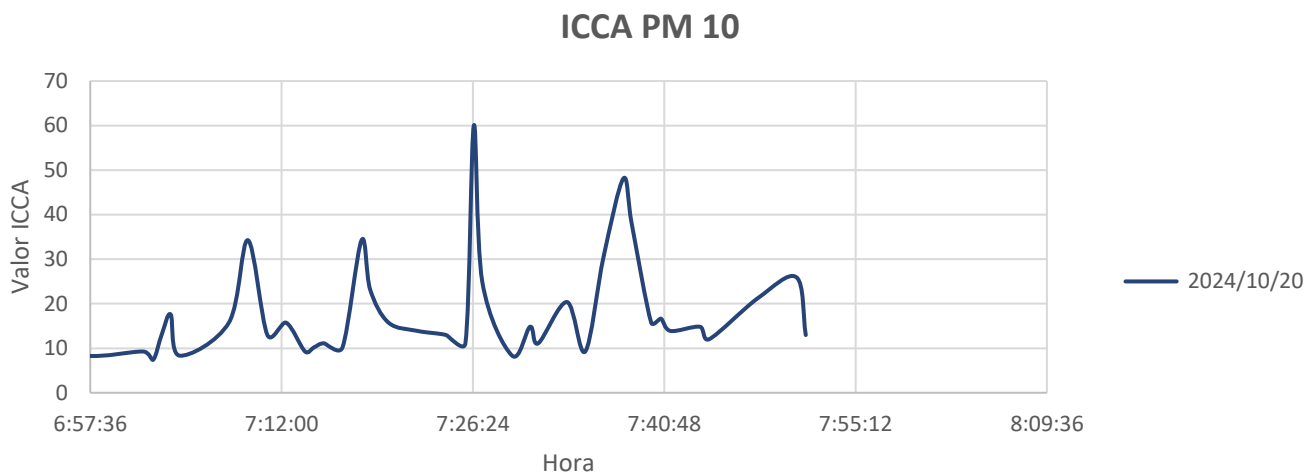
Concentración PM10 del día 20/10/2024.



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM10 perteneciente al día 20 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia muy positiva, inferior a los $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un valor máximo de apenas $74 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 75

ICCA PM10 del día 20/10/2024.



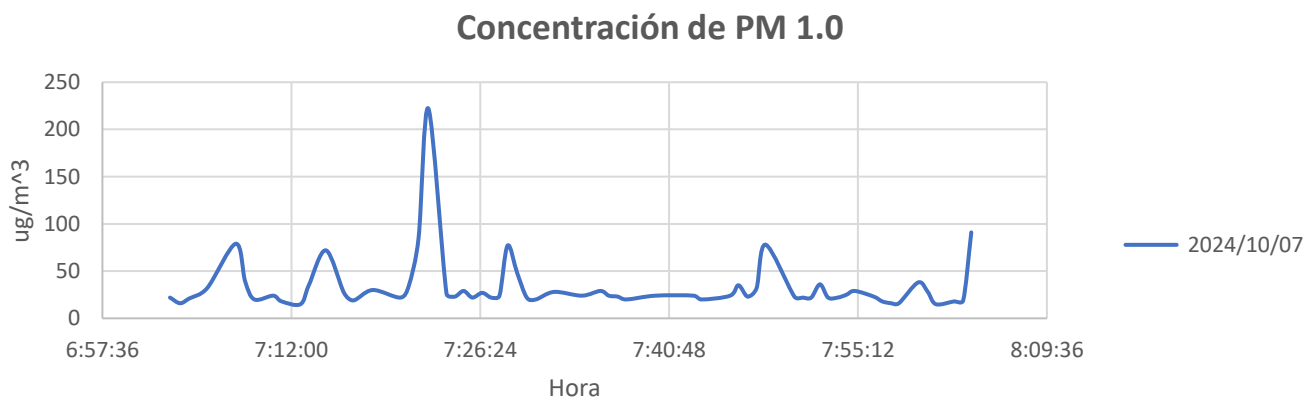
Nota. Gráfico ICCA PM10 del día 20 de octubre del 2024 con rango promedio saludable

Graficas de material particulado PM1.0 por hora.

7 de octubre 2024

Figura 76

Concentración PM1.0 del día 07/10/2024.

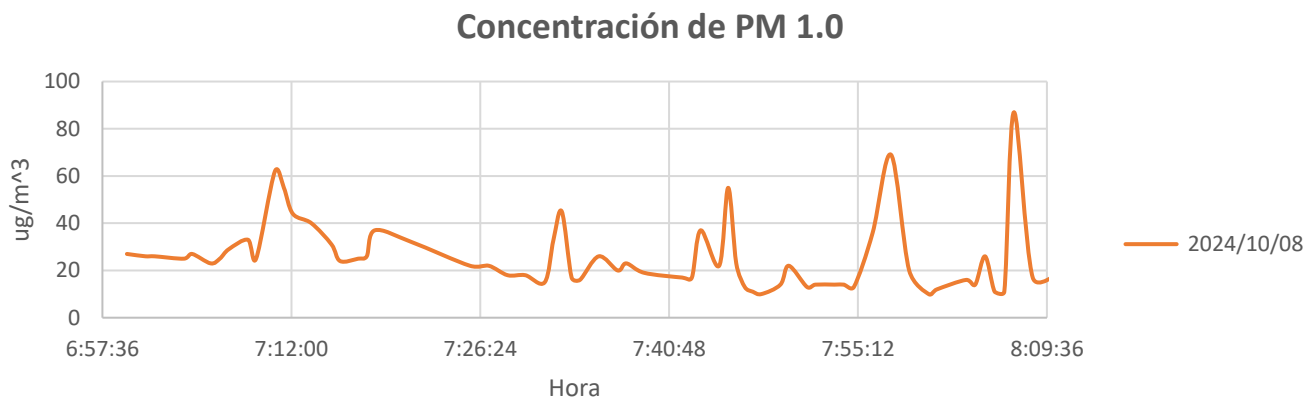


Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM1.0 perteneciente al día 7 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia inferior a los 79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con valor atípico y preocupante de 222 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

8 de octubre 2024

Figura 77

Concentración PM1.0 del día 08/10/2024.

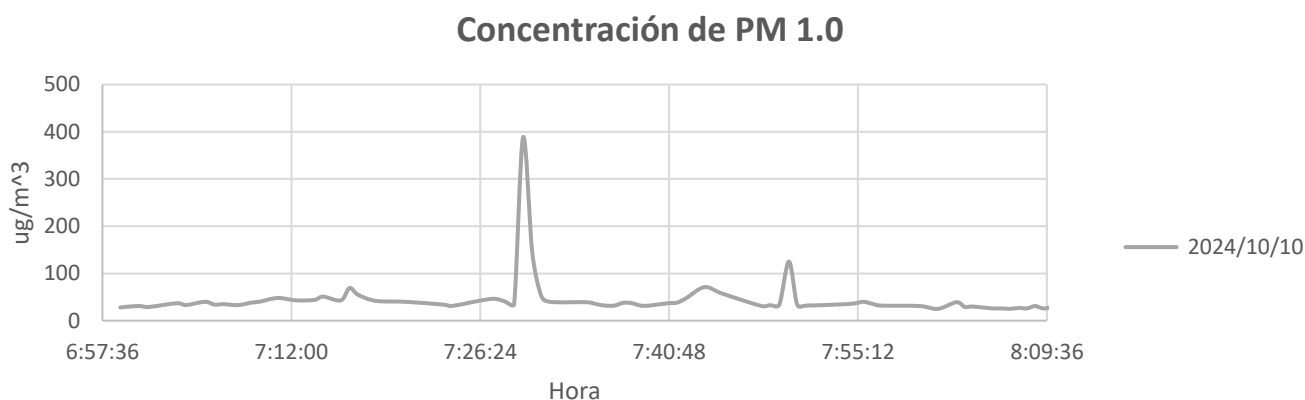


Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM1.0 perteneciente al día 8 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia muy alentadora, con un valor de concentración máximo de 87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

10 de octubre 2024

Figura 78

Concentración PM1.0 del día 10/10/2024.

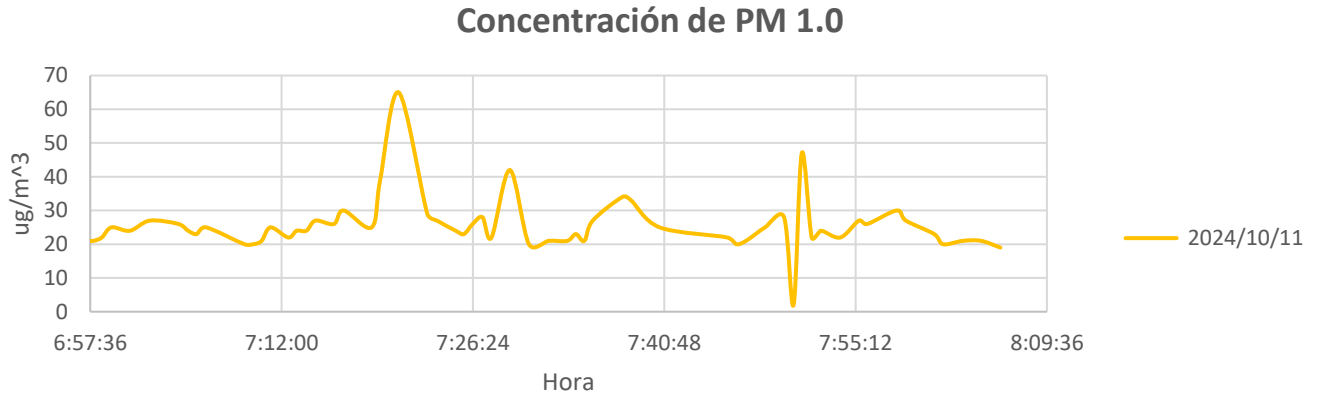


Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM1.0 perteneciente al día 10 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia inferior a los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un valor pico y preocupante de 388 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y otro de 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

11 de octubre 2024

Figura 79

Concentración PM1.0 del día 11/10/2024.

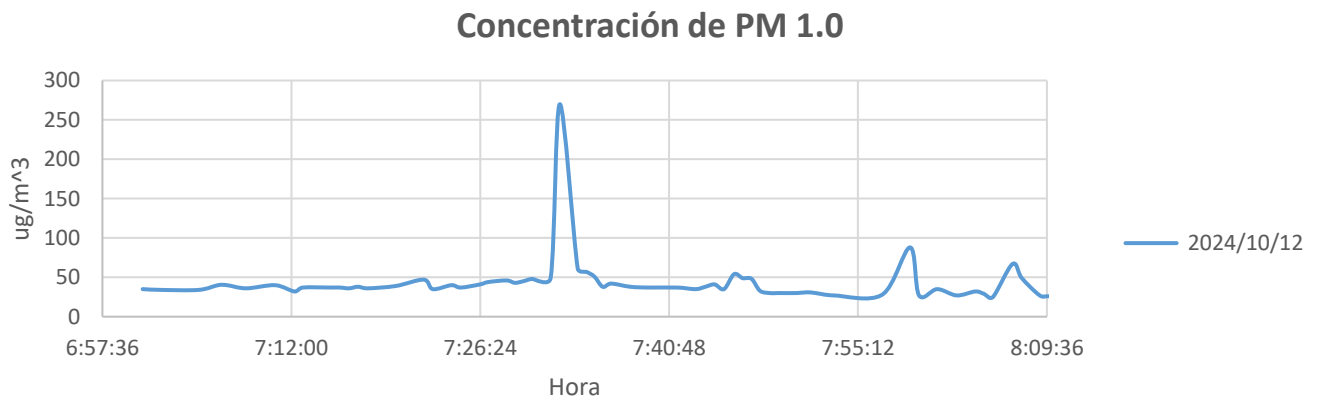


Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM1.0 perteneciente al día 11 de octubre del 2024 donde se observa que los valores no superan los 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, además de tener un valor mínimo de 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

12 de octubre 2024

Figura 80

Concentración PM1.0 del día 12/10/2024.

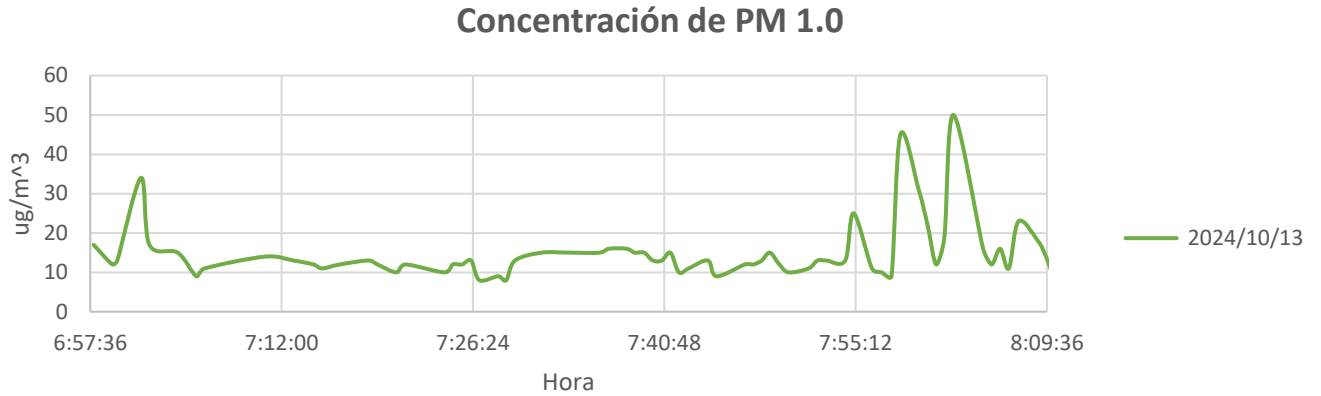


Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM1.0 perteneciente al día 12 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia positiva inferior a los 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pero con un valor atípico y preocupante de 270 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

13 de octubre 2024

Figura 81

Concentración PM1.0 del día 13/10/2024.

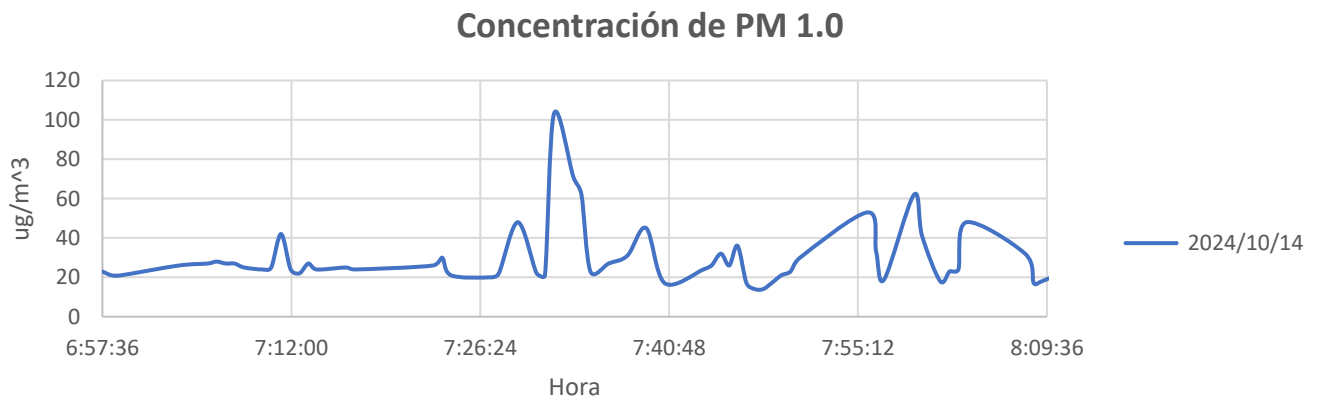


Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM1.0 perteneciente al día 13 de octubre del 2024 donde se observa un alentador valor máximo de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, además de tener un valor mínimo de $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

14 de octubre 2024

Figura 82

Concentración PM1.0 del día 14/10/2024.

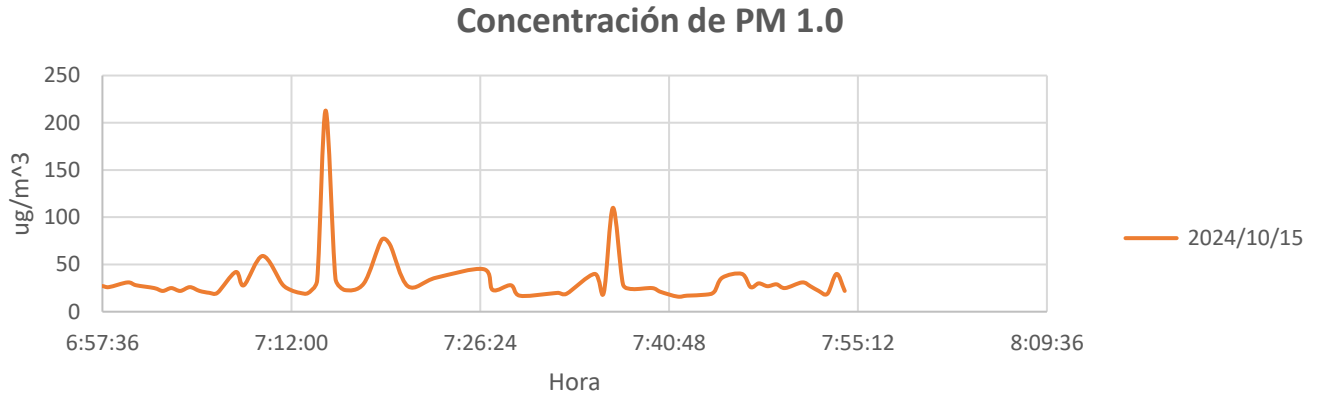


Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM1.0 perteneciente al día 14 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia positiva, pero con un valor atípico que corresponde a una concentración de $103 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

15 de octubre 2024

Figura 83

Concentración PM1.0 del día 15/10/2024

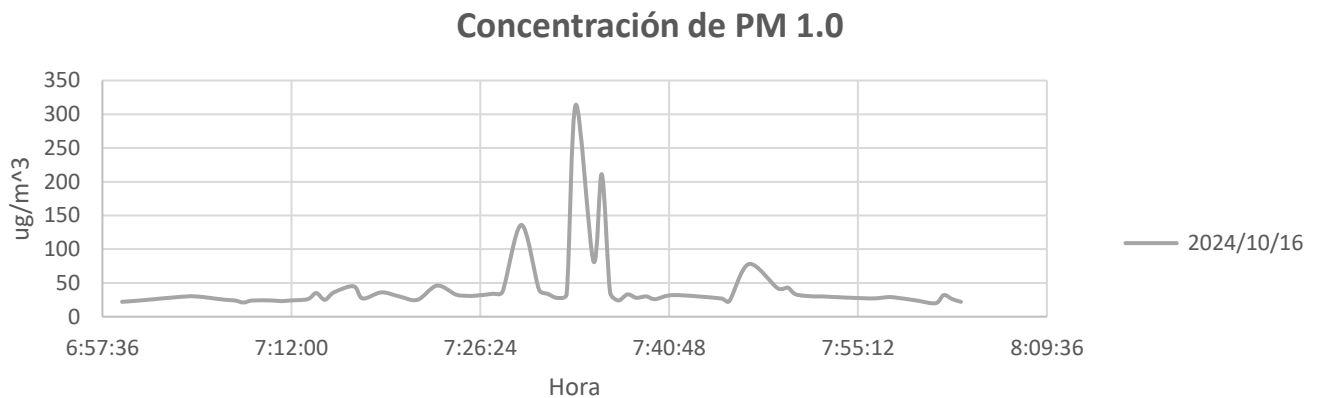


Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM1.0 perteneciente al día 15 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia positiva e inferior a los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pero con un valor atípico preocupante de 213 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

16 de octubre 2024

Figura 84

Concentración PM1.0 del día 16/10/2024.

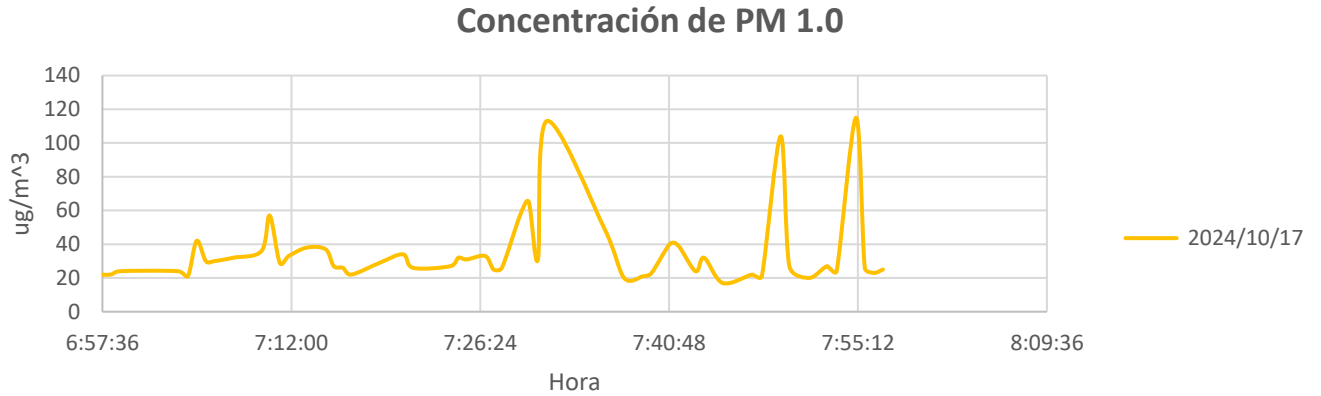


Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM1.0 perteneciente al día 16 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia inferior a los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pero con un valor pico preocupante de 314 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y otro valor atípico de 211 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

17 de octubre 2024

Figura 85

Concentración PM1.0 del día 17/10/2024.

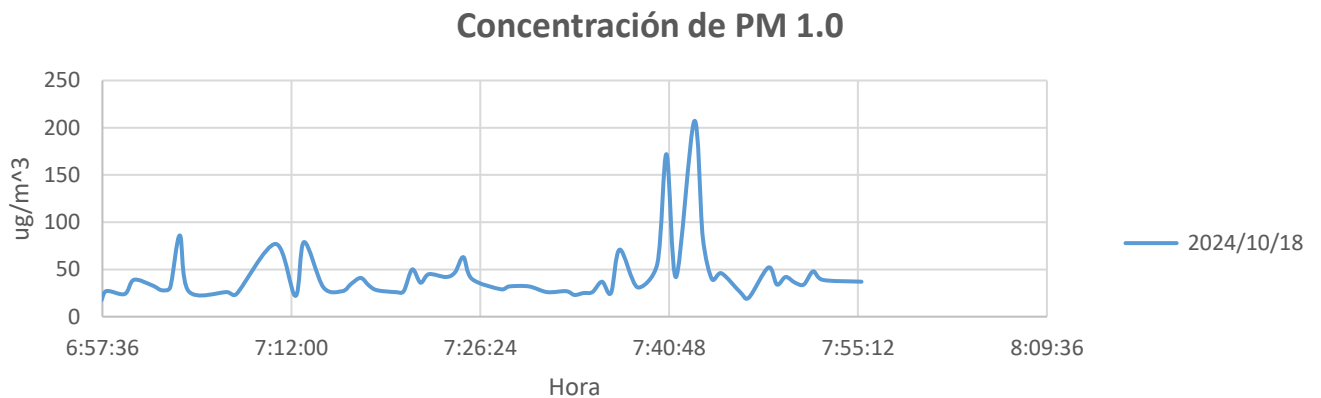


Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM1.0 perteneciente al día 17 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia inferior a los 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pero con tres valores atípicos de 115 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 113 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

18 de octubre 2024

Figura 86

Concentración PM1.0 del día 18/10/2024.

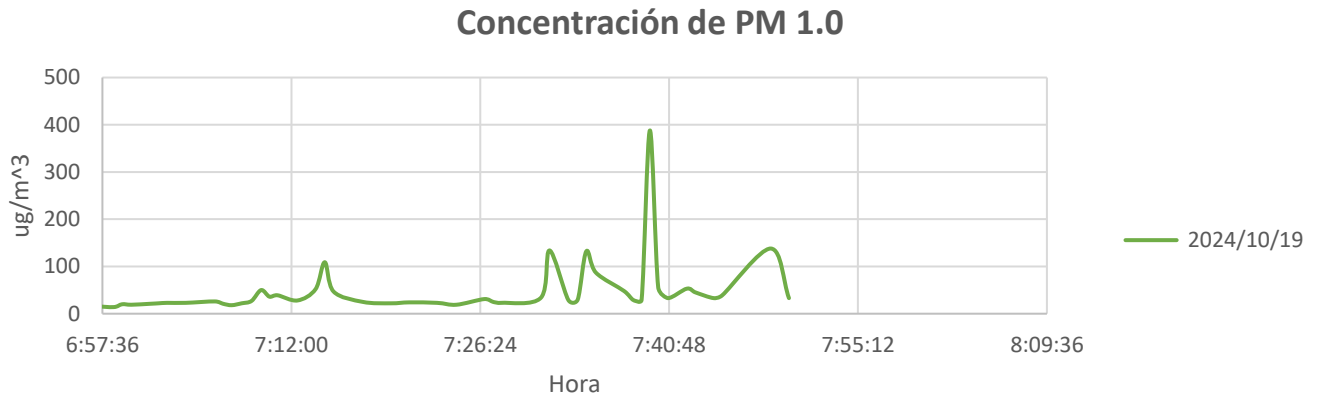


Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM1.0 perteneciente al día 18 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia inferior a los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pero con dos valores atípicos preocupantes de 207 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 172 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

19 de octubre 2024

Figura 87

Concentración PM1.0 del día 19/10/2024.

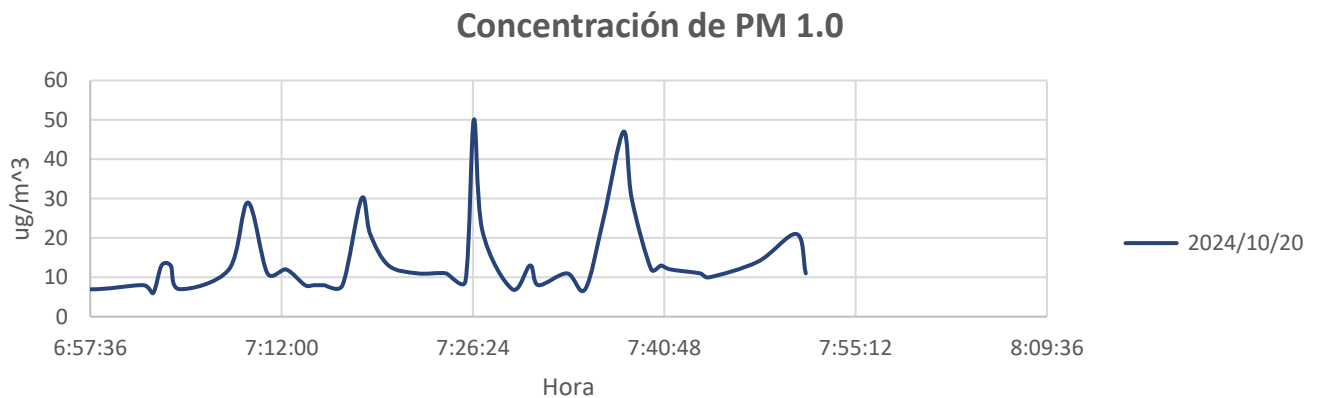


Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM1.0 perteneciente al día 19 de octubre del 2024 donde se observa una tendencia inferior a los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pero con tres valores atípicos entre $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un valor pico alarmante de $388 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

20 de octubre 2024

Figura 88

Concentración PM1.0 del día 20/10/2024.



Nota. La figura muestra la serie de tiempo de la concentración de PM1.0 perteneciente al día 20 de octubre del 2024 donde se observa un alentador valor máximo de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, además de tener un valor mínimo de $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Análisis diario de material particulado PM2.5 y PM10

En la primera semana se tuvo una mayor concentración de material particulado PM2.5 y PM10 el 10 de octubre, se observa en las tablas 5 y 6 que existe una relación proporcional de la cantidad de material PM2.5 y PM10 en el aire de todos los días. Se presenta a continuación dos tablas con datos estadísticos de los gráficos para la primera semana.

Tabla 5

Resultados estadísticos del material PM 2.5 para el periodo del 7 al 13 de octubre

Fecha	Valor máximo [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Valor mínimo [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Promedio [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Desviación estándar [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	ICCA promedio
7-oct	276.0000	21.0000	46.8226	39.4655	102.1924
8-oct	105.0000	12.0000	33.8507	18.2933	85.6201
10-oct	515.0000	33.0000	61.8158	57.9051	129.8340
11-oct	84.0000	1.0000	37.9661	11.4846	94.5309
12-oct	354.0000	30.0000	58.8507	39.0172	129.2505
13-oct	66.0000	11.0000	19.9178	9.8949	58.9143

Nota. La tabla muestra de forma resumida los datos estadísticos más importantes del material particulado PM2.5 en el periodo del 7 al 13 de octubre.

Tabla 6

Resultados estadísticos del material PM10 para el periodo del 7 al 13 de octubre

Fecha	Valor máximo [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Valor mínimo [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Promedio [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Desviación estándar [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	ICCA promedio
7-oct	280.0000	22.0000	48.1290	40.3694	40.1676
8-oct	106.0000	13.0000	34.6567	18.4075	31.0597
10-oct	527.0000	34.0000	63.1316	59.1104	54.2864
11-oct	85.0000	0.0000	38.9153	11.7756	35.5129
12-oct	360.0000	30.0000	59.9851	39.7223	51.2834
13-oct	68.0000	11.0000	20.5068	10.2363	18.8478

Nota. La tabla muestra de forma resumida los datos estadísticos más importantes del material particulado PM10 en el periodo del 7 al 13 de octubre.

Las tablas 5 y 6 muestran que la concentración promedio entre el material particulado PM2.5 y PM10 es muy similar. El valor promedio máximo para PM2.5 fue de 61.815 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, de igual manera para PM10 fue de 63.121 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para ambos casos este valor se dio el 10 de

octubre. El valor promedio del ICCA para PM2.5 fluctuó entre los rangos de satisfactoria y no satisfactoria de acuerdo a los rangos mostrados en la tabla 1, el valor promedio del ICCA para PM10 fluctuó entre los rangos de buena y satisfactoria.

La segunda semana presentó el mismo comportamiento entre la cantidad de partículas PM2.5 y PM10, así como también el valor máximo registrado que fue el 19 de octubre. Asimismo, se presentan dos tablas con datos estadísticos.

Tabla 7

Resultados estadísticos del material PM2.5 para el periodo del 14 al 20 de octubre.

Fecha	Valor máximo [µg/m³]	Valor mínimo [µg/m³]	Promedio [µg/m³]	Desviación estándar [µg/m³]	ICCA promedio
14-oct	122.0000	15.0000	39.5902	18.9503	95.8900
15-oct	305.0000	23.0000	45.0484	38.6215	101.7960
16-oct	418.0000	30.0000	59.2069	69.7343	119.0843
17-oct	150.0000	26.0000	48.2830	26.7649	108.2513
18-oct	253.0000	1.0000	58.0667	39.1952	122.5124
19-oct	461.0000	21.0000	58.5370	68.3531	115.0897
20-oct	72.0000	8.0000	18.4318	12.5964	53.4951

Nota. La tabla muestra de forma resumida los datos estadísticos más importantes del material particulado PM2.5 en el periodo del 14 al 20 de octubre.

Tabla 8

Resultados estadísticos del material PM10 para el periodo del 14 al 20 de octubre.

Fecha	Valor máximo [µg/m³]	Valor mínimo [µg/m³]	Promedio [µg/m³]	Desviación estándar [µg/m³]	ICCA promedio
14-oct	127.0000	15.0000	40.7541	19.3655	36.1293
15-oct	313.0000	24.0000	45.9839	39.4177	39.3797
16-oct	425.0000	30.0000	60.5690	71.9074	50.6480
17-oct	151.0000	27.0000	49.3585	27.1811	42.5119
18-oct	259.0000	0.0000	59.1500	39.9274	49.0866
19-oct	463.0000	21.0000	59.7778	68.9396	48.5176
20-oct	74.0000	8.0000	18.8864	12.8320	17.2938

Nota. La tabla muestra de forma resumida los datos estadísticos más importantes del material particulado PM10 en el periodo del 14 al 20 de octubre.

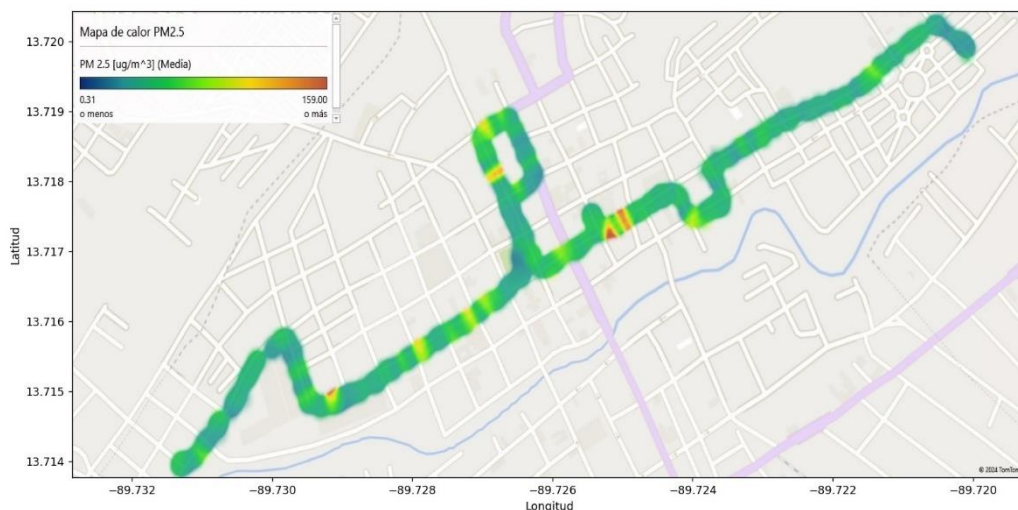
El comportamiento que tuvo la segunda semana fue muy similar al de la primera, se tuvo una máxima medición de concentración para el día 16 de octubre para PM2.5 y PM10 y de igual manera la concentración promedio en su valor más alto, con $69.7343 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5 y $60.5690 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10. El valor promedio más alto de ICCA para PM2.5 se dio el 18 de octubre con un valor de 122.5124, mientras que para PM10 se dio el 16 de octubre con un valor de 50.6480.

Mapas de Calor

Utilizando mapas de calor se observó la distribución que se tuvo de material particulado en todos los días que se tomaron mediciones, para ello se promedió las mediciones de concentración obtenidas en todos los puntos de la ruta. Los mapas se muestran a continuación.

Figura 89

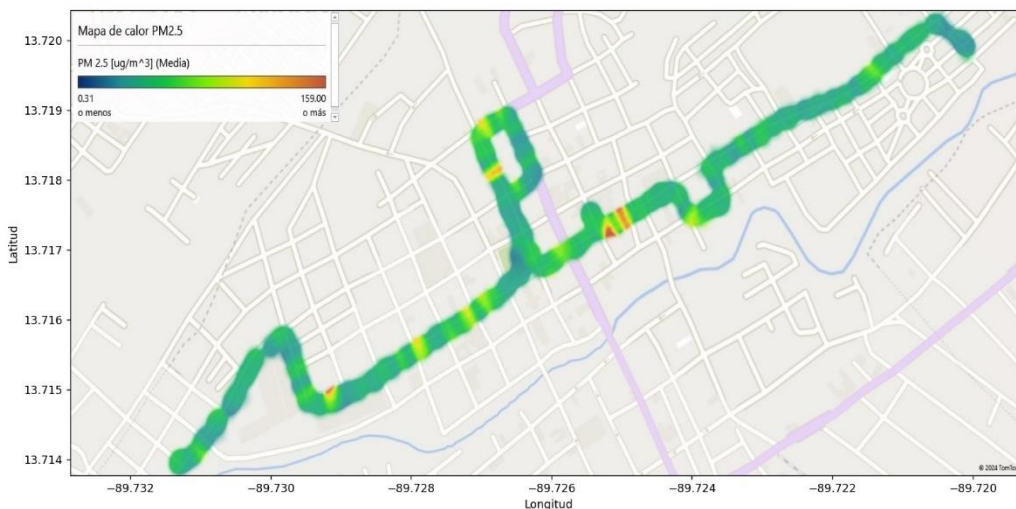
Mapa de calor PM 2.5 en el periodo del 7 al 20 de octubre.



Nota. La figura muestra un mapa de calor de PM2.5, donde la concentración promedio es moderada, excepto en algunas zonas rojas que superan los $159 \mu\text{g}/\text{m}^3$, las cuales se clasifican como dañinas para la salud según el ICCA.

Figura 90

Mapa de calor PM 10 en el periodo del 7 al 20 de octubre

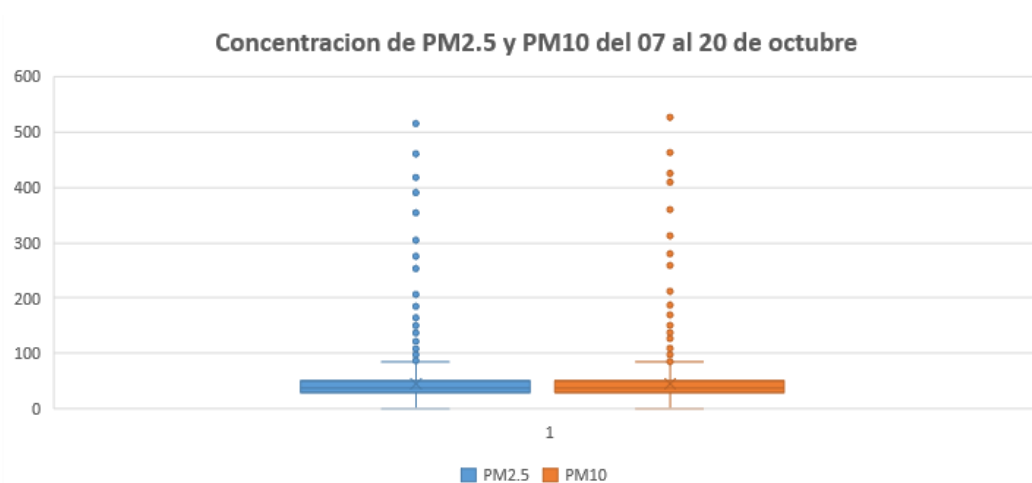


Nota. La figura muestra el mapa de calor de PM10, donde las concentraciones son significativamente menores que las de PM2.5, con pocas zonas que superan los 254 µg/m³, clasificándose como calidad de aire no satisfactoria según ICCA.

Por último, se hizo uso de diagramas de caja y bigote para poder identificar los valores típicos que representen de mejor manera la concentración que existe en el aire de Sonsonate Centro.

Figura 91

Diagrama de caja y bigote para los datos obtenidos desde el 7 al 20 de octubre.



Nota. El grafico muestra un diagrama de caja y bigote de los datos tomados en las dos semanas de investigación, se aprecia que el rango típico de material particulado PM10 y PM2.5 es similar, con una concentración típica de entre 0 a 80 µg/m³

Discusión de resultados

En base a los datos recopilados en las dos semanas de estudio se pueden responder una serie de preguntas derivadas.

¿Cuál es el valor promedio por día de ICCA para PM2.5?

Las tablas 5 y 7 muestran de forma general el resultado estadístico de material particulado PM 2.5 para ambas semanas. El valor promedio obtenido para la primera semana tuvo su máximo el día 10 de octubre, correspondiendo a un jueves, con un valor de 129.8340, por el contrario el valor mínimo se obtuvo el día 13 de octubre, correspondiendo a un domingo, con un valor de 58.9143 puntos en la escala ICCA. La segunda semana se obtuvo un valor máximo el día 18 de octubre, correspondiendo a un día viernes, con un valor de 122.5124 puntos y el valor mínimo registrado en esta semana se dio el 20 de octubre, correspondiendo a un domingo, con un valor de 53.4951 puntos en la escala ICCA. Se observó que en ambas semanas se el valor promedio osciló entre los 50 puntos a 130 puntos en la escala ICCA que en su valor mínimo y de acuerdo a la normativa mostrada en la tabla 2, se encuentra en el rango de regular y en su valor máximo registrado en deficiente.

¿Cuál es el valor promedio por día de ICCA para PM10?

Los valores estadísticos para material particulado PM10 se exponen en las tablas 6 y 8. En la primera semana de estudio el valor máximo se obtuvo el día 10 de octubre con un valor de 54.2864 puntos en la escala ICCA, por el contrario, su valor mínimo se obtuvo el 13 de octubre con un valor de 18.8478 puntos. En la segunda semana de estudio, se obtuvo un valor máximo de 50.6480 puntos en la escala ICCA el día 16 de octubre, correspondiendo a un día miércoles, y el valor mínimo se obtuvo el día 20 de octubre con un valor de 17.2938 puntos en la escala ICCA. Para el caso del material PM10 el rango promedio observado osciló entre 17 a 55 puntos en la escala ICCA, lo que corresponde a un rango de saludable y regular de acuerdo a la normativa de la tabla 3.

¿Qué día se presentó la mayor concentración de contaminante de material particulado PM2.5 y PM10?

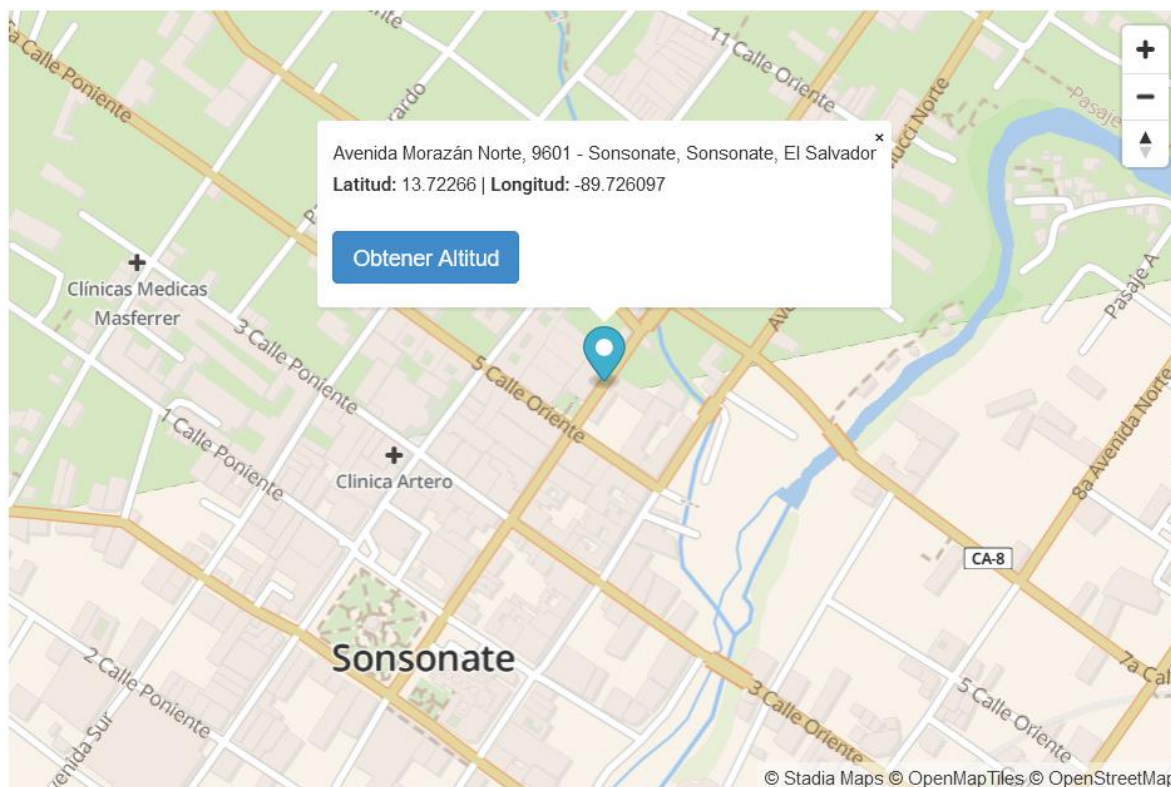
Para ambos tipos de material particulado se obtuvo el máximo valor registrado el día 10 de octubre. Para el material particulado PM 2.5 se obtuvo un valor de 515.0000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que para el material PM10 se obtuvo un valor de 527.0000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

¿Qué factores incidieron para elevar el nivel de material particulado en el día de mayor concentración?

Para ambos casos, PM2.5 y PM10 el valor máximo registrado se dio el día 10 de octubre a las 7:29:40 AM como se muestra en las figuras 28 y 54, ambas mediciones se dieron en las mismas coordenadas.

Figura 92

Ubicación geográfica de la medición con la mayor concentración de material particulado



Nota. La posición presentada corresponde a las coordenadas geográficas de latitud 13.722561 y longitud de -89.7261

Esta posición es la misma en la cual se muestra una zona de alta incidencia de concentración de material particulado en los diagramas de calor que corresponden a las figuras 89 y 90, en los mapas de calor se observa una zona con dos puntos de color rojo muy cercanos. La razón por la cual se dio un valor elevado de concentración fue a causa de un embotellamiento en el tráfico, esto debido a que en esa zona se encuentra el Colegio Santísima Trinidad, El kínder Nacional Dolores de Brito, El Centro Escolar “Fray Flaviano Mucci” y el restaurante Multisabor.

¿Por qué hay zonas con mayor concentración de material particulado que otras?

La ruta en donde se efectuó el estudio conecta la Universidad de Sonsonate, en el barrio El Ángel, con la Mega Plaza, en la colonia Sensunapán, recorre vías clave como la Avenida Fray Felipe de Jesús Moraga y la Carretera a Acajutla, áreas de significativa importancia para el tráfico vehicular, actividades comerciales y el tránsito de personas. La concentración de material particulado PM2.5 y PM10 en toda la ruta se muestra en las figuras 89 y 90.

La primera zona donde se muestra que existe abundancia de concentración es la mencionada en la pregunta anterior, donde se da mucho embotellamiento de tráfico debido a la abundancia de instituciones educativas y el restaurante Multisabor, el cual al estar ubicado en una zona altamente transitada puede amplificar la acumulación de partículas debido a la interacción entre actividades humanas y factores urbanos.

La segunda zona donde se muestra cantidades mayores de material particulado es donde se encuentra el Hospital Nacional Mazzini. La alta incidencia de concentración en esta zona se debe a que las entradas del Hospital Mazzini suelen tener un flujo constante de vehículos, incluyendo automóviles, motocicletas y ambulancias lo que suele generar un gran congestionamiento a los automovilistas que quieren ir hacia el mercado que se encuentra cerca del hospital. Así mismo, en las afueras del hospital se encuentran numerosas personas con ventas informales que suelen obstruir el paso a los vehículos que transitan en esa zona, contribuyendo de forma negativa al atascamiento.

Por ello las zonas donde existe una mayor cantidad de contaminantes se debe a que existe mayor cantidad de tráfico, obstrucción y actividad comercial.

¿Existe alguna correlación entre los niveles de material particulado PM2.5 y PM10?

Las concentraciones de PM2.5 y PM10 muestran niveles bastante similares, con pequeñas variaciones entre ambos tipos de partículas en la mayoría de los días monitoreados. Esto podría indicar que las fuentes emisoras en la ruta contribuyen proporcionalmente tanto al material particulado fino como al grueso.

¿Es saludable el aire que se respira en el municipio de Sonsonate Centro?

Durante las dos semanas de monitoreo en Sonsonate Centro, se observaron fluctuaciones significativas en los niveles de material particulado PM2.5 y PM10 a lo largo de la ruta evaluada. En ambas semanas, las concentraciones máximas de partículas alcanzaron picos elevados en ciertos días, pero tomando en cuenta el gráfico de caja y bigote mostrado en la figura 91, se puede observar que el rango típico de concentración de material particulado está entre 0 a 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que aplicando las normativas del Índice de Calidad de Aire Centroamericano mostradas en la tabla 2 y 3, se tendría que para el caso de PM2.5 el aire de forma típica está en los niveles de saludable a perjudicial, mientras que para el caso del material PM10 se encuentra en el rango de saludable a regular. El caso del material PM2.5 es de suma importancia puesto que descartando posibles valores atípicos mostraría que existe una contaminación en niveles perjudiciales para la población, por ello es muy recomendable que personas con antecedentes o enfermedades respiratorias usen algún tipo de protección respiratoria al transitar por las calles, por el contrario, el material PM10 no supone una gran amenaza ya que sus niveles suelen ser bastante inofensivos respecto a su contraparte PM2.5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los datos recolectados en el municipio de Sonsonate Centro por un periodo de dos semanas consecutivas se determina que existe un gran riesgo para las personas con antecedentes respiratorios, puesto que el Índice Centroamericano de Calidad del Aire para el material particulado PM2.5 tiene un valor promedio de 100 puntos lo que representa un valor perjudicial a la salud de este grupo de personas, por ello se recomienda que al transitar por las calles utilicen mascarillas con filtros que inhiban la cantidad de este material al momento de respirar.

Los diagramas de calor demuestran que existen zonas donde hay cantidades atípicas de material particulado en el aire, en dichas zonas se encuentran escuelas y hospitales en las cuales debido al tráfico de automóviles y actividad comercial tienen una concentración más elevada de los niveles típicos de material particulado, lo que puede afectar significativamente la salud de los pacientes internados en los hospitales y de los niños y jóvenes en las escuelas a largo plazo.

La optimización de la estación móvil para la medición de la calidad del aire mediante la integración del módulo GSM SIM800L y la visualización de datos en la plataforma Thingsboard ha demostrado ser una solución eficiente y efectiva para el monitoreo en tiempo real de la contaminación ambiental. La implementación del módulo GSM ha permitido la transmisión instantánea y continua de los datos recolectados, mejorando significativamente la capacidad de respuesta ante variaciones en la calidad del aire. Esta solución no solo ha facilitado el acceso remoto a los datos, eliminando la necesidad de presencia física en el sitio de medición, sino que también ha permitido una supervisión continua de múltiples ubicaciones.

El dashboard desarrollado en Thingsboard ha proporcionado una interfaz intuitiva y fácil de usar, permitiendo visualizar los datos en tiempo real mediante gráficos interactivos, mapas y reportes históricos. Esta visualización clara ha facilitado la interpretación de los datos y la identificación de patrones de contaminación, mientras que la configuración de alertas en tiempo real basadas en el Índice de Calidad del Aire (ICCA) ha sido crucial para una rápida intervención en situaciones críticas. Las alertas automáticas han permitido a los usuarios

tomar decisiones informadas y oportunas para mitigar los efectos negativos de la contaminación del aire.

Además, la capacidad de desplazar la estación móvil a diferentes ubicaciones estratégicas ha proporcionado una visión más completa y detallada de la calidad del aire en diversas áreas, especialmente en zonas urbanas con alta variabilidad en los niveles de contaminación. Sin embargo, se han identificado ciertas limitaciones, como la dependencia de la cobertura GSM y la precisión de los sensores de bajo costo utilizados en la estación móvil. Estas limitaciones deben ser consideradas en futuros desarrollos para mejorar la fiabilidad y exactitud de las mediciones.

El proyecto ha logrado optimizar de manera efectiva la estación móvil de medición de calidad del aire, creando una herramienta robusta para el monitoreo y la gestión ambiental. La combinación de tecnología GSM para la transmisión de datos y la potente visualización en Thingsboard ha facilitado la supervisión continua. No obstante, durante el periodo de recolección de datos se observó que la ubicación actual de la pantalla OLED SSH1106 resultaba incómoda, ya que dificultaba la visualización inmediata de los valores obtenidos por el medidor. Por lo tanto, se sugiere reubicar la pantalla en una posición que facilite al usuario la lectura de los datos en tiempo real, mejorando así la experiencia de uso del dispositivo. En particular, se recomienda colocar la pantalla OLED en la parte superior del medidor, lo que permitiría un acceso visual directo a las mediciones tan pronto como sean registradas.

Para implementar esta modificación, se propone rediseñar la disposición de los componentes internos del medidor mediante la sustitución de las dos placas actuales por una sola placa PCB, lo que no solo optimizaría el uso del espacio, sino que también proporcionaría un mayor margen de maniobra para reorganizar los elementos clave, como la pantalla OLED. Esta nueva distribución facilitaría no solo la reubicación de la pantalla en la zona sugerida, sino que también permitiría mejorar la accesibilidad general del dispositivo.

Adicionalmente, el rediseño de la placa PCB ofrecería una oportunidad para incorporar sensores adicionales que puedan ampliar la funcionalidad del medidor, permitiendo medir nuevas variables relacionadas con la calidad del aire. De esta manera, estas mejoras no solo harían más práctica y eficiente la toma de mediciones en los lugares de interés, sino que

también abrirían nuevas posibilidades de expansión y mejora continua del dispositivo, gracias al espacio adicional y la flexibilidad lograda mediante la optimización interna.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (2024, June 25). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*.
<https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- Boris Andrés Castillo Rosales, & Lyan Donovan Segovia López. (2024). *ESTUDIO DE CALIDAD DEL AIRE PRESENTE EN EL AREA METROPOLITANA Y SU ESTADO RESPECTO A LOS INDICES CENTROAMERICANOS* [Universidad de El Salvador].
<https://repositorio.ues.edu.sv/items/db4084a5-692e-4617-8065-33e3d7cbf3b4>
- Boris Andrés Castillo Rosales, Lyan Donovan Segovia López, Carlos Osmin Pocasangre Jiménez, Omar Otoniel Flores Cortez, & Fernando Arévalo. (2024, October 7). *Estudio de calidad del aire presente en el área metropolitana y su estado respecto a los índices centroamericanos*. <https://minerva.sic.ues.edu.sv/Minerva/article/view/321>
- Boris Andrés Castillo Rosales, Lyan Donovan Segovia-López, Carlos Pocasangre, Omar Otoniel Flores, & Fernando Arevalo-Navas. (2024, October 1). *Estudio de calidad del aire presente en el área metropolitana y su estado respecto a los índices centroamericanos en el contorno de la Universidad de El Salvador*.
<https://www.camjol.info/index.php/revminerva/article/view/18911/22872>
- Carlos Javier Chicojay Morales. (2022, October 26). *Cálculo de Índice de Calidad del Aire*.
<https://insivumeh.gob.gt/?p=61234>
- Dnislam Urazayev, Aida Eduard, Muhammad Ahsan, & Dimitrios Zorbas. (2023, May 1). *Indoor Performance Evaluation of ESP-NOW*.
https://www.researchgate.net/publication/369626626_Indoor_Performance_Evaluation_of_ESP-NOW
- Envira. (2020, March 9). *Principales diferencias entre emisión e inmisión*.
<https://envira.es/principales-diferencias-emision-inmision/>
- Francisco Alexander Aguilera González. (2020). *COMPARACIÓN DE LOS VALORES DEL MATERIAL PARTICULADO PM2.5 Y PM10 MEDIDOS EN FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL Y LOS ESTABLECIDOS EN LA NORMA SALVADOREÑA NSO 13.11.01:01 EN EL PERÍODO COMPRENDIDO DE MARZO A SEPTIEMBRE DE 2019* [Universidad de El Salvador].
<https://repositorio.ues.edu.sv/items/45995baf-da9e-438f-acbc-170dcc312d19>
- Jessica A. Johnson, & Alan C. Chan. (2009, March 30). *Sobre el AQI*.
https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.sica.int/busqueda/busqueda_archivo.aspx%3FArchivo%3Dodoc_72927_1_01102012.pdf&ved=2ahUKEwi5gNHAm8GJAXig4QIHqALFsQFnoECBkQAQ&usg=AOvVaw2OTrQNsEYi81u8bShf-00y

- José Francisco Chávez Cristóbal, & Lidia Salamanca. (2007, February 1). *Gestión ambiental pública: historia, estado y desafíos*.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2360697>
- Milan Loiacono. (2024, May 13). *What Is... Earth's Atmosphere?* NASA.
<https://www.nasa.gov/general/what-is-earths-atmosphere/>
- Ministerio de Medio Ambiente de El Salvador. (2018). *Resultados de Monitoreo de Material Particulado, PM2.5, en el Área Metropolitana de San Salvador*.
- Ministerio de Medio Ambiente de El Salvador. (2024, September 9). *Informe Semanal de Calidad de Aire*.
<https://www.snet.gob.sv/ver/meteorologia/monitoreo/calidad+del+aire/informe+semanal+calidad+del+aire/>
- Ministerio de Salud de El Salvador. (2002). *Emisiones atmosféricas por fuentes fijas*.
http://www.puntofocal.gob.ar/notific_otros_miembros/slv117_t.pdf
- Omar Otoniel Flores Cortez, Ronny Adalberto Cortez Reyes, & Verónica Idalia Rosa Urrutia. (2019). *Sistema telemático de monitoreo de calidad del aire en zonas remotas, utilizando técnicas IoT y big data : fase I. Estación IoT automatizada para el monitoreo de calidad del aire por contaminantes PM2.5 y Pm10* [Universidad Tecnológica de El Salvador].
<http://biblioteca.utec.edu.sv:8080/jspui/handle/11298/1144>
- Ortiz Moreano Erika Paulina, & Tigsy Jiménez Víctor Alfonso. (2020). *“DETERMINACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO SEDIMENTABLE Y VOLÁTIL EN EL BARRIO LOS PINOS CANTÓN RIOBAMBA POR INCIDENCIA INDUSTRIAL”* [Universidad Nacional de Chimborazo].
<http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/6473/1/DETERMINACION%20Y%20CARACTERIZACION%20DE%20CONCENTRACIONES%20DE%20MATERIAL%20PARTICULADO%20SEDIMENTABLE%20Y%20VOLATIL%20DEL%20BARRIO%20LOS%20PINOS%20CANTON%20RIOBAMBA%20POR%20INCIDENCIA%20INDUSTRIAL.pdf>
- Ricardo Alberto León López, David Antonio Peña Martínez, & Oscar Eduardo Pérez Rafael. (2023). *MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE AMBIENTAL EN MARCO DE PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES DENTRO DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR* [Universidad de El Salvador].
<https://oldri.ues.edu.sv/id/eprint/31292/>
- SIMcom. (2013, August 20). *SIM800L Hardware Design VI*.
https://www.makerhero.com/img/files/download/Datasheet_SIM800L.pdf
- Sistema de la Integración Centroamericana. (2009, March 30). *Proyecto Aire Puro Guia Centroamericana Calidad del Aire*.

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.sica.int/busqueda/busqueda_archivo.aspx%3FArchivo%3Dlibr_9426_1_19062006.pdf&ved=2ahUKEwi5gNHAm8GJAXig4QIHaqALFsQFnoECB4QAQ&usg=AOvVaw3BS4A11uYJbTpNPPmVm6eJ

ANEXOS

Presupuesto:

Tabla 9

Presupuesto de la estación móvil para la medición de calidad del aire 3.5.

ELEMENTO	PRECIO (USD)	LUGAR DE COMPRA
ESP32 WROOM	7.50	UTEC
SENSOR PMS5003ST	32.57	ALIEXPRESS
RTC	5.00	UTEC
POWEBANK MI	33.99	XIAOMI
PLACA DE CIRCUITO	20.00	UDB
GABINETE PARA CIRCUITO	8.00	STEREN
PINES Y CONDUCTORES	6.00	CASA RIVAS
MODULO GPS	15.00	ARDUINO STORE
BOTONES Y SWITCHS	5.00	ARDUINO STORE
LEDS	1.50	CASA RIVAS
PANTALLA OLED	10.00	ARDUINO STORE
LECTOR SD	6.00	ARDUINO STORE
MODULO GSM SIM800L	9.00	ARDUINO STORE
ESP32 WROOM	22.00	CASA RIVAS
BATERIA 18650	6.99	STEREN
POWEBANK	14.99	STEREN
TOTAL	203.54	

Nota. La tabla muestra los materiales que componen la versión 3.5 del medidor junto a los precios y lugares de venta.