

**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES  
DE CHIAPAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA.**

**PROGRAMA EDUCATIVO DE INGENIERÍA AMBIENTAL.**

**TESIS**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SENSOR ADAPTADO A  
UN DRON PARA LA DETERMINACIÓN DE  
PARTÍCULAS SUSPENDIDAS EN EL AIRE (PM<sub>2.5</sub>).**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO AMBIENTAL**

PRESENTA:

**JHOSTIN ENRIQUE HERNÁNDEZ VÁZQUEZ.**

**JULIAN SANTOS TORIJA.**

DIRECTOR:

**DR. RUBÉN ALEJANDRO VÁZQUEZ SÁNCHEZ.**

CODIRECTORES.

**MTRO. ULISES GONZÁLES VÁZQUEZ**

**DR. JOSÉ MANUEL GÓMEZ RAMOS.**



Tuxtla Gutiérrez.

Agosto, 2025.



**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**  
**SECRETARÍA GENERAL**  
**DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES**  
**DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR**  
**AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN**

Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas  
Fecha: 26 de agosto de 2025

C. Jhostin Enrique Hernández Vázquez

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniería Ambiental

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:

Implementación de un sensor adaptado a un dron para la determinación de partículas suspendidas

en el aire (PM<sub>2.5</sub>)

En la modalidad de: Tesis Profesional

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

**Revisores**

Dr. José Manuel Gómez Ramos

Mtro. Ulises González Vázquez

Dr. Rubén Alejandro Vázquez Sánchez

**Firmas:**

[Firma]  
[Firma]  
[Firma]

Cop. Expediente



**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS**  
**SECRETARÍA GENERAL**  
**DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES**  
**DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR**  
**AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN**

Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas  
Fecha: 26 de agosto de 2025

C. Julian Santos Torija

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniería Ambiental

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:  
Implementación de un sensor adaptado a un dron para la determinación de partículas suspendidas

en el aire (PM<sub>2.5</sub>)

En la modalidad de: Tesis Profesional

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

**Revisores**

Dr. José Manuel Gómez Ramos

Mtro. Ulises González Vázquez

Dr. Rubén Alejandro Vázquez Sánchez

**Firmas:**

[Firma]  
[Firma]  
[Firma]

Ccp. Expediente



## INDICE GENERAL

I.- INTRODUCCIÓN.....	9
II.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
III.- JUSTIFICACIÓN. ....	11
IV.- OBJETIVOS.....	13
V.- HIPÓTESIS.....	13
VI.- ANTECEDENTES.....	14
VII.- MARCO TEÓRICO. ....	16
7.1. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....	16
7.1.2. MATERIAL PARTICULADO. ....	17
7.1.3. CONTAMINACIÓN EN ZONAS URBANAS.....	18
7.1.4. NOM-172-SEMARNAT-2023.....	19
7.1.5. TECNOLOGÍAS DE MONITOREO.....	20
VIII.- MARCO METODOLÓGICO.....	22
8.1. ÁREA DE ESTUDIO. ....	23
8.1.2. SELECCIÓN DE PUNTOS DE MONITOREO.....	23
8.1.3. TEMPORADAS DE MEDICIÓN.....	25
8.1.4. EQUIPOS UTILIZADOS.....	26
8.1.5. PRUEBA PILOTO DEL SENSOR. ....	30
8.1.6. PRUEBA PILOTO DEL DRON.....	31
8.1.7. DISEÑO DE LA CARCASA. ....	32
8.1.8. ENSAMBLE DE LOS EQUIPOS.....	33
8.1.9. PROGRAMACIÓN DEL EQUIPO.....	34
8.1.10. PRINCIPIO DE DISPERSIÓN LASER. ....	36
IX.- RESULTADOS.....	38
9.1. PRUEBA PILOTO DEL SENSOR. ....	40
9.1.1. VUELOS DE PRUEBA.....	41
9.1.2. COMPARACIÓN ESTACIÓN CENTRO, SENSOR PMS5003.....	42
9.1.3. MONITOREO DE LOS CINCO PUNTOS ESTRATÉGICOS.....	43
9.1.4. CARACTERÍSTICAS POR PUNTO DE MUESTREO Y SU RELACIÓN CON LA CONCENTRACIÓN DE (PM <sub>2.5</sub> ). ....	45
9.1.5. TEMPERATURA SOBRE LAS CONCENTRACIONES DE PM <sub>2.5</sub> .....	47
9.1.6. PRECIPITACIÓN PLUVIAL SOBRE LAS CONCENTRACIONES DE PM <sub>2.5</sub> .....	50

9.1.7. PRESIÓN BAROMÉTRICA SOBRE LAS CONCENTRACIONES DE PM <sub>2.5</sub> . .....	52
9.1.8. DIRECCIÓN DEL VIENTO Y VELOCIDAD DEL VIENTO SOBRE LAS CONCENTRACIONES DE PM <sub>2.5</sub> . .....	53
9.1.9. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PM <sub>2.5</sub> EN LA ZONA URBANA DE TUXTLA GUTIÉRREZ. ....	57
X.- DISCUSIONES.....	59
XI.- CONCLUSIONES. ....	60
XII.- REFERENCIAS. ....	61
XIII.- ANEXOS.....	64

#### INDICE DE FIGURAS.

FIGURA 1. ÁREA DE ESTUDIO. ....	23
FIGURA 2. DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO. ....	24
FIGURA 3. ARDUINO UNO, COMPONENTES PRINCIPALES .....	26
FIGURA 4. SENSOR MODELO PMS5003 .....	27
FIGURA 5. MODULO LECTOR DE TARJETA SD. ....	28
FIGURA 6. DRON DJI MAVIC PRO. ....	29
FIGURA 7. PREPARACIÓN DE CAJA PRUEBA. ....	30
FIGURA 8. PRUEBA DEL SENSOR EN AMBIENTE CONTROLADO. ....	30
FIGURA 9. PRUEBA DEL SENSOR EN AMBIENTE CONTROLADO. ....	30
FIGURA 10. PRUEBA DEL SENSOR CON MATERIAL PARTICULADO. ....	31
FIGURA 11. COMPORTAMIENTO DE VUELO DEL DRON. ....	31
FIGURA 12. DISEÑO DE LA CARCASA.....	32
FIGURA 13. DISEÑO DE LA CARCASA.....	33
FIGURA 14. IMPRESIÓN DE LA CARCASA.....	33
FIGURA 15. DIAGRAMA DE CONEXIONES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS. ....	34
FIGURA 16. DIAGRAMA DE BLOQUES FUNCIONAL DEL SENSOR, (MANUAL DE DATOS .....	37
FIGURA 17. PESADO DEL SISTEMA.....	38
FIGURA 18. PESADO DEL SISTEMA.....	39

## **INDICE DE GRAFICAS.**

<b>GRAFICA 1. COMPARACIÓN DE AUSENCIA Y PRESENCIA DE HUMO.....</b>	<b>40</b>
<b>GRAFICA 2. PRIMEROS RESULTADOS EN VUELOS DE PRUEBAS.....</b>	<b>41</b>
<b>GRAFICA 3. COMPARACIÓN DE LA ESTACIÓN CENTRO, SENSOR PM. ....</b>	<b>42</b>
<b>GRAFICA 4. TEMPERATURA POR HORA. ....</b>	<b>47</b>
<b>GRAFICA 5. RADIACIÓN SOLAR POR HORA.....</b>	<b>48</b>
<b>GRAFICA 6. RELACIÓN ENTRE TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN PM2.5.....</b>	<b>49</b>
<b>GRAFICA 7. PRECIPITACIÓN PLUVIAL POR HORA. ....</b>	<b>50</b>
<b>GRAFICA 8. PRESIÓN BAROMÉTRICA POR HORA.....</b>	<b>52</b>
<b>GRAFICA 9. DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DEL VIENTO. ....</b>	<b>54</b>
<b>GRAFICA 10. VELOCIDAD DEL VIENTO POR HORA. ....</b>	<b>55</b>
<b>GRAFICA 11. DIRECCIÓN DEL VIENTO POR HORA. ....</b>	<b>56</b>

## **INDICE DE TABLAS.**

<b>TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR.....</b>	<b>27</b>
<b>TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DEL DRON. ....</b>	<b>29</b>
<b>TABLA 3. CONCENTRACIÓN DE PM2.5 POR PUNTO DE MUESTREO Y HORA. ....</b>	<b>43</b>
<b>TABLA 4. TEMPERATURA EN LOS DISTINTOS HORARIOS DE MUESTREO.....</b>	<b>48</b>

## **AGRADECIMIENTO.**

Este trabajo no habría sido posible sin el amor, la entrega y el acompañamiento constante de las personas que han marcado mi vida de manera profunda. Más allá de los conocimientos adquiridos, este logro representa también el fruto de vínculos familiares que me han sostenido, inspirado y formado desde el inicio.

A mi madre Verónica, le dedico estas líneas con todo el reconocimiento que merece. Su apoyo durante estos años ha sido determinante, no solo por su presencia constante, sino por la confianza que depositó en mí incluso cuando las circunstancias eran complejas. Ella, con una fuerza admirable, enfrentó los retos sola, sin quejarse, y aun así encontró la manera de estar a mi lado, de impulsarme, de recordarme que el amor verdadero se manifiesta en los actos más silenciosos y firmes. Su capacidad de sacrificio, su fe en mi capacidad y su manera de sostenerme emocionalmente han sido pilares fundamentales en este proceso. Gracias por enseñarme que la perseverancia nace del amor y que la educación no es solo un camino académico, sino también un acto de dignidad y resistencia.

A mi abuela Juana, mi raíz emocional, su crianza ha dejado huellas imborrables en mi forma de ver el mundo. Con paciencia infinita, con palabras llenas de sentido y con gestos que hablan más que cualquier discurso, me ha enseñado a valorar lo esencial, a caminar con respeto y a escuchar con el corazón. Sus consejos, muchas veces sencillos, pero profundamente sabios, han sido guía en momentos de duda. Gracias por tu amor generoso, por tu presencia constante, por tu forma de cuidar sin condiciones. Tu legado vive en mí, y este logro también te pertenece.

A mis hermanos Jonathan y Joshua, compañeros de vida, testigos de mis esfuerzos y cómplices de mis sueños. Ser el mayor ha sido una responsabilidad que he asumido con convicción, sabiendo que cada paso que doy puede ser ejemplo para ellos. Su presencia ha sido fuente de motivación, de equilibrio y de alegría. Gracias por estar ahí siempre, por confiar en mí, por seguirme con respeto y cariño. Cada conversación, cada gesto de apoyo, cada momento compartido ha reforzado mi compromiso de avanzar con integridad y de abrir camino con firmeza.

## **DEDICATORIA.**

### **Familia.**

Dedico este trabajo a mi familia, por el acompañamiento que ha sido mi mayor fortaleza a lo largo de este camino, por su presencia constante, por sus palabras de aliento y por el respaldo incondicional que me han ofrecido en cada etapa de mi vida.

Gracias por enseñarme que el verdadero apoyo no siempre se expresa en grandes gestos, sino en el amor que se manifiesta incluso en los momentos más difíciles. Este logro no es solo académico: es también el reflejo de una historia familiar forjada con paciencia, sacrificio y esperanza.

A ustedes, que han creído en mí cuando yo mismo dudaba, que han celebrado mis avances y que han sostenido mi ánimo en los momentos de incertidumbre, les dedico con profundo respeto y cariño cada página de este trabajo. Porque detrás de cada esfuerzo individual hay una red de afectos que lo hace posible, y la mía ha sido, sin duda, mi mayor privilegio.

### **Profesores.**

A mis profesores, Dr. Rubén Alejandro Vázquez Sánchez, Mtro. Ulises González Vázquez, Dr. José Manuel Gómez Ramos, por haber sembrado en mí el valor del conocimiento, la disciplina intelectual y el respeto por el método. Cada clase, cada retroalimentación y cada conversación han contribuido a formar no solo mi perfil académico, sino también mi visión ética y profesional. Gracias por compartir su experiencia, por exigir con justicia y por inspirar con vocación.

*JHOSTIN ENRIQUE HERNÁNDEZ VÁZQUEZ.*

## **AGRADECIMIENTO.**

A mis padres, Jorge y Lilian, quienes con su ejemplo de esfuerzo y constancia me enseñaron a valorar el trabajo, la disciplina y el compromiso. Gracias por su amor incondicional, por creer en mí en cada etapa y por brindarme siempre la fortaleza necesaria para alcanzar mis metas. Este logro es también de ustedes, pues sin su apoyo nada de esto habría sido posible.

A mis hermanos, Jorge y Angélica, por ser parte fundamental de mi vida, por acompañarme con su cariño y por darme la motivación para continuar incluso en los momentos más difíciles. Cada palabra de aliento, cada gesto de apoyo y cada instante compartido me han recordado que la familia es la mayor fuente de inspiración y fuerza.

A mis profesores, Dr. Rubén Alejandro Vázquez Sánchez, Mtro. Ulises González Vázquez, Dr. José Manuel Gómez Ramos, por su paciencia, dedicación y apoyo durante todo este camino. Gracias por compartir sus conocimientos, por orientarme cuando lo necesitaba y por motivarme a dar siempre lo mejor. Cada consejo y enseñanza ha sido una guía importante que me ha ayudado a crecer tanto personal como profesionalmente.

## **DEDICATORIA.**

Dedico este trabajo a mis padres, cuyo ejemplo de esfuerzo, dedicación y perseverancia ha sido un faro que ha guiado mi formación personal y académica. Su amor incondicional, confianza y apoyo constante constituyen la base sobre la que he construido mis logros y aspiraciones.

A mis hermanos, por su compañía, estímulo y motivación constante, quienes con su aliento hicieron más llevadero cada desafío enfrentado durante este proceso académico y personal.

A mi familia en general, por su respaldo, comprensión y confianza, elementos fundamentales que me permitieron mantener la determinación y el compromiso necesarios para culminar esta etapa de mi formación profesional.

Finalmente, a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la realización de este trabajo, por su apoyo, orientación y confianza, que hicieron posible la consecución de este logro académico.

*JULIAN SANTOS TORIJA.*

## I.- INTRODUCCIÓN.

Los desarrollos recientes en los ámbitos de sensorización y tecnologías computacionales, incluyendo el auge del Internet de las cosas (IoT) y la disponibilidad de hardware accesible y de bajo costo, han creado la posibilidad de establecer plataformas de sensorización a precios razonables (CONAMA, 2020). Los sensores de partículas finas se emplean de manera extensiva en dispositivos de medición de partículas, electrodomésticos inteligentes, monitoreo del aire interior y exterior, así como en la evaluación de salas limpias. Según la literatura, estos sensores tienen una amplia gama de aplicaciones (Le *et al.*, 2018). La mayoría de estos sensores utilizan la dispersión óptica de la luz con láser y aplican la teoría de Mie para analizar la luz dispersa y así determinar el tamaño de las partículas. Este método permite medir partículas de distintos tamaños, como PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> (Hahn, 2009).

Arduino es una Plataforma de Hardware y software de Código abierto y fácil de utilizar. Cuenta con una placa que incluye un microcontrolador de la marca Atmel y con toda la circuitería de soporte, incluye reguladores de tensión, un puerto USB (En los últimos modelos, aunque el original utilizaba un puerto serie) conectado a un módulo adaptador USB-Serie que permite programar el microcontrolador desde cualquier PC de manera cómoda y también hacer pruebas de comunicación con el propio chip. Arduino se integra de sensores, actuadores y la placa de expansión. Usa Código abierto (open source y open hardware), está permitida la fabricación o ensamblaje de las placas Arduino y la distribución del software por cualquier individuo (De ahí la variación de precios y modelos). Muchas empresas y usuarios las fabrican con solo comprar los componentes (UAEH,2022).

Las partículas suspendidas totales presentan una distribución de tamaños que van desde 0.005 hasta 100µm, aunque la mayoría tienen un tamaño a 40 micras, pueden tener su origen en fuentes naturales como las sales marinas, la erosión y resuspensión del suelo, incendios naturales, actividad volcánica y material biológico, o bien provenir de fuentes antropogénicas, entre ellas, la quema de biomasa, combustión incompleta de combustibles fósiles, polvo, fugitivos de caminos pavimentados y no pavimentados, actividades agrícolas, de construcción, procesos industriales y procesos metalúrgicos (Manzanares *et al.*, 2011; Poschl, 2005).

## II.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La degradación de la calidad del aire es consecuencia de fenómenos complejos que surgen de una amplia gama de causas y efectos interrelacionados. No obstante, las principales fuentes de contaminación se deben al tráfico vehicular, la quema de basura, actividades industriales y agrícolas. La alta concentración de PM<sub>2.5</sub> afecta la salud de los residentes, especialmente de los grupos vulnerables como niños, ancianos y personas con enfermedades preexistente (López y Pérez, 2014).

La contaminación del aire es un desafío significativo para la salud pública a nivel global, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), en 2012 se registraron alrededor de 7 millones de muertes en todo el mundo atribuidas a la exposición a altos niveles de contaminantes atmosféricos, este alarmante dato resalta la gravedad del problema y la necesidad urgente de abordar las fuentes de contaminación. Se considera que las partículas en específico menor a 2.5 micrómetros, son las más nocivas, ya que pueden penetrar directamente a los alveolos. Afecta principalmente el sistema respiratorio y cardiovascular, incrementando el riesgo de una embolia o infarto, o bien provocando la aceleración de la aterosclerosis (endurecimiento de las arterias) cuando hay una exposición extrema este contaminante (Manzanares *et al.*, 2011).

Sin embargo, abordar esta problemática de manera efectiva requiere contar con información precisa y representativa sobre la calidad del aire. En este sentido, las técnicas tradicionales de monitoreo de la calidad del aire son limitados en cobertura espacial y temporal, lo que dificulta la detección de variaciones locales, identificación de focos críticos de contaminación y el seguimiento continuo de eventos contaminantes (Solorzano-Plaza, 2017).

Además, la instalación y mantenimiento de estaciones automáticas de monitoreo representan una inversión considerable, lo que ha llevado a que muchos países en desarrollo y estados con alta densidad poblacional no cuenten con una red suficiente para cubrir sus territorios. Esta situación genera una brecha en la vigilancia ambiental, especialmente en zonas marginadas o de rápido crecimiento urbano, donde los efectos de la contaminación pueden ser más severos, pero menos documentados.

Esta problemática se refleja claramente en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, donde solo cuenta con una sola unidad automática, ubicada en el techo del Palacio Municipal, el equipo instalado es el monitor continuo de partículas Termo Scientific Modelo 5014i Beta, además del Datalogger Agilaire modelo 8872, un hardware para recopilar los datos arrojados por el equipo, dicha máquina que cuesta un aproximado de 6 millones de pesos, de acuerdo con los especialistas (Domínguez, 2020).

### **III.- JUSTIFICACIÓN.**

Tuxtla Gutiérrez, siendo la capital y la ciudad más grande del estado de Chiapas, enfrenta desafíos significativos relacionados con la calidad del aire debido al tráfico vehicular, actividades industriales y la topografía de la región.

Los contaminantes emitidos provienen de diferentes fuentes distribuidas sobre el área geográfica. Cualquier sitio dado dentro del área urbana recibe contaminantes en cantidades variables procedentes de las diversas fuentes, dependiendo de los vientos existentes, la presencia de edificios altos y de factores como la temperatura y la humedad; aunado a ello durante la temporada de estiaje se identifican algunos sitios con mayores concentraciones de contaminantes que en otras épocas del año. Además, los factores meteorológicos ejercen una influencia, en la manera en que se encuentran en él, el calor en forma de radiación solar, al actuar en las capas superiores de la atmosfera recargada de contaminantes, impide las corrientes verticales y contribuye a formar tanto el neblumo fotoquímico en la zona, así también las condiciones en las que se encuentra la zona, en lo que respecta a calles con problemas de pavimentación y construcciones aledañas.

Para realizar el monitoreo meteorológico se emplean diversos equipos e instrumentos especializados como estaciones meteorológicas fijas, radiosondas, sistemas SODAR, así como globos cautivos, que suelen ser costosos o de difícil manejo, por otro lado, actualmente el avance tecnológico genera alternativas de nuevos instrumentos de medición que brindan soluciones prácticas, rápidas y eficaces como los sensores programables de bajo costo.

Dentro de los últimos años ha incrementado el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para la toma de muestras y monitoreo de los contaminantes esparcidos por la atmosfera, la implementación de tecnologías para el monitoreo de partículas suspendidas se justifica por su capacidad para monitorear los contaminantes del aire. Los drones ofrecen movilidad, flexibilidad y una cobertura amplia, lo que supera las limitaciones de las estaciones fijas, es esencial desarrollar métodos eficientes para el monitoreo de la calidad del aire, con el uso de drones equipados con sensores de poco peso que se pueden acoplar fácilmente a una placa electrónica en miniatura. Con la disminución en peso y volumen que supone el uso de este tipo de instrumentos de medición, el dron puede sondear grandes volúmenes de aire durante algunos períodos de tiempo, sin utilizar equipos altamente costosos (Eslava-Pedraza, 2020).

La integración de drones para el monitoreo de la calidad del aire parece cada vez más probable equipados con sensores, estos drones pueden recopilar datos en tiempo real, que se integran fácilmente en la

infraestructura urbana y los sistemas de toma de decisiones. Esta integración facilita aún más acciones rápidas, como optimizar el flujo de tráfico, ajustar las operaciones industriales o notificar a los residentes sobre picos de contaminación. Mediante el uso de estas tecnologías avanzadas, las ciudades pueden abordar de manera proactiva las preocupaciones sobre la calidad del aire y garantizar un entorno más saludable para sus ciudadanos, gracias a los vehículos aéreos no tripulados es posible monitorear casi cualquier entorno, desde grandes ciudades hasta zonas de peligro donde se pudiera dificultar el acceso al ser humano (Mazeh, 2018).

#### **IV.- OBJETIVOS.**

Objetivo general.

Implementar un sistema de monitoreo aéreo utilizando un dron equipado con un sensor, para la medición en tiempo real de las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , en el área urbana de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Objetivos específicos.

1. Calibrar un sensor para la detección de partículas  $PM_{2.5}$ , asegurando su precisión y fiabilidad, utilizando una tarjeta de tipo Arduino UNO.
2. Integrar el sensor en un dron, optimizando su funcionamiento para realizar vuelos de prueba en cinco puntos estratégicos en la ciudad, para la recolección de datos.
2. Comparar los resultados obtenidos con los datos de estaciones de monitoreo fijas, para evaluar la efectividad del sistema de monitoreo móvil.

#### **V.- HIPÓTESIS.**

El uso de drones equipados con sensores avanzados para el monitoreo de partículas suspendidas en el aire en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, permite obtener datos más precisos y detallados sobre la concentración y distribución temporal y espacial de dichas partículas en comparación con los métodos tradicionales.

## **VI.-ANTECEDENTES.**

Carlos Alexis Bonillas Granados, Alba Yajaira Sánchez Delgado. “Niveles de concentración por  $pm_{2.5}$  mediante sensores de bajo costo, caso de estudio, Pamplona, Colombia” (2023).

El estudio se centra en la medición de los niveles de  $PM_{2.5}$  en Pamplona, Colombia, utilizando sensores de bajo costo (modelo SENSIRION SPS30) ante la ausencia de una estación de monitoreo oficial. La investigación se realizó de julio a septiembre de 2022, siguiendo pautas de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. Los resultados indican que, aunque las concentraciones promedio de  $PM_{2.5}$  se mantuvieron por debajo del límite máximo permitido ( $37 \mu g/m^3$ ), se observaron picos significativos durante días festivos, alcanzando niveles cercanos al umbral recomendado por la OMS ( $15 \mu g/m^3$ ).

Además, el análisis espacial reveló que las mayores concentraciones se concentran en el norte de la ciudad, correlacionándose con áreas de alta densidad de tráfico y centros educativos. Este estudio es crucial para establecer un registro de la calidad del aire en Pamplona, proporcionando datos accesibles al público que pueden informar políticas de gestión ambiental. La utilización de sensores de bajo costo representa una estrategia efectiva para monitorear la contaminación en áreas donde no hay infraestructura oficial, promoviendo la sensibilización sobre la calidad del aire y la salud pública.

Pablo Juan Verdoy, Sergio Trilles Oliver, Sergi Meseguer Costa, Laura Serra Saurina. “Estudio de la fiabilidad de un sensor de partículas de bajo costo” (2020).

El estudio de la fiabilidad del sensor de bajo costo para medir partículas en suspensión ( $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ ) es crucial para mejorar la gestión de la calidad del aire. Con el creciente uso de sensores de bajo costo, la capacidad de monitorizar la calidad del aire en tiempo real se ha incrementado, permitiendo alertar a la población sobre episodios de alta contaminación de manera eficiente.

El uso de diversas metodologías estadísticas permite una evaluación rigurosa de la fiabilidad del sensor, lo que proporciona confianza en su implementación para el monitoreo ambiental. La integración del sensor en una plataforma del Internet de las Cosas también facilita la recopilación de datos en tiempo real, mejorando la capacidad de respuesta ante problemas de calidad del aire. En resumen, este estudio no solo valida el HM-3301, sino que también subraya la importancia de tecnologías accesibles y precisas para la gestión ambiental efectiva.

Jeissy Lady Shalom Miranda Casapia, milagros Herrera Reja. “Evaluación de la concentración de polvo atmosférico sedimentable y material particulado ( $pm_{2.5}$ ,  $pm_{10}$ ) para la gestión de la calidad del aire 2017, en la ciudad de Tacna” (2017).

Este estudio cobra una gran relevancia debido a que pone en evidencia un grave problema de contaminación atmosférica en la ciudad de Tacna, donde se ha registrado la presencia de partículas sedimentables en concentraciones que superan los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). El promedio obtenido de  $1.07 \text{ mg/cm}^2/\text{mes}$  supera significativamente los valores guía de la OMS, fijados en  $0.50 \text{ mg/cm}^2/\text{mes}$ , lo que refleja un panorama preocupante sobre la calidad del aire en la ciudad. Las partículas sedimentables, que consisten en polvo y otros contaminantes en suspensión, tienen el potencial de generar efectos adversos sobre la salud pública y el medio ambiente. La exposición prolongada a niveles elevados de este tipo de partículas puede contribuir a la aparición de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y afectar negativamente la calidad de vida de los habitantes.

## **VII.- MARCO TEÓRICO.**

### **7.1. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.**

Se entiende por contaminación atmosférica a la presencia en la atmósfera de sustancias en una cantidad que implique molestias o riesgo para la salud de las personas y de los demás seres vivos, vienen de cualquier naturaleza, así como que puedan atacar a distintos materiales, reducir la visibilidad o producir olores desagradables. El nombre de la contaminación atmosférica se aplica por lo general, a las alteraciones que tienen efectos perniciosos en los seres vivos y los elementos materiales y no a otras alteraciones inocuas (Martínez *et al.*, 2012).

Atendiendo su origen, las fuentes de contaminación del aire se pueden agrupar en dos tipos: naturales que comprenden las emisiones de contaminantes generados por la actividad natural de la geosfera, la biosfera, la atmosfera. Así, las erupciones volcánicas, una de las principales causas de contaminación, aportan a la atmosfera una gran cantidad de partículas que se diseminan por ella como consecuencia de la acción del viento. Por otro lado, los incendios forestales que producen de forma natural y que llegan a emitir altas concentraciones de humo, polvo y cenizas. Las antropogénicas son consecuencias de la presencia y actividades del ser humano, la mayor parte de la contaminación procede de la utilización de combustibles fósiles. El problema de la contaminación atmosférica se asocia principalmente a la causa de las actividades humanas, generadoras de contaminación que destacan en el hogar, el uso de calefacciones y otros aparatos domésticos que emplean, como fuentes de generación de calor, combustibles de origen fósil (carbón, gasóleo, gas natural). El mayor o menor grado de contaminación se debe al tipo de combustible utilizado (el carbón es más contaminante que el gas), así como el diseño y estado de conservación de los aparatos empleados. En el transporte, el automóvil y el avión ocasionan un mayor grado de contaminación, el grado de contaminación provocada dependerá de la clase de combustible utilizado, del tipo de motor y de la densidad del tráfico. En la industria, el aporte de contaminación al aire depende del tipo de actividad, siendo las cementeras, las siderometalúrgicas, las papeleras las más contaminantes (Cunningham, 2023).

La composición química del aire se mantiene prácticamente constante debido a los procesos biogeoquímicos y a las transformaciones químicas en los que se integran sus componentes, los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre especialmente. Estos ciclos se autorregulan mediante diferentes mecanismos, pero las actividades humanas los aceleran, rompen su equilibrio y movilizan las reservas, ocasionando la presencia en la atmosfera de los contaminantes del aire (Cunningham, 2023).

### 7.1.2. MATERIAL PARTICULADO.

La materia particulada (PM, por sus siglas en inglés) presente en la atmósfera, es un conjunto de sustancias en estado sólido y líquido, que se encuentra suspendida en el aire o bien, que se depositan en la superficie muy lentamente cuando éstas alcanzan un diámetro mayor. Algunos ejemplos de materia particulada son el hollín, los aerosoles, la arena, el polvo, etc. (Gallego *et al.*, 2012). Las partículas suspendidas totales presentan una distribución de tamaños que van desde 0.005 hasta 100  $\mu\text{m}$ , aunque la mayoría tienen un tamaño menor a 40 micras. Desde el punto de vista epidemiológico, aquellas partículas con diámetros menores a 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) conforman la fracción inhalable, la cual se divide en fracción gruesa (diámetros entre 2.5 y 10  $\mu\text{m}$ ), fina (diámetros menores a 2.5  $\mu\text{m}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ) y ultrafina (diámetros menores a 1  $\mu\text{m}$ ) (González-Santiago *et al.*, 2011).

Con respecto a las fuentes de emisión, las partículas primarias de  $\text{PM}_{2.5}$  pueden tener su origen en fuentes naturales como las sales marinas, la erosión y resuspensión del suelo, incendios naturales, actividad volcánica y material biológico (fragmentos de plantas, microorganismos, polen, etc.). o bien provenir de fuentes antropogénicas, entre ellas, la quema de biomasa, combustión incompleta de combustibles fósiles, polvos fugitivos de caminos pavimentados y no pavimentados, actividades agrícolas, de construcción, procesos industriales, procesos metalúrgicos, etc. (Manzanares *et al.*, 2011).

Por otro lado, las partículas secundarias pueden generarse a través de los procesos de formación que incluyen la condensación de gases de baja presión de vapor en la superficie de las partículas existentes, la coagulación de partículas pequeñas, reacción de gases en o sobre las partículas, evaporación de neblina y gotas de agua en las que los gases se han disuelto y reaccionado [16]. Una vez liberadas al ambiente, las  $\text{PM}_{2.5}$  pueden ser transportadas desde cientos a miles de kilómetros de la fuente de emisión y permanecer en la atmósfera durante días a semanas, hasta que sean removidas por deposición seca o húmeda. La deposición seca se produce cuando las partículas transportadas por el viento inciden sobre una superficie y se depositan sobre ella. En cuanto a la deposición húmeda, la precipitación recoge las partículas de la atmósfera y las transporta hasta la superficie terrestre, o bien, con la incorporación de partículas atmosféricas y gases en las gotas que forman las nubes y con la subsecuente remoción de la atmósfera como lluvia o nieve (Manzanares *et al.*, 2011).

La composición química de las partículas es muy diversa y depende, principalmente de la fuente emisora y del mecanismo de formación de las partículas. En términos generales se divide en fracción orgánica e inorgánica. La fracción orgánica contiene cientos o miles de compuestos dentro de los que se encuentran

el carbono elemental, carbón orgánico (que comprende los compuestos orgánicos tanto primarios como secundarios que son resultado de la oxidación de los compuestos orgánicos volátiles) y material biológico que incluye endotoxinas, bacterias, esporas, alérgenos y polen. La fracción inorgánica se compone principalmente de sulfatos, amonio, nitratos, metales de transición y metales térreos (Badillo, 2012).

### **7.1.3. CONTAMINACIÓN EN ZONAS URBANAS.**

El avance de la urbanización como fenómeno global se relaciona con mayores niveles de bienestar y productividad, aunque también se asocia al deterioro medioambiental. El funcionamiento de las grandes ciudades demanda una enorme cantidad de recursos materiales y energéticos. Éstos, a través del proceso metabólico social, se transforman en residuos que contaminan tierra, agua y aire (IPCC, 2014).

El tránsito vehicular, la actividad industrial, la incineración de desechos sólidos y la quema de combustibles de uso residencial son los principales responsables de la contaminación del aire (ONU, 2018). Las ciudades producen el 75% de emisiones a la atmósfera, y en el 97% de los centros urbanos de países con ingresos medios y bajos se respira aire contaminado. En la dinámica demográfica, el 55% de la población mundial reside en áreas urbanas y se espera que esa proporción se eleve a 68% para el año 2050, principalmente en los países en desarrollo. Esto potencialmente agravará los problemas ambientales de los países en desarrollo, como México, en donde la urbanización produce ciudades extensas y dispersas, con infraestructuras saturadas y deficientes (ONU, 2019).

La contaminación del aire en las ciudades es un problema de salud pública, ya que existe una correlación entre el volumen de material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) y las enfermedades en el sistema nervioso, los padecimientos cardíacos, el cáncer de pulmón y las enfermedades respiratorias crónicas (Kampa y Castanas, 2008), lo cual incrementa los gastos de salud y disminuye la productividad laboral por el deterioro en la salud de la fuerza de trabajo, llegando a ocasionar 4.2 millones de muertes prematuras en el mundo al año (OCDE, 2016).

En México, la contaminación del aire en las ciudades es un problema grave debido a que hasta el 43% de la población es urbana y se concentra en zonas metropolitanas, con el 84.5% de la población urbana del país residiendo en 74 zonas metropolitanas a lo largo del territorio nacional (SEDATU-SEGOB, 2018). Las principales ciudades del país agrupadas en áreas metropolitanas mantienen concentraciones en niveles tóxicos de al menos uno de los contaminantes atmosféricos (monóxido de carbono (CO), material particulado de 10 y 2.5 micrómetros ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) y ozono ( $CO_3$ ) (INECC, 2020).

La relación entre urbanización y contaminación ha recibido particular atención recientemente, debido al notorio incremento de urbanización de la población en las últimas décadas (Liang *et al.*, 2019). La contaminación se presenta entonces como un reto complejo, puesto que las ciudades demandan una enorme cantidad de recursos naturales y energéticos para sostener su funcionamiento por la concentración de la industria. A su vez, este fenómeno retroalimenta el crecimiento de la producción y el consumo que elevan la demanda de energía en viviendas y transporte, y con ello, la consecuente emisión de contaminantes (Cheng, 2016).

#### **7.1.4. NOM-172-SEMARNAT-2023.**

El equipo de monitoreo atmosférico ubicado en el palacio municipal de Tuxtla Gutiérrez cumple una función en la aplicación práctica de la NOM-172-SEMARNAT-2019, esta norma establece los lineamientos para calcular y comunicar el índice de calidad del aire (ICA) en México, su propósito principal es proteger la salud de la población mediante información ambiental clara, oportuna y científicamente fundamentada.

Esta norma define los contaminantes que deben ser monitoreados, como partículas finas ( $pm_{2.5}$  y  $pm_{10}$ ), ozono ( $O^3$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre ( $SO_2$ ), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y establece los rangos de concentración que determinan el nivel de riesgo para la salud. A partir de estos valores, se calcula el ICA, que se clasifican en categorías que van desde “buena” hasta “extremadamente mala” calidad del aire, cada una acompañada de recomendaciones específicas para la población general y grupos vulnerables.

La norma también establece como debe comunicarse esta información: de forma accesible, visual y comprensible, utilizando colores, iconos y mensajes preventivos. Esto permite que la ciudadanía tome decisiones informadas sobre sus actividades diarias, especialmente en contexto de alta contaminación.

La NOM-172-SEMARNAT-2019, exige que esta información se traduzca en recomendaciones claras para la población, especialmente para grupos vulnerables como niños adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias. La relevancia del equipo no se limita a la medición; también garantiza que los datos sean confiables y estén alineados con estándares técnicos nacionales.

### **7.1.5. TECNOLOGÍAS DE MONITOREO.**

Las herramientas para monitorear el nivel de contaminación son fundamentales para comprender y abordar los desafíos ambientales, dentro de las herramientas destacadas, se encuentran los monitores de calidad del aire, que proporcionan mediciones precisas de partículas contaminantes, además, las tecnologías de monitoreo remoto y drones permiten obtener una visión global de la contaminación atmosférica y las actividades humanas que la generan (CONAMA, 2020).

Las herramientas tecnológicas para medir la contaminación ambiental son fundamental en la actualidad para comprender mejor el impacto de las actividades humanas en el medio ambiente. A través de la implementación de sensores y dispositivos de monitoreo, es posible recopilar datos precisos sobre la calidad del aire, de la presencia de sustancias nocivas y otros factores que contribuyen a la contaminación. Estas herramientas tecnológicas permiten obtener información en tiempo real, lo que facilita la toma de decisiones y la implementación de medidas preventivas.

Algunas de las tecnologías utilizadas para medir la contaminación ambiental incluyen sensores remotos, estaciones de monitoreo automatizadas y dispositivos portátiles que pueden ser utilizados sobre el terreno. Estas herramientas permiten recopilar datos detallados y generar informes que sirvan de base para la elaboración de estrategias de mitigación y control de la contaminación, el uso de herramientas tecnológicas para medir la contaminación ambiental es esencial para evaluar el impacto ambiental de las actividades humanas y para tomar medidas concretas destinadas a reducir la contaminación. Gracias a la innovación en este campo, es posible obtener datos más precisos y oportunos, lo que a su vez contribuye a la protección y preservación del medio ambiente (CONAMA, 2020).

Las innovaciones tecnológicas han revolucionado la forma en que abordamos el seguimiento y control de la contaminación ambiental. Con el desarrollo de herramientas avanzadas, como sensores remotos y sistemas de monitoreo en tiempo real, ahora es posible recopilar datos más precisos y detallados sobre la calidad del aire, el agua y el suelo. Estas tecnologías permiten a los expertos en medio ambiente identificar fuentes de contaminación, evaluar riesgos y tomar medidas correctivas de manera más eficiente (Le *et al.*, 2018)

El uso de sensores para monitoreo es una de las aplicaciones más importantes y transformadoras en diversas industrias, ya que permite realizar un seguimiento en tiempo real de variables específicas para mejorar la eficiencia.

Los sensores son dispositivos diseñados para captar diversos estímulos del entorno y transformarlos en energía eléctrica mediante un transductor, produciendo un impulso eléctrico. En términos simples, convierte la energía o información proveniente del entorno en una señal eléctrica, generalmente digital (Reyes, 2019).

Dentro de estos existe una amplia variedad de sensores diseñados para detectar contaminantes en el aire, los cuales pueden tener efectos adversos en la salud humana. A raíz de esta preocupación, se han desarrollado múltiples técnicas de detección y medición de partículas en suspensión, conocidas como material particulado (PM).

## **VIII.- MARCO METODOLÓGICO.**

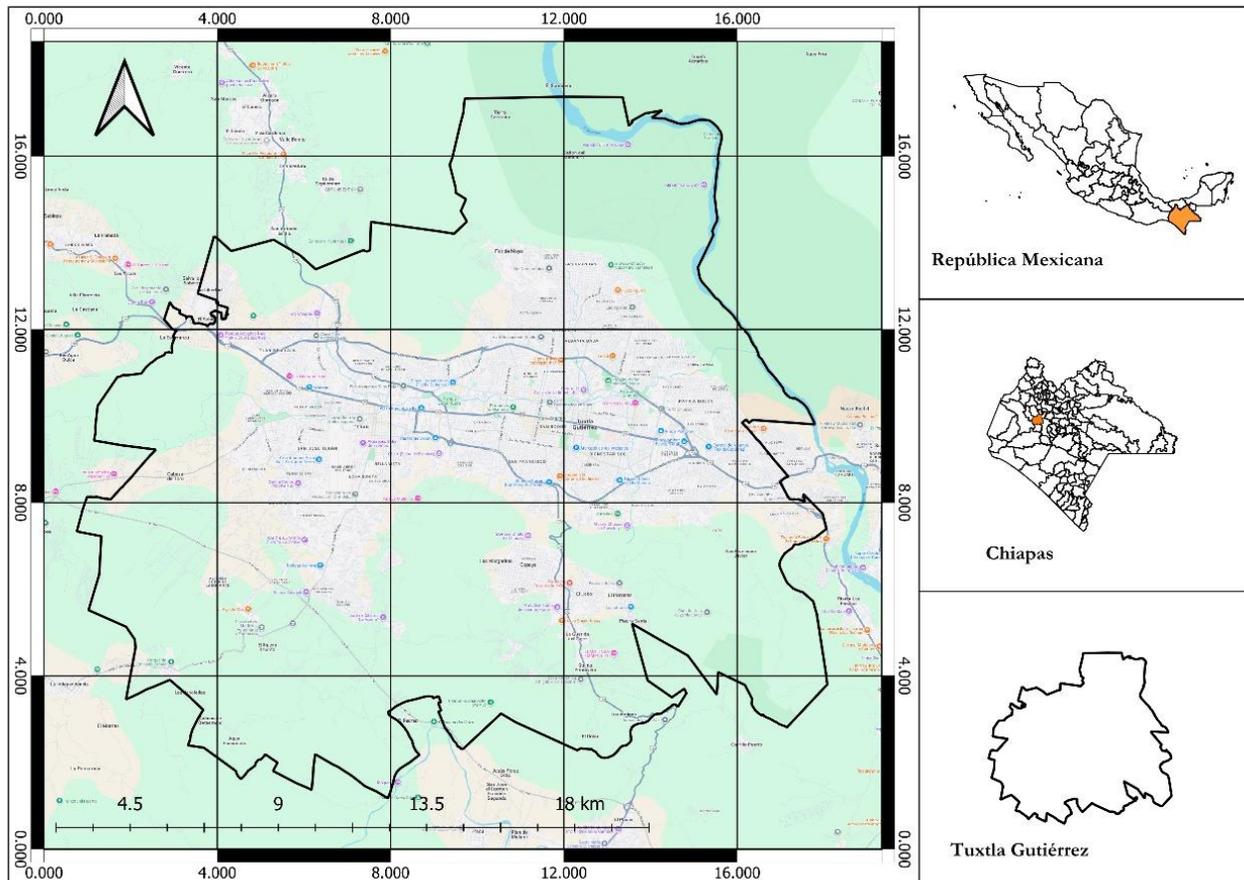
La utilidad de los drones ha permitido desarrollar varias aplicaciones en el campo de la investigación metodológica. Los trabajos más relevantes se enfocan el monitoreo de la atmosfera, además del acoplamiento de sensores a UAV, dado que el objetivo será implementar un sistema de monitoreo puntual utilizando un dron equipado con un sensor para la medición en tiempo real de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en el área urbana de Tuxtla Gutiérrez.

El proyecto se diseñó bajo el planteamiento metodológico del enfoque cuantitativo, puesto que para medir y analizar las concentraciones de  $PM_{2.5}$  permitirá obtener datos precisos y objetivos que pueden ser analizados estadísticamente para identificar patrones y tendencias.

El enfoque cuantitativo se centra en la recolección y análisis de datos numéricos, este enfoque es ampliamente utilizado debido a su capacidad para proporcionar resultados precisos y generalizables. Como bien explica Hernández *et al* (2014) el enfoque cuantitativo se genera a partir de un proceso deductivo en el que, a través de la medición numérica y el análisis estadístico inferencial, se prueban hipótesis previamente formuladas.

### 8.1. ÁREA DE ESTUDIO.

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez se encuentra al sur de México, es la capital del estado de Chiapas y cabecera de la Región Metropolitana del Estado, está situada en las coordenadas 16°44'00"N 93°08'00"W. Se encuentra a una altitud de 527 metros sobre el nivel del mar y cubre una superficie terrestre



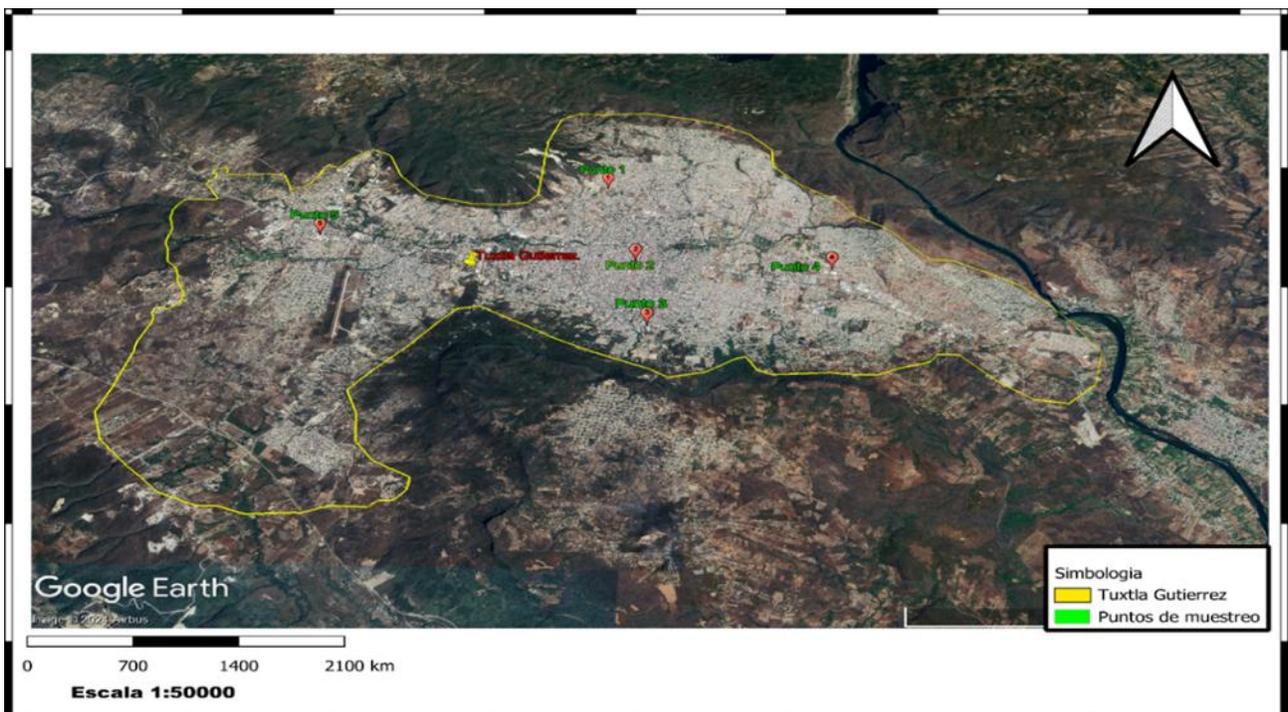
**FIGURA 1.** *ÁREA DE ESTUDIO.* Fuente: Andrade, 2025, Qgis.

### 8.1.2. SELECCIÓN DE PUNTOS DE MONITOREO.

En el marco de este proyecto, se identificaron y seleccionaron cinco puntos estratégicos en la ciudad (figura 1), donde se llevó a cabo el monitoreo de la calidad del aire, la selección de estos puntos se basó en la alta circulación vehicular presente en dichas áreas. Los vehículos son una fuente de contaminación atmosférica, ya que emiten una variedad de contaminantes que afectan tanto la calidad del aire como la salud pública.

En los puntos seleccionados se genera una mayor concentración de diferentes tipos de gases y también de partículas que contaminan el entorno, el monitoreo en estas zonas nos permite identificar patrones y tendencias en la contaminación del aire.

Se planificó rutas de vuelos, esta selección se basa en obtener una cobertura geográfica completa, realizado a diferentes altitudes (respecto al punto de despeje) y horarios para tener una muestra representativa de la concentración de  $PM_{2.5}$ . Además, que se consideró la accesibilidad y seguridad de estos lugares para asegurar la viabilidad del monitoreo.



**FIGURA 2.** DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO. Fuente: Santos y Hernández, 2025, con base en Google Earth.

### **8.1.3. TEMPORADAS DE MEDICIÓN.**

Considerando que la temporada de estiaje concluyo antes del inicio del trabajo de campo, se definieron criterios técnicos para la selección de días de muestreo que permitieran mantener la representatividad de condiciones atmosféricas secas y propensas a la acumulación de contaminantes. Los muestreos se realizaron exclusivamente en días con ausencia de precipitación, definidos como aquellos en los que no se registraron eventos pluviales durante al menos 12 horas previas al inicio del muestreo, y en los que se observó presencia visible de contaminación atmosférica, evidenciada por fenómenos como bruma, opacidad del aire, reducción de visibilidad horizontal o presencia de humo.

Esta estrategia responde a la necesidad de capturar datos en condiciones ambientales que favorecen la concentración de partículas suspendidas en el aire y otros contaminantes, similares a la que se presentan durante el estiaje. Además, se considera que estos eventos constituyen escenarios críticos de exposición, relevantes para la evaluación y riesgos a la salud y la validación de datos del sensor y los datos oficiales de la estación fija.

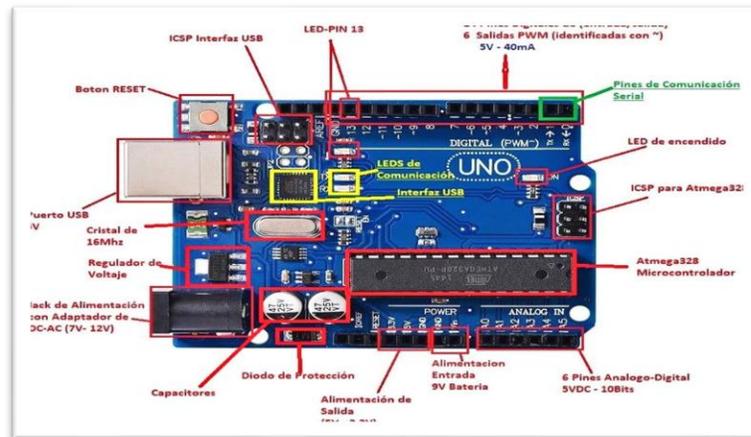
El prototipo que se desarrolló en el proyecto está compuesto de dos sistemas principales: el primero es un sistema aéreo que permite el almacenamiento y transmisión de datos metodológicos georreferenciados, mientras que el segundo será un sistema en tierra para recepción, procesamiento y almacenamiento de dicha información para su posterior análisis.

En la primera etapa del proyecto se realizó la adquisición de la información de la zona de estudio. Para ello es necesario contar con los siguientes dispositivos.

- Dron: vehículo que servirá para desplazar el equipo de medición.
- Bloque de procesamiento: procesa la información recopilada por el sensor.
- GPS: proporciona las posiciones geográficas de los lugares donde se realizará el estudio metodológico.

Existen diversos modelos de placas Arduino para adecuarse a diferentes proyectos a realizar, por lo que se tiene que considerar las características de los modelos para su mayor eficiencia en él. Para este proyecto se utilizó la versión de Arduino UNO que es una tarjeta basada en un microcontrolador atmega328, que cuenta con 14 pines de entrada y salida digital, de los cuales 4 pueden ser utilizados para salidas PWM y 6 entradas analógicas, cuenta con un resonador cerámico de 16 MHz y un conector ICSP.

Para realizar la programación se descargó e instaló el software de desarrollo de Arduino (IDE), que permite escribir, cargar y depurar el código. Así como también se instaló las bibliotecas correspondientes para el sensor de selección, que nos proporciona distintas funciones para un fácil manejo en la comunicación en el sensor.



**FIGURA 3.** ARDUINO UNO, COMPONENTES PRINCIPALES. Fuente: Adaptado de Arduino.cc, 2025.

#### 8.1.4. EQUIPOS UTILIZADOS.

Se optó por utilizar el sensor PMS5003, este tipo de sensor permite medir las concentraciones de partículas  $PM_{2.5}$  (que se refiere a la concentración de partículas de 2.5 micrómetros de diámetro). Por medio de la dispersión de la luz laser sobre las partículas suspendidas en el aire, capturando la luz laser dispersa para poder obtener una estimación de la cantidad de partículas por unidad de volumen a través de un microprocesador.



**FIGURA 4.** SENSOR MODELO PMS5003. Fuente: Adaptado de Technologies, 2024.

**TABLA 1.** CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR.

Voltaje de alimentación: 4.5 a 5.5v.
Corriente: (Activa $\leq 100\text{mA}$ ) (Standby $\leq 200\mu\text{A}$ ).
Resolución: $1\mu\text{ g/m}$ .
Volumen estándar 0.1L.
Medición: 0-3; 1.0-2.5; 2.5-10 $\mu\text{m}$ .
Peso: 41g.
Dimensiones: 50mm * 38mm * 21mm.
Tiempo de respuesta: $\leq 1$ segundos.

Fuente: Elaboración Hernández y Santos, con base en ficha técnica del fabricante, 2025.

La programación con Arduino será una fase clave para la correcta implementación del sensor láser de PM<sub>2.5</sub> en el dron, utilizar Arduino como placa controladora permite gestionar de manera eficiente la lectura y procesamiento de los datos que el sensor recolecta, al mismo tiempo que garantiza la integración con otros módulos como el almacenamiento de datos.

Al momento de iniciar a programar es necesario saber que el código desarrollado en Arduino debe cumplir con varias funciones esenciales, las cuales son: leer los datos del sensor, procesar la información y enviarla o almacenarla. Teniendo en cuenta esto, el siguiente paso es escribir el código que permita leer las concentraciones de  $PM_{2.5}$  del sensor láser.

Se optó por utilizar un módulo lector de tarjeta microSD, ya que permite almacenar y gestionar los datos de manera más práctica y accesible. Este módulo facilitará un control más organizado y eficiente de la información recopilada, permitiendo una fácil lectura, escritura y almacenamiento de los datos en una tarjeta SD.



**FIGURA 5.** MODULO LECTOR DE TARJETA SD.  
*Fuente: Adaptado de Novatronic, 2023.*

El vehículo aéreo no tripulado que permitió el desplazamiento del sistema móvil por el aire es el dron DJI Mavic pro, que ofrece modos de vuelos inteligentes, además de las funciones comunes, un sistema avanzado de GPS y vuelos de punto de referencias.



**FIGURA 6.** DRON DJI MAVIC PRO.  
*Fuente: DJI, 2024.*

**Tabla 2.** CARACTERÍSTICAS DEL DRON.

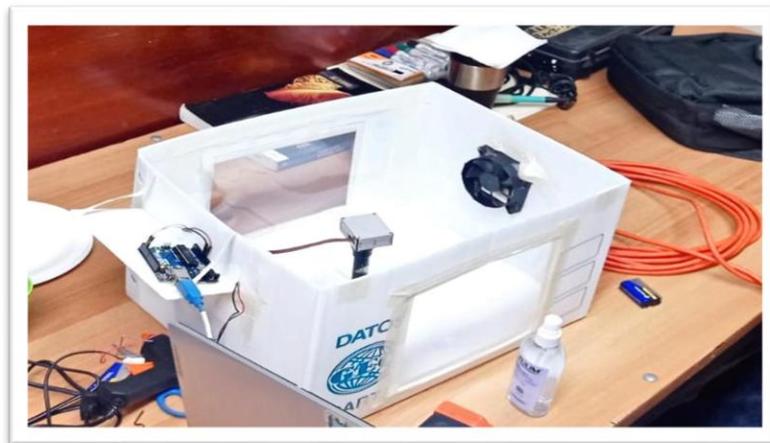
Peso: 734 g.
Material: Metal y plástico.
Medidas: 83 mm x 83 mm x 199 mm.
Numero de motor/hélices: 4 hélices.
Batería: liPo 3S 11.4V 3830 mAh.
Altura máxima: 5000 m (respecto al punto de despegue).
Sistema GPS.
Duración máxima de vuelo: 27 minutos.

*Fuente: Elaboración Hernández y Santos, con base en documentación técnica del fabricante, 2024*

### 8.1.5. PRUEBA PILOTO DEL SENSOR.

La prueba piloto tuvo como objetivo principal evaluar la funcionalidad y precisión del sensor antes de llevar a cabo el monitoreo en los puntos establecidos dentro de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, este paso es crucial para caracterizar el sensor y asegurar que los datos recolectados sean fiables y útiles para el estudio posterior, considerándolo un punto de referencia (punto cero) para el monitoreo futuro.

Para validar la precisión, se optó por la preparación de caja de prueba para alojar el sensor midiendo los niveles base de partículas en un ambiente controlado sin material particulado.



**FIGURA 7.** PREPARACIÓN DE CAJA PRUEBA. Fuente: Hernández y Santos, 2025.



**FIGURA 8.** PRUEBA DEL SENSOR EN AMBIENTE CONTROLADO. Fuente: Hernández y Santos, 2025.

Posteriormente, se generó material particulado dentro de la caja hermética sellada evitando partícula externa para observar la alteración de partículas, para evaluar la precisión del sensor en condiciones de contaminación. Se compararon los datos obtenidos en las pruebas realizados para identificar la sensibilidad y precisión del sensor.



**FIGURA 8.** PRUEBA DEL SENSOR CON MATERIAL PARTICULADO. Fuente: Hernández y Santos, 2025.

#### **8.1.6. PRUEBA PILOTO DEL DRON.**

Con el fin de investigar el comportamiento del prototipo se llevó a cabo hasta una altura máxima de 150 metros, observando que funcionará con normalidad. No se alcanzó alturas superiores por seguridad y el fabricante del dron garantiza su funcionamiento normal hasta ese límite.



**FIGURA 9.** COMPORTAMIENTO DE VUELO DEL DRON. Fuente: Hernández y Santos, 2025.

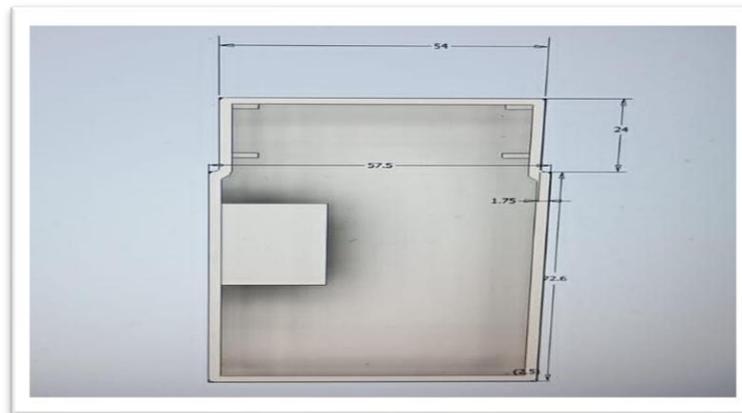
Efecto de las hélices: Las hélices del vehículo aéreo no tripulado (VANT), no afectaran el flujo de aire. Yoon, Chan y Pilliam (2017), demostraron por medio de un simulador que la parte inferior y superior no se ve afectada gravemente por la turbulencia generada por las hélices del (VANT) ya que el flujo del aire pierde fuerza en su centro.

Para comprobar la validez de las mediciones se realizarán pruebas iniciales con el dron apagado y luego encendido, verificando que las mediciones no se alteren en lo absoluto, y posteriormente dicha comparación con una estación de monitoreo fijo que se encuentra en la zona centro de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

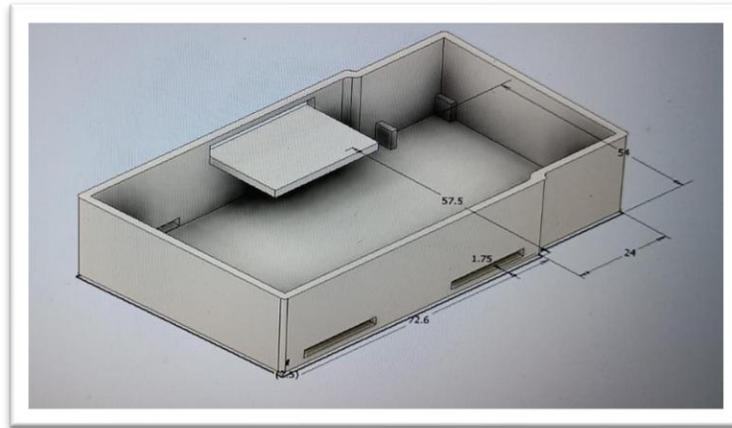
### 8.1.7. DISEÑO DE LA CARCASA.

Para la protección de dichos circuitos, se necesitó diseñar una carcasa resistente. Para el diseño se utilizó el programa SolidWorks, es un software tipo CAD, de diseño mecánico, que utilizando un entorno gráfico basado en Microsoft Windows permite la creación de modelos sólidos en 3D, ensamblajes y dibujos, para descargar o exportar a plataformas de impresión en 3d

Una vez finalizado el diseño, se procedió a realizar en la impresora 3D realizado con el ácido poli láctico, común mente llamado PLA duro, es un plástico respetuoso con el medio ambiente lo que lo convierte en un plástico más versátil para una amplia variedad de aplicaciones.



**FIGURA 10.** DISEÑO DE LA CARCASA. Fuente: Hernández y Santos, 2025.



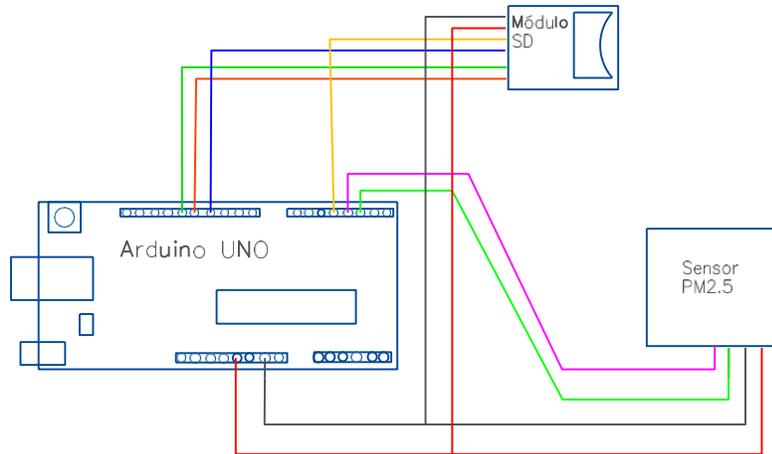
**FIGURA 11. DISEÑO DE LA CARCASA.** Fuente: Hernández y Santos, 2025.



**FIGURA 12. IMPRESIÓN DE LA CARCASA.** Fuente: Hernández y Santos, 2025.

### 8.1.8. ENSAMBLE DE LOS EQUIPOS.

Para facilitar la comprensión del ensamblaje y conexión de los componentes del sistema, se ha elaborado un diagrama que ilustra las interconexiones entre los principales componentes: sensor de medición de partículas, sensor de presión barométrica, módulo lector de tarjeta SD. Las conexiones están representadas con líneas que especifican el tipo de comunicación y las fuentes de alimentación correspondiente.



**FIGURA 13.** DIAGRAMA DE CONEXIONES DE LOS EQUIPOS. UTILIZADOS. Fuente: Hernández y Santos, 2025.

### 8.1.9. PROGRAMACIÓN DEL EQUIPO.

Para lograr la integración eficiente de los sensores empleados en el estudio y asegurar la correcta recopilación y almacenamiento de datos, se ha desarrollado un código en lenguaje C++, diseñado específicamente para su implementación en una plataforma Arduino. Este programa permite la comunicación fluida entre los dispositivos, asegurando su funcionamiento sincronizado y mejorando la precisión de las mediciones obtenidas.

Además, el sistema ha sido programado para gestionar de manera óptima la captura, almacenamiento y recuperación de la información, minimizando posibles errores en la lectura de los valores registrados. La recolección de datos se lleva a cabo mediante un lector de tarjeta SD, donde se almacenan las mediciones de los sensores para su posterior análisis. Este método garantiza la seguridad e integridad de la información, facilitando su transferencia a otros sistemas para su procesamiento y evaluación.

Para lograr esto se utilizó el siguiente código:

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <SD.h>
SoftwareSerial pmsSerial(6, 7); // RX, TX del PMS5003
const int chipSelect = 4;
uint16_t pm10, pm25, pm100;
bool sdDisponible = false;
```

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pmsSerial.begin(9600);
  Serial.println("🔄 Iniciando sistema...");
  // Intentar iniciar SD
  if (SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("✅ Tarjeta SD detectada.");
    sdDisponible = true;

    // Escribir encabezado si no existe
    if (!SD.exists("datos.csv")) {
      File archivo = SD.open("datos.csv", FILE_WRITE);
      if (archivo) {
        archivo.println("PM1.0,PM2.5,PM10");
        archivo.close();
        Serial.println("📄 Encabezado CSV creado.");
      }
    }
  } else {
    Serial.println("⚠️ No se pudo iniciar la SD. Continuando sin guardar.");
  }
}

void loop() {
  // Buscar paquetes válidos del PMS5003
  if (pmsSerial.available() >= 32) {
    if (pmsSerial.read() == 0x42 && pmsSerial.read() == 0x4D) {
      uint8_t buffer[30];
      pmsSerial.readBytes(buffer, 30);
      pm10 = buffer[2] << 8 | buffer[3];
      pm25 = buffer[4] << 8 | buffer[5];
      pm100 = buffer[6] << 8 | buffer[7];

      Serial.print("📊 PM1.0: "); Serial.print(pm10);
      Serial.print(" µg/m³, PM2.5: "); Serial.print(pm25);
      Serial.print(" µg/m³, PM10: "); Serial.println(pm100);
      if (sdDisponible) {
        guardarCSV (pm10, pm25, pm100);
      }
    }
  }
}

```

```

}
}
delay(1000); // Esperar 1 segundo entre lecturas
}
void guardarCSV(uint16_t pm10, uint16_t pm25, uint16_t pm100) {
File archivo = SD.open("datos.csv", FILE_WRITE);
if (archivo) {
archivo.print(pm10); archivo.print(",");
archivo.print(pm25); archivo.print(",");
archivo.println(pm100);
archivo.close();
Serial.println("📁 Datos guardados.");
} else {
Serial.println("🔥 Error al escribir en la SD.");
}
}
}
}

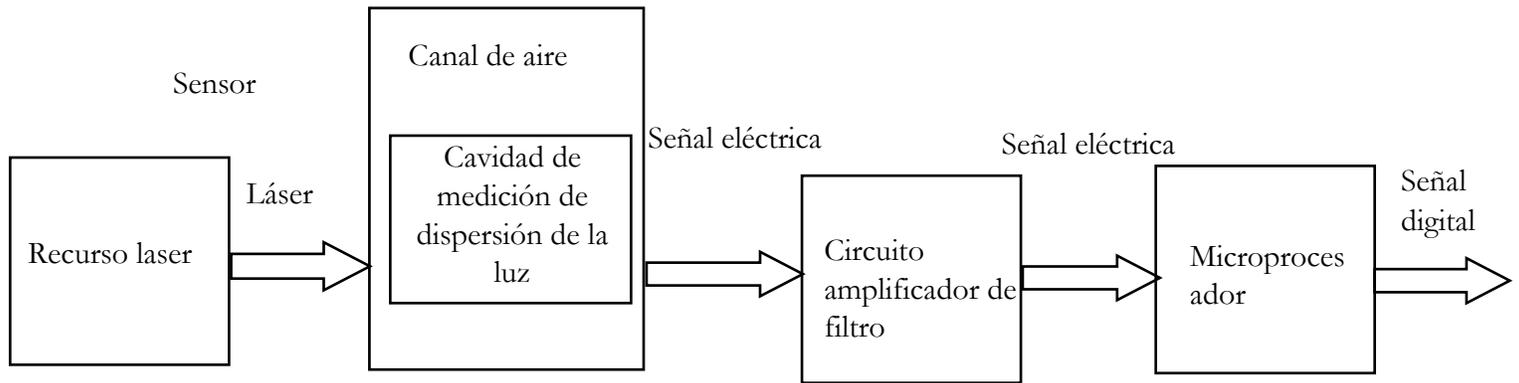
```

### 8.1.10. PRINCIPIO DE DISPERSIÓN LASER.

El principio de dispersión láser se utiliza para dicho sensor, es decir, se produce dispersión utilizando un láser para irradiar partículas suspendidas en el aire, luego se recolecta la luz dispersa en un cierto grado y finalmente se obtiene la curva de cambio de la luz dispersa con el tiempo. Al final, el diámetro de partículas equivalente y la cantidad de partículas con diferente diámetro por unidad de volumen se pueden calcular mediante un microprocesador basado en la teoría de MIE.

Principalmente, la salida es la calidad y el número de cada partícula con diferente tamaño por unidad de volumen, la unidad de volumen de número de partículas es 0,1L y la unidad de concentración de masa es  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), es una unidad de medida utilizada para expresar la concentración típicamente un contaminante en el aire. Significa la masa de una sustancia específica presente en un metro cúbico del medio, con la sustancia medida en microgramos (una millonésima parte de un gramo), (Zhou Yong, 2016).



**FIGURA 14.** DIAGRAMA DE BLOQUES FUNCIONAL DEL SENSOR, (MANUAL DE DATOS).

**Recurso laser:** Es un diodo láser que emite un haz de luz de alta precisión, su función es iluminar las partículas suspendidas en el aire para que puedan ser detectadas.

**Canal de aire:** Un pequeño ventilador interno ayuda a dirigir el flujo de aire hacia la cavidad de medición, esto garantiza que las partículas lleguen al área de donde serán analizadas.

**Cavidad de medición de dispersión de la luz:** Aquí ocurre la interacción entre las partículas y el haz laser, cuando una partícula cruza el camino del láser, dispersa la luz en diferentes direcciones.

**Conversión a señal eléctrica:** un fotodiodo capta la luz dispersada y la convierte en una señal eléctrica proporcional a la cantidad de partículas presentes.

**Circuito de amplificador de filtro:** La señal eléctrica es amplificada para mejorar su precisión y filtrarla para eliminar interferencias o ruido que pueda afectar la medición.

**Microprocesador:** Procesa la señal filtrada y la convierte en datos digitales, aplica algoritmos para calcular la concentración de partículas  $PM_{1.0}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  en el aire.

**Salida de señal digital:** Los datos procesados se transmiten a través de una interfaz Universal Asynchronous Receiver (UART) o Inter-Integrated Circuit (I2C), permitiendo que un microcontrolador o computadora los interprete y los muestre en una pantalla.

## IX.- RESULTADOS.

con el fin de validar la masa total del sistema de monitoreo, se llevo a cabo el procedimiento de pesado del equipo ensamblado, esta acción responde a la necesidad de documentar la masa neta del sistema, entendida como un indicador técnico relevante para múltiples aspectos del diseño, implementación y despliegue en campo.

El registro de peso permite verificar la carga útil del sistema en relación con el vehículo aéreo no tripulado (VANT), la masa total incide directamente en la autonomía de vuelo, el consumo energético y la estabilidad aerodinámica. Además de registrar un parámetro físico de referencia para futuras replicas del sistema, permitiendo establecer tolerancia de fabricación, ajustes en el diseño y comparaciones entre versiones.



**FIGURA 15.** PESADO DEL SISTEMA. Fuente: Hernández y Santos, 2025.



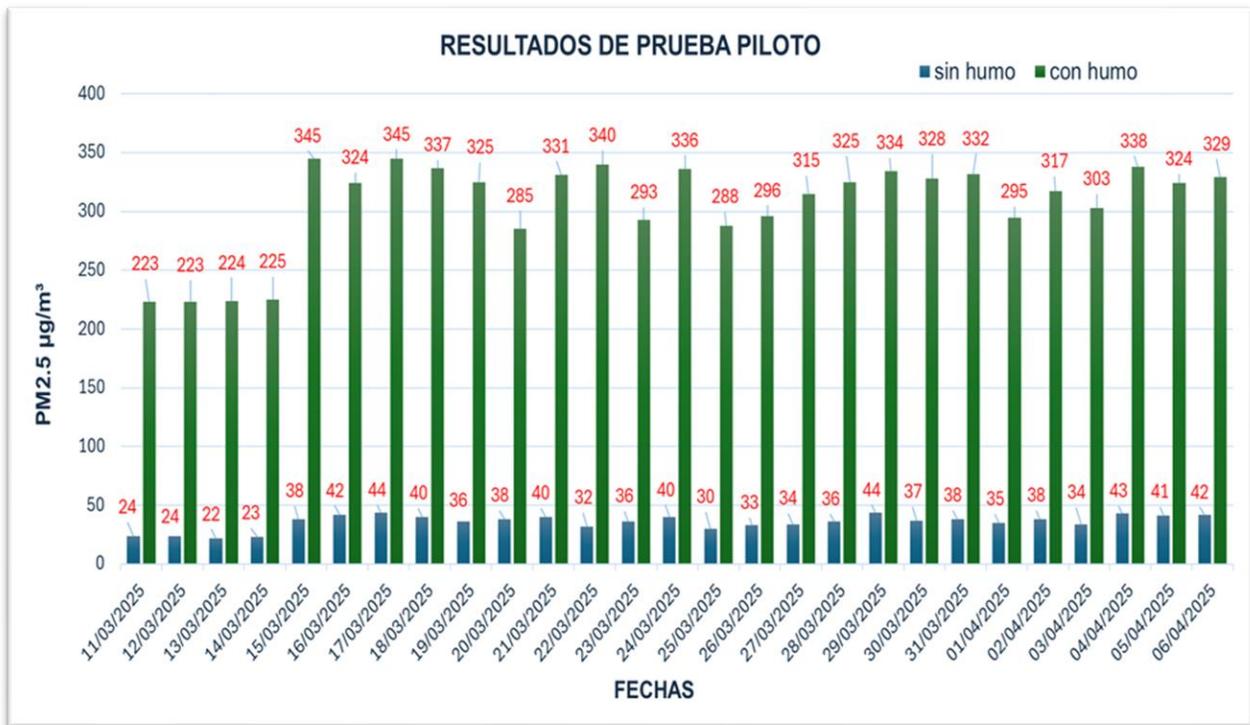
**FIGURA 16.** PESADO DEL SISTEMA (192 g). Fuente: Hernández y Santos, 2025.

El procedimiento se realizó en el laboratorio del programa educativo de ingeniería ambiental, utilizando balanza analítica y una balanza mecánica de triple haz, capaces de registrar masas superiores a 1.5 kg con resolución mínima de 0.001 g. las imágenes de la figura 15 y 16, muestran el equipo completo sobre las plataformas de pesaje, obteniendo una masa total de 192.91 y 192. 50 g, este valor incluye la carcasa, sensor de medición, modulo lector de tarjeta SD, Arduino Uno y batería recargable de 9 v.

### 9.1. PRUEBA PILOTO DEL SENSOR.

Con el objetivo de evaluar la sensibilidad y estabilidad del sensor propuesto ante concentraciones variables de material particulado, se diseñó una prueba piloto en condiciones controlada. Esta etapa preliminar del sensor durante 27 días en un ambiente con presencia y ausencia de humo permitió verificar el comportamiento del sensor. La fuente de partículas utilizada en la prueba consistió en una mezcla de aceite quemado sobre papel absorbente, generando una nube de humo, esta elección se fundamenta en la necesidad de reproducir un escenario de emisión. Los resultados reflejan (Grafica1) una clara diferencia en las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , donde los valores en la fase sin humo se mantuvieron bajos, aunque con pequeñas fluctuaciones.

Por otro lado, en la fase con humo, las mediciones aumentaron significativamente, lo que demuestra la sensibilidad del sensor a las partículas de combustión.

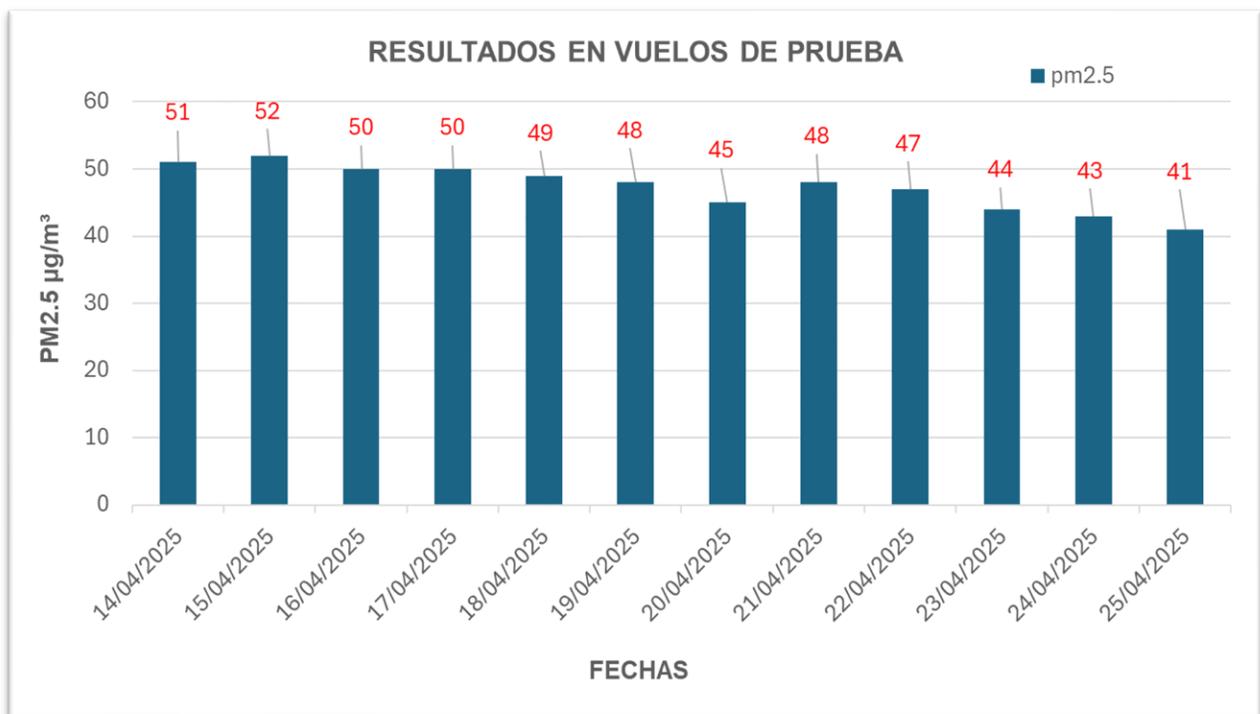


**GRAFICA 1.** COMPARACIÓN DE AUSENCIA Y PRESENCIA DE HUMO. Fuente: Hernández y Santos, 2025.

### 9.1.1. VUELOS DE PRUEBA.

Los vuelos de pruebas se realizaron durante un periodo continuo de 12 días, comprendiendo entre el 14 y 25 de abril, con el objetivo de evaluar la estabilidad operativa, las mediciones se llevaron a cabo en un entorno controlado dentro de las instalaciones de la universidad de ciencias y artes de Chiapas (UNICACH), específicamente en el área abierta ubicada en la entrada principal, frente al libramiento norte de la ciudad. Este sitio fue seleccionado por su accesibilidad, seguridad. La cercanía al libramiento permitió simular escenarios de monitoreo en zonas de tránsito vehicular.

Durante cada jornada, se mantuvieron constantes las condiciones de operación, horario, altitud de vuelo, esta estandarización permitió garantizar la compatibilidad entre días y minimizar el efecto de variables externas. Los datos de las pruebas de vuelo controlado (Grafica2), muestra los valores obtenidos sin ajustes adicionales, permitiendo evaluar la estabilidad del sensor en condiciones ambientales del entorno.



**GRAFICA 2.** PRIMEROS RESULTADOS EN VUELOS DE PRUEBAS. Fuente: Hernández y Santos, 2025.

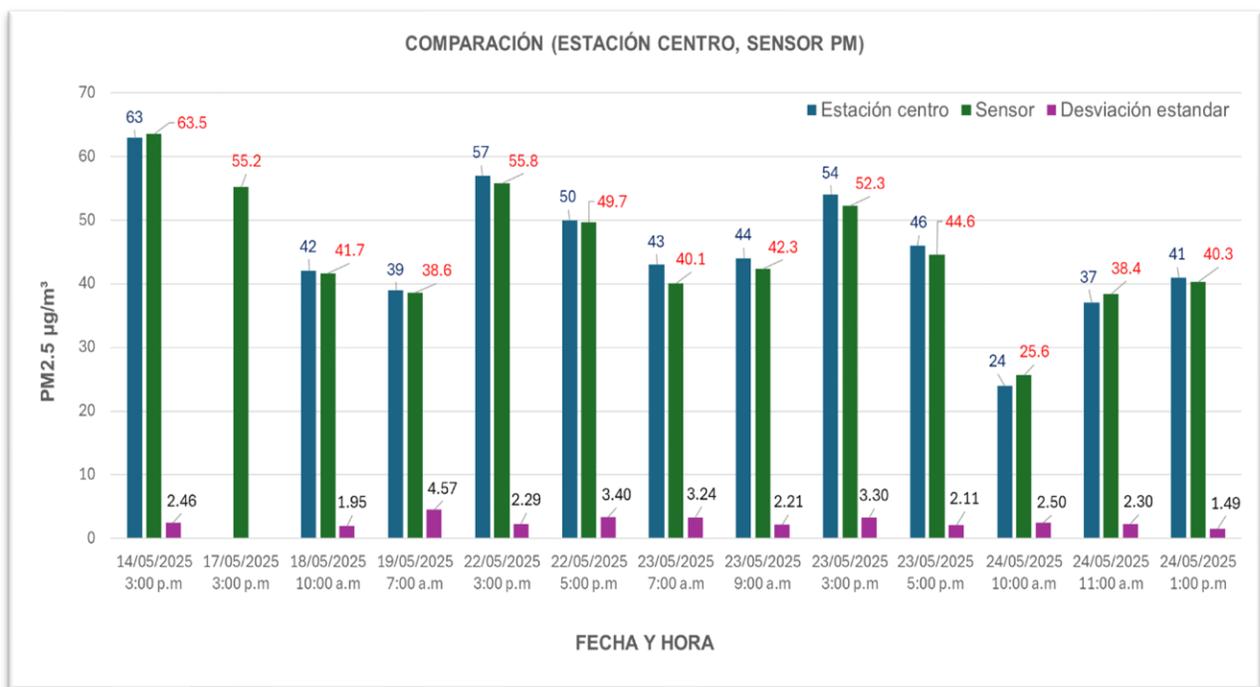
### 9.1.2. COMPARACIÓN ESTACIÓN CENTRO, SENSOR PMS5003.

Como parte de la estratégica metodológica, se realizó un periodo de muestreo intensivo, en las inmediaciones de la estación, el objetivo principal fue comparar el desempeño del sensor PMS5003 con los datos de la estación centro ubicada en el palacio municipal de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, que registra mediciones cada hora a lo largo de 24 horas. Se calculo el promedio de las mediciones del sensor en cada franja horaria y se obtuvo la desviación estándar para evaluar la variabilidad de los registros.

Este estudio de validación permite verificar la precisión y confiabilidad del sensor en condiciones reales de campo, identificar posibles desviaciones o sesgos en las lecturas del sensor y asegurar que los datos generados por el sensor sean comparables y útiles para el análisis de calidad del aire.

Los días seleccionados para el muestreo cumplieron con criterios específicos, como fue la ausencia de lluvia durante al menos 12 horas previas, presencia visual de contaminación (bruma, humo, reducción de visibilidad), proximidad geográfica a la estación centro para asegurar condiciones ambientales similares.

Se identifico una correspondencia razonable entre ambos dispositivos, se resalta que el día 17 de mayo del 2025 no se registraron datos en la estación centro, por lo que el análisis de esa fecha se basa exclusivamente en las mediciones del sensor PMS5003.



**GRAFICA 3.** COMPARACIÓN DE LA ESTACIÓN CENTRO, SENSOR PM. Fuente: Hernández y Santos,

### 9.1.3. MONITOREO DE LOS CINCO PUNTOS ESTRATÉGICOS.

Durante la jornada de monitoreo móvil realizada el 16 de agosto del 2025, se registraron concentraciones de partículas finas PM<sub>2.5</sub>, en cinco puntos estratégicos de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, siguiendo una trayectoria horaria desde el centro de la ciudad hacia las periferias. Los resultados obtenidos mediante el sensor modelo PMS5003 montado en un dron se detallan a continuación:

**TABLA 3. CONCENTRACIÓN DE PM<sub>2.5</sub> POR PUNTO DE MUESTREO Y HORA.**

Hora	Punto de muestreo	Coordenadas	Ubicación aproximada	Lectura PMS5003 (µg/m <sup>3</sup> )	Lectura estación centro (µg/m <sup>3</sup> )
7:00 AM	Centro	16°45'16"N 93°06'56"W	Zona centro	15	14
8:00 AM	Sur	16°43'31"N 93°05'36"W	ZOOMAT	16	N/D
9:00 AM	Oriente	16°44'56"N 93°04'52"W	Plaza Polifórum	23	N/D
10:00 AM	Norte	16°46'28"N 93°07'20"W	UNICACH, libramiento norte	24	N/D
11:00 AM	Poniente	16°46'20"N 93°11'24"W	Carretera internacional, plan de Ayala	26	N/D

Durante el levantamiento de datos realizados el 16 de agosto a las 7:00 horas se obtuvo un promedio de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{2.5}$ , ese mismo horario, la estación, instituto nacional de ecología y cambio climático, calidad del aire, publico en su portal oficial un valor de  $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**FIGURA 17. CORROBORACIÓN PUNTUAL.**

La figura 17, corresponde al reporte oficial emitido por dicha estación, lo que permite establecer una correlación directa entre ambos registros, tanto en tiempo como en magnitud, la diferencia de apenas  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , entre ambos valores sugiere una alta consistencia técnica entre el sensor utilizado y la oficial, lo cual refuerza la validez del monitoreo complementario y su potencial para aplicaciones territoriales específicas.

#### **9.1.4. CARACTERÍSTICAS POR PUNTO DE MUESTREO Y SU RELACIÓN CON LA CONCENTRACIÓN DE (PM<sub>2.5</sub>).**

Punto centro: El punto central se ubica en el núcleo urbano de Tuxtla Gutiérrez, caracterizado por una alta densidad de infraestructura, comercio y transporte. A pesar de ser una zona con tráfico vehicular constante, la medición realizada a las 7:00 AM mostro una concentración relativamente baja de PM<sub>2.5</sub>. esto puede atribuirse a la naturaleza del día de muestreo (sábado 16/08/2025), en el cual la actividad laboral y escolar inicia más tarde en los días hábiles, reduciendo temporalmente la emisión de contaminantes por combustión vehicular.

La coincidencia entre la lectura del sensor PMS5003 y la estación oficial centro (diferencia de 1 µg/m<sup>3</sup>) sugiere una alta confiabilidad del instrumento y condiciones atmosféricas estables en ese intervalo. La presencia de edificaciones altas y calles estrechas podría haber limitado la dispersión de partículas, pero no se observó acumulación significativa en esta primera hora.

Parque cercano al ZOOMAT: Este punto se localiza en una zona de transición entre áreas verdes y vialidades urbanas, específicamente en las inmediaciones del zoológico miguel Álvarez del Toro. Aunque se trate de un entorno con vegetación abundante, la lectura de PM<sub>2.5</sub> (16µg/m<sup>3</sup>), mostro un ligero incremento respecto a la hora anterior. Este comportamiento puede explicarse por el flujo vehicular que se dirige al parque recreativo, especialmente en fines de semana, cuando aumenta la afluencia de visitantes. Además, la topografía del área, con pendientes suaves y vegetación densa, puede generar microclimas que retienen partículas en suspensión. La usencia de datos oficiales limita la comparación directa, pero el valor registrado sugiere una influencia moderada de fuentes móviles y posiblemente emisiones difusas provenientes de actividades humanas en la zona.

Plaza polifórum: La medición en el sector oriente se realizó en las partes inmediaciones de la plaza polifórum, una zona comercial activa que concentra transporte público, establecimientos de consumo y estacionamientos. El incremento significativo en la concentración de PM<sub>2.5</sub> (23µg/m<sup>3</sup>) puede atribuirse a la intensificación de la actividad urbana conforme avanza la mañana. El tránsito vehicular, especialmente de unidades de transporte colectivo, genera emisiones constantes de material particulado, que se acumulan en áreas con baja ventilación natural. Además, la presencia de pavimento, estructuras de concreto y escasa cobertura vegetal contribuye a la retención térmica y a la formación de capas de inversión térmica que dificultan la dispersión vertical de los contaminantes. Este comportamiento es típico en zonas comerciales durante fines de semana, donde la movilidad peatonal y vehicular se incrementa notablemente.

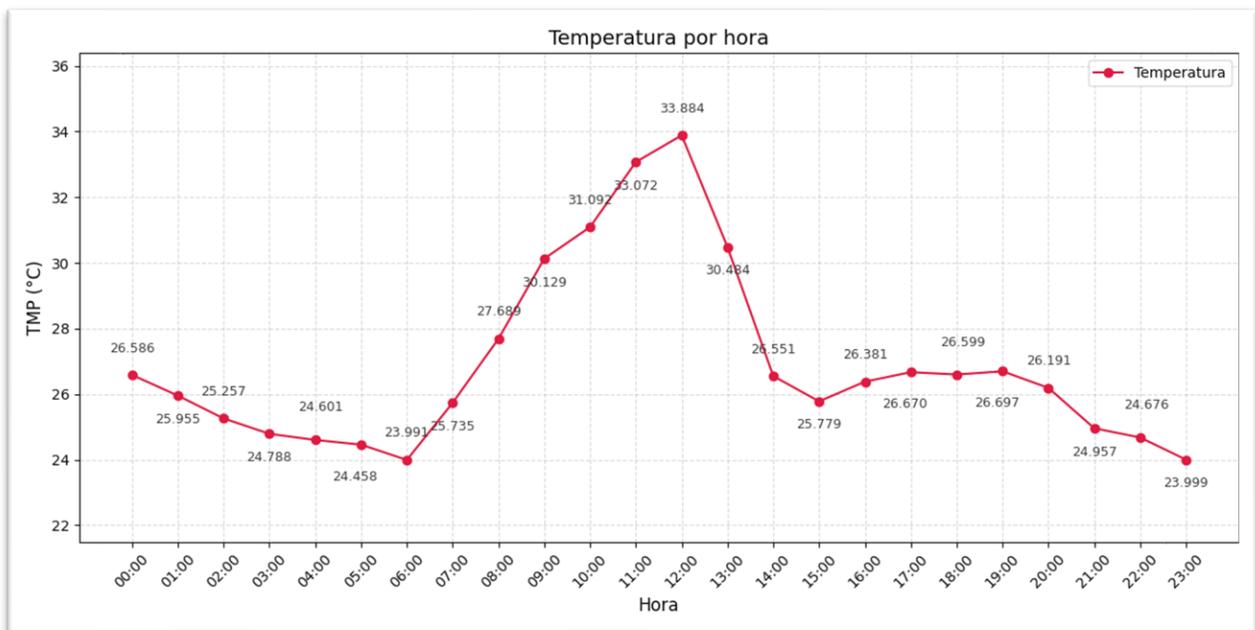
UNICACH, libramiento norte: El punto norte se ubica en el entorno de la universidad de ciencias y artes de Chiapas, junto al libramiento norte, una de las principales vías de circulación de la ciudad. La lectura elevada de  $PM_{2.5}$  ( $24\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) refleja la influencia directa del tránsito vehicular en esta zona, especialmente de unidades de transporte público y vehículos particulares que utilizan el libramiento como vía rápida. La cercanía con instalaciones universitarias también implica movimiento constante de estudiantes, personal académico y servicios logísticos. Por otro lado, la dispersión de partículas provenientes de la calera Maciel, que tienden a mantenerse en suspensión por largos periodos si la velocidad del viento es baja. Además. La configuración territorial con escasa vegetación, superficies abiertas y exposición directa del sol favorece la resuspensión de polvo fino.

Carretera internacional, plan de Ayala: El ultimo de muestreo se localiza en el extremo poniente de la ciudad, en las inmediaciones de la carretera internacional que conecta Tuxtla Gutiérrez con otras regiones del estado. Esta vialidad es utilizada por vehículos de carga, transporte intermunicipal y unidades particulares, lo que genera una fuente constante de emisiones por combustión diésel y gasolina. La lectura más alta del día ( $26\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) se registró en este sitio, lo que evidencia una acumulación significativa de  $PM_{2.5}$  en el ambiente.

En este entorno se identificó la presencia de un taller mecánico con flujo constante de unidades motorizadas y un establecimiento con frecuencia de ingreso y salida de vehículos de carga, ambos generadores potenciales de emisiones atmosféricas. Los talleres mecánicos suelen concentrar actividades de combustión, soldaduras, limpieza con solventes y operación de motores. Por otro lado, los tráileres estacionados o en tránsito representan, una fuente constante de emisiones por combustión, especialmente si se mantienen encendidos o en maniobras de carga y descarga.

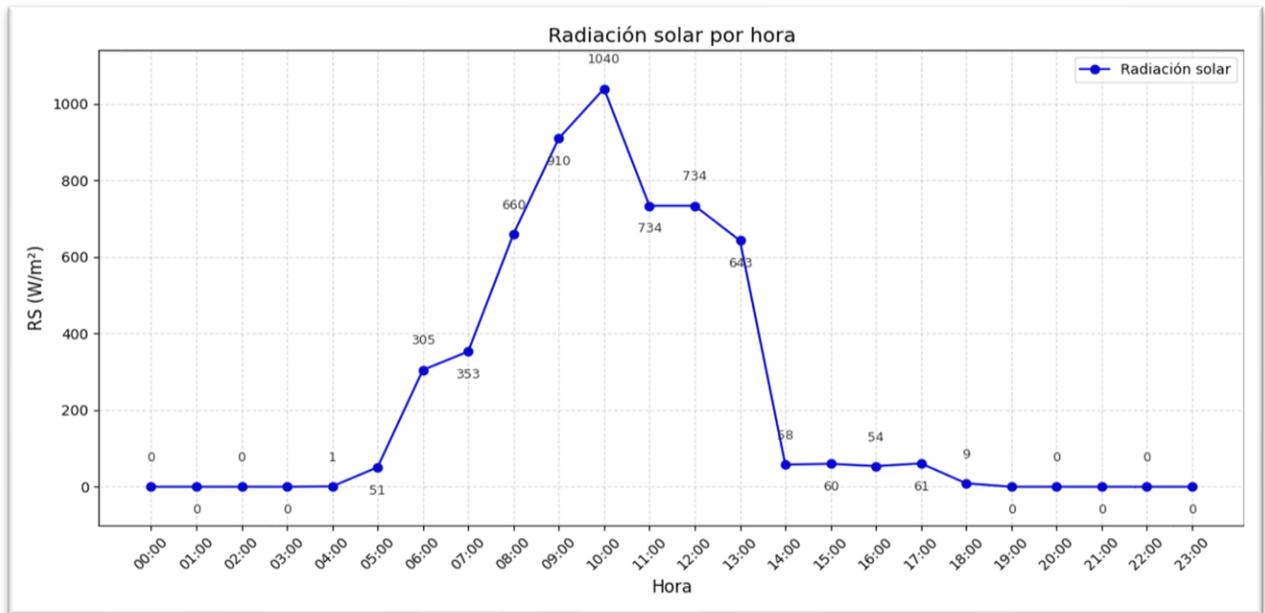
### 9.1.5. TEMPERATURA SOBRE LAS CONCENTRACIONES DE PM<sub>2.5</sub>.

El comportamiento térmico registrado el 16 de agosto en Tuxtla Gutiérrez (grafica) muestra una evolución diurna típica de condiciones de cielo despejado y radiación solar intensa. La temperatura inicio en 26.58°C, a las 00:00 horas, ascendió de forma continua hasta alcanzar un máximo de 33.88°C, a las 12:00 horas y posteriormente descendió hacia 23.99°C, a las 23:00 horas. Este patrón térmico tiene implicaciones directas sobre la dinámica de partículas finas en el ambiente urbano, especialmente en relación con los valores de PM<sub>2.5</sub> obtenidos en cinco puntos de muestreo entre las 7:00 y 11:00 horas.



**GRAFICA 4.** TEMPERATURA POR HORA REGISTRADA POR LA ESTACIÓN CENTRO. SINAICA, 2025.

La radiación solar es un factor clave en la dinámica atmosférica, ya que incide directamente en la temperatura superficial, la convección vertical y la formación de capas de inversión térmica.



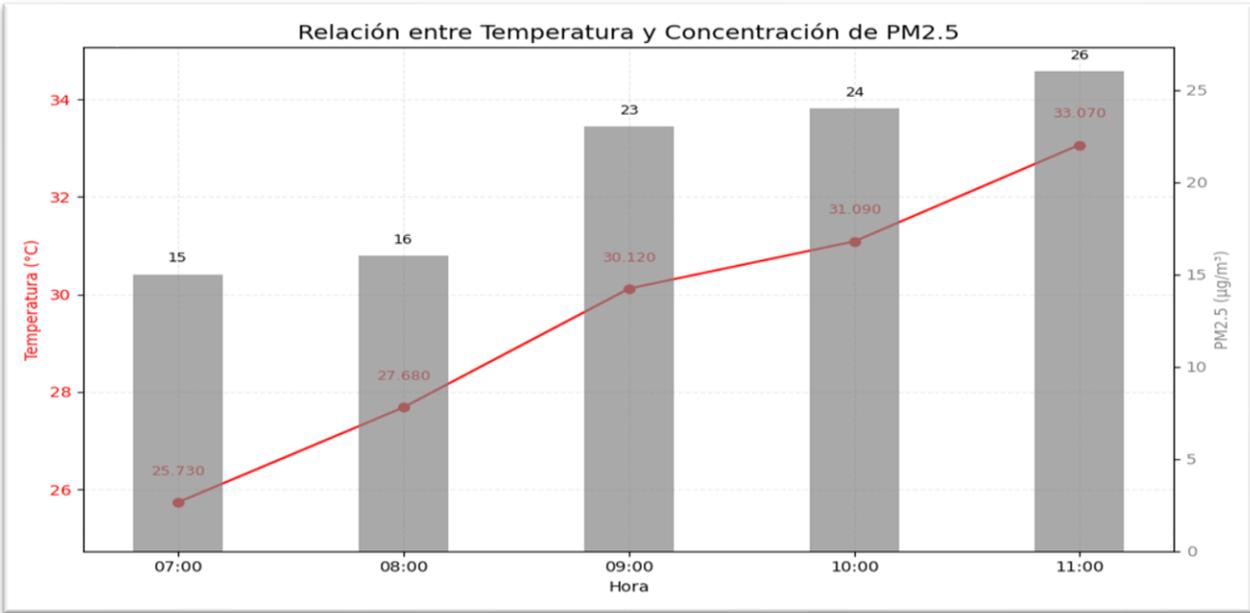
**GRAFICA 5.** RADLACIÓN SOLAR POR HORA. Fuente: SINAICA, 2025.

Durante la hora de medición la temperatura presento un incremento sostenido:

**TABLA 4.** TEMPERATURA EN LOS DISTINTOS HORARIOS DE MUESTREO.

Hora	Temperatura estimada (°C)	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
07:00 am	25.73	15
08:00 am	27.68	16
09:00 am	30.12	23
10:00 am	31.09	24
11:00 am	33.07	26

Donde se observa una correlación positiva entre el ascenso térmico y el incremento de PM<sub>2.5</sub>, lo cual sugiere que la temperatura actúa como moderador de la concentración de partículas en condiciones urbanas específicas.



**GRAFICA 6. RELACIÓN ENTRE TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN PM2.5.** Fuente: SINAICA, 2025.

### Mecanismo físico implicados.

Resuspensión térmica: El aumento de temperatura genera mayor energía superficial, favoreciendo la liberación de partículas depositadas en el suelo, especialmente en zonas con tránsito vehicular, maquinaria pesada o superficies secas.

Inversión térmico residual: En las primeras horas del día, puede persistir una capa de aire frío cerca del suelo que limita la dispersión vertical de contaminantes. A medida que la temperatura asciende, esta capa se rompe, pero puede generar acumulación temporal de partículas.

Ausencia de precipitación: La falta de lluvia durante el periodo de la medición impide la depuración atmosférica por lavado de partículas, lo que permite que las concentraciones se mantengan elevadas.

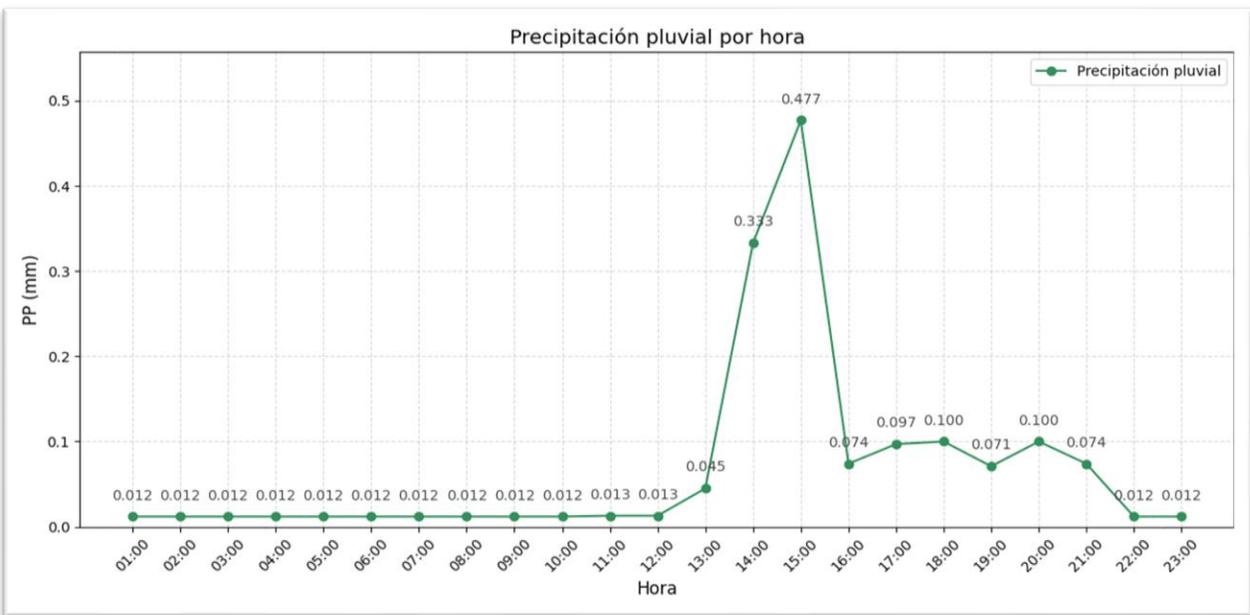
## Implicaciones para el diagnóstico ambiental.

La temperatura no actúa de forma aislada, pero su evolución diaria modulador clave en la dinámica de material particulado en este caso, el ascenso térmico matutino, combinado con condiciones territoriales específicas (transito, actividad mecánica, baja vegetación), favoreció la acumulación de partículas en zonas urbanas con baja ventilación.

### 9.1.6. PRECIPITACIÓN PLUVIAL SOBRE LAS CONCENTRACIONES DE PM<sub>2.5</sub>.

Durante el intervalo de muestreo comprendido entre las 7:00 y 11:00 horas del 16 de agosto, no se registraron eventos de precipitación pluvial de acuerdo con los datos de la estación meteorológica (gráfica). Esta condición de ausencia total de lluvia representa un escenario atmosférico relevante para la interpretación de los niveles de PM<sub>2.5</sub>, ya que permite evaluar la concentración de partículas en un entorno no modulado por proceso de lavado atmosférico.

La falta de precipitación implica que las partículas finas permanecen en suspensión sin interferencia de mecanismos de remoción de humedad, lo cual favorece su acumulación progresiva en la capa límite atmosférica, especialmente en condiciones de baja velocidad de viento o inversión térmica.



**GRAFICA 7.** PRECIPITACIÓN PLUVIAL POR HORA. Fuente: SINAICA, 2025.

La ausencia de lluvia también permite que las partículas emitidas durante la madrugada y primeras horas del día se mantengan activas en la atmosfera, sin ser arrastradas por gotas de agua ni depositadas en superficies. Además, en ausencia de precipitación, las partículas pueden interactuar con otros compuestos atmosféricos, formando agregados o aerosoles secundarios que incrementan la carga total de  $PM_{2.5}$ .

El hecho de que se haya registrado posteriormente a las 12:00 horas permite establecer una línea base no perturbada para el análisis de partículas, en síntesis, se desarrolló en bajo condiciones de cielo seco, lo cual implica acumulación libre de partículas finas.

### 9.1.7. PRESIÓN BAROMÉTRICA SOBRE LAS CONCENTRACIONES DE PM<sub>2.5</sub>.

Durante el periodo de muestreo comprendido entre las 7:00 y 11:00 horas, la presión barométrica presento un comportamiento relativamente estable, con valores que oscilaron entre 714.35 mmHg y 716.06 mmHg, Según la (grafica) horaria correspondiente al 16 de agosto. Este rango se encuentra dentro de los valores típicos para condiciones atmosféricas de estabilidad moderada en zonas urbanas de altitud media como Tuxtla Gutiérrez.



**GRAFICA 8.** PRESIÓN BAROMÉTRICA POR HORA. Fuente: SINAICA, 2025.

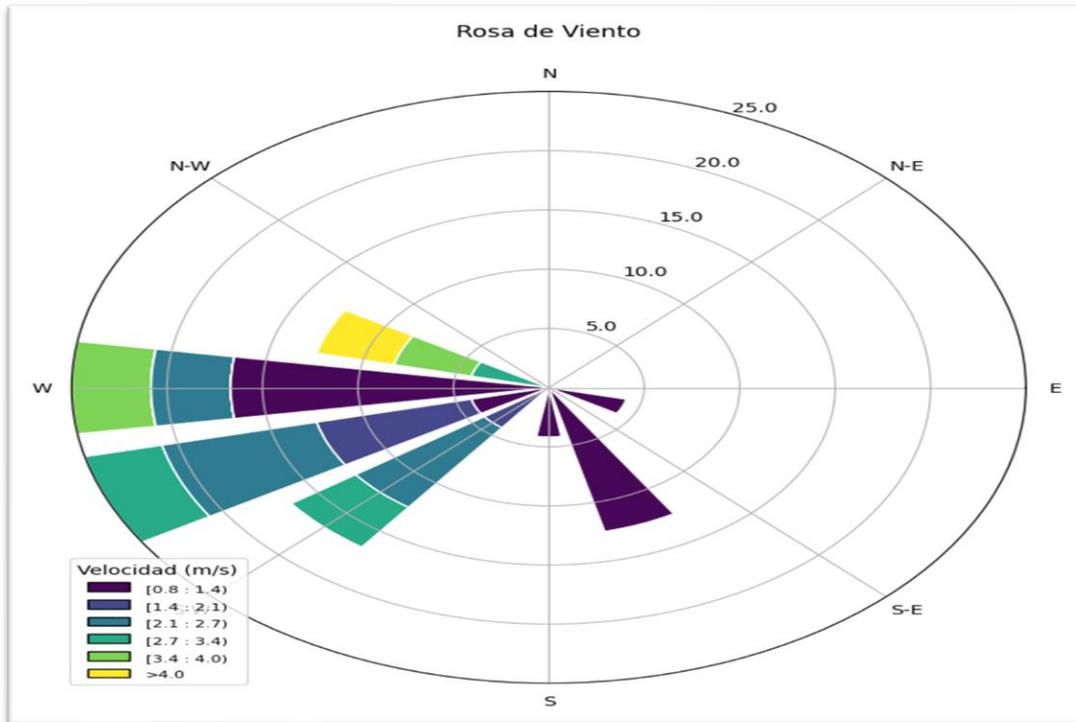
la presión barométrica actúa como indicador indirecto de la estabilidad vertical de la atmosfera. Valores elevados y sostenidos de presión suelen asociarse con condiciones de subsidencia, es decir, movimientos descendentes del aire que inhiben la convección vertical. Esta condición limita la dispersión de contaminantes en capas superiores y favorece su acumulación en la capa límite atmosférica, especialmente en entornos urbanos con alta emisión de partículas finas.

En el intervalo analizado, se observa una disminución progresiva de aproximadamente 1.19 mmHg en cuatro horas, lo cual indica una pérdida gradual de estabilidad atmosférica, aunque dentro de un rango aun considerado alto para condiciones urbanas de subsidencia. La presión barométrica elevada suele asociarse con movimientos descendentes del aire que inhiben la convección vertical, limitando la dispersión de contaminantes y favoreciendo su acumulación en la capa límite atmosférica.

En paralelo, las concentraciones de  $PM_{2.5}$  registradas en ese mismo intervalo muestran un incremento sostenido, pasando de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el punto centro hasta  $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el punto poniente. Este aumento progresivo de partículas finas en suspensión coincide temporalmente con el descenso de presión, lo que sugiere una correlación inversa débil entre ambas variables, sin embargo, dado que los valores de presión se mantuvieron elevados durante todo el periodo, no se puede atribuir el aumento de material particulado exclusivamente a la variación barométrica, la presión actuó como un modulador de estabilidad, generando condiciones favorables para la retención de contaminantes, mientras que el incremento de partículas estuvo influenciado por factores locales como el aumento de emisiones vehiculares, la actividad urbana y la limitada ventilación horizontal.

#### **9.1.8. DIRECCIÓN DEL VIENTO Y VELOCIDAD DEL VIENTO SOBRE LAS CONCENTRACIONES DE $PM_{2.5}$ .**

La rosa de vientos constituye una herramienta clave para interpretar la dinámica de dispersión de contaminantes atmosféricos, ya que sintetiza la frecuencia direccional y los rangos de velocidad del viento registrados en un periodo determinado. En el contexto de Tuxtla Gutiérrez, los datos que integran esta visualización reflejan una predominancia de flujos provenientes del oeste (W) y noroeste (NW), con velocidades que oscilan mayormente entre 2.1 y 5.7 m/s. Esta configuración direccional tiene implicaciones directas sobre la distribución espacial de partículas finas, particularmente  $PM_{2.5}$ , al determinar las trayectorias de transporte y las zonas de acumulación potencial.



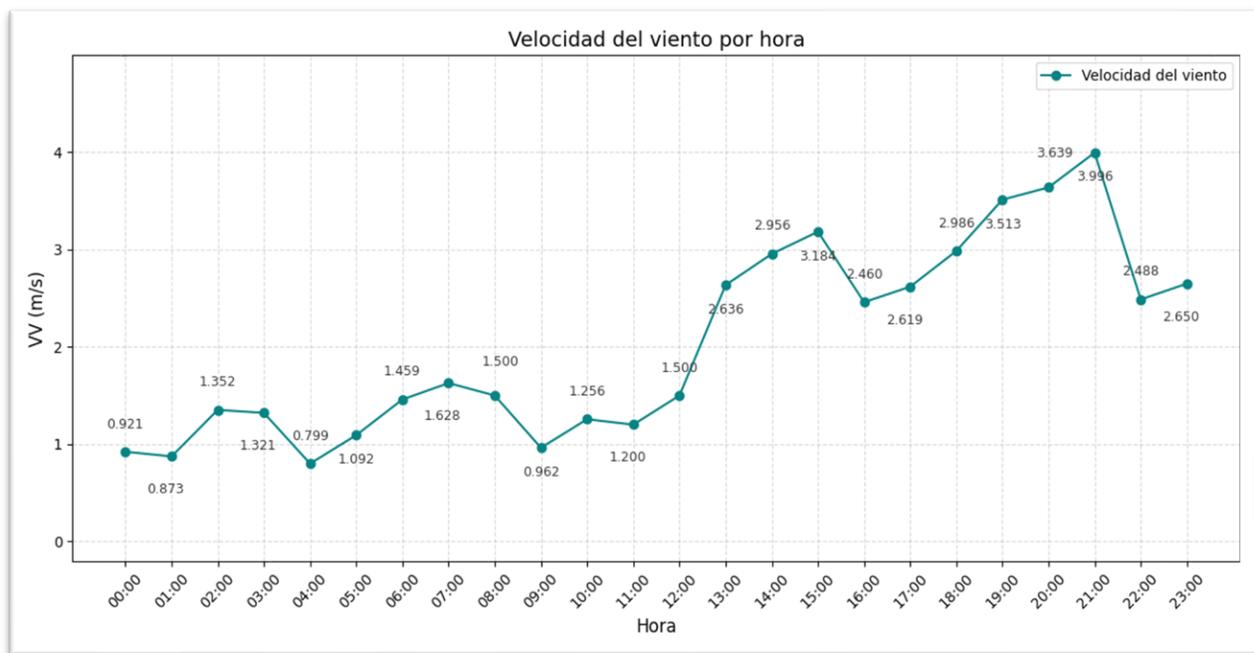
**GRAFICA 9. DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DEL VIENTO.** Fuente: SINAICA,

Durante el intervalo de muestreo entre las 07:00 y las 11:00 horas, se registraron concentraciones crecientes de material particulado en distintos puntos de la ciudad, alcanzando valores de hasta  $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el sector poniente. Al correlacionar estos resultados con los datos horarios de viento, se observa una transición direccional significativa:

- 07:00 h, el viento provenía del oeste ( $255^\circ$ ) con una velocidad de 1.62 m/s
- 08:00 h, del suroeste ( $240^\circ$ ) con 1.50 m/s
- 09:00 h, del suroeste ( $239^\circ$ ) con 0.96 m/s
- 10:00 h, del sureste ( $147^\circ$ ) con 1.25 m/s
- 11:00 h, del sureste ( $147^\circ$ ) con 1.20 m/s

Este patrón indica una rotación horaria del flujo atmosférico, desplazándose desde el oeste hacia el sureste conforme avanza la mañana. La rosa de vientos, al integrar estos datos, refleja una distribución direccional que abarca el rango  $147^\circ$  a  $255^\circ$ , lo que corresponde a sectores comprendidos entre el sureste y el oeste. Esta orientación favorece el arrastre de emisiones provenientes de áreas industriales, corredores logísticos o zonas de tránsito pesado ubicadas al poniente y suroeste de la ciudad, contribuyendo a la carga particulada observada en los puntos de muestreo.

Además, la velocidad del viento registrada en ese intervalo se mantuvo en un régimen débil, con valores entre 0.96 y 1.62 m/s. Bajo estas condiciones, el viento no actúa como agente dispersor eficiente, sino como modulador de acumulación localizada. La baja intensidad limita la capacidad de diluir las emisiones recientes, permitiendo que las partículas permanezcan en suspensión y se concentren en zonas con menor cobertura vegetal o infraestructura abierta.



**GRAFICA 10.** VELOCIDAD DEL VIENTO POR HORA. Fuente: SINAICA, 2025.

En este sentido, la rosa de vientos no solo indica la dirección predominante, sino que también permite inferir el grado de confinamiento atmosférico que favorece la persistencia de contaminantes en áreas específicas.

Desde una perspectiva territorial, la orientación del viento hacia el este y noreste durante las horas posteriores al muestreo como se observa en el gráfico horario extendido podría haber inducido una redistribución parcial de las partículas acumuladas, desplazándolas hacia zonas residenciales o escolares ubicadas en esos sectores. Esta hipótesis es relevante para el diagnóstico de exposición poblacional, ya que permite anticipar escenarios de afectación más allá del punto de emisión directa.

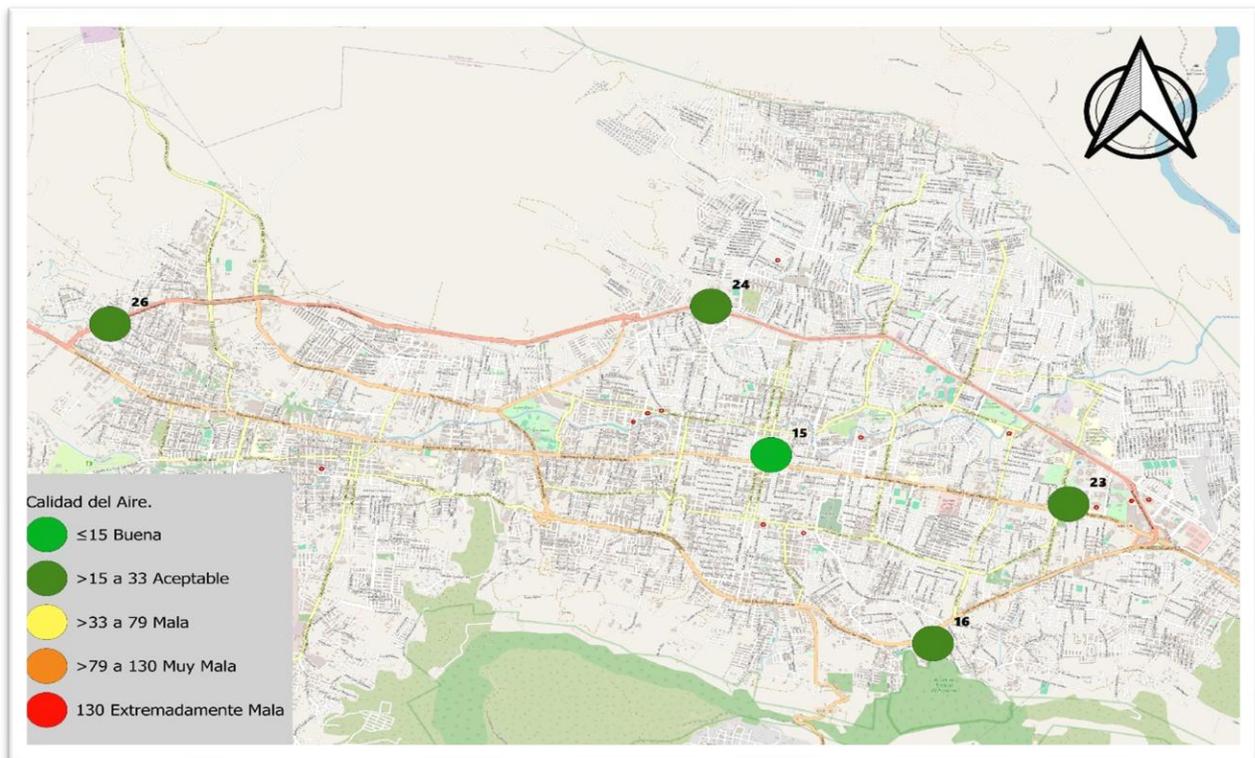


**GRAFICA 11. DIRECCIÓN DEL VIENTO POR HORA.** Fuente: SINAICA, 2025.

La transición de flujos desde el oeste hacia el sureste, combinada con velocidades débiles, favoreció la acumulación de partículas en sectores urbanos con alta actividad emisora y limitada ventilación. Esta interacción debe ser considerada en el diseño de estrategias de mitigación, delimitación de zonas críticas y evaluación de riesgo ambiental por exposición prolongada.

### 9.1.9. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PM<sub>2.5</sub> EN LA ZONA URBANA DE TUXTLA GUTIÉRREZ.

La representación cartográfica elaborada por los estudios realizados el 16 de agosto, permite visualizar con precisión la variabilidad espacial de las concentraciones de partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) en cinco puntos estratégicamente seleccionados dentro del área urbana de Tuxtla Gutiérrez. Cada ubicación fue georreferenciada y clasificada conforme a los rangos establecidos en la escala cromática, la cual distingue cinco niveles de calidad del aire: bueno, aceptable, malo, muy malo y crítico, codificados respectivamente en verde oscuro, verde claro, amarillo, naranja y rojo. Esta gradación facilita la identificación inmediata de zonas con mayor carga contaminante y permite establecer correlaciones territoriales con factores emisores y condiciones meteorológicas locales.



**FIGURA 18.** MAPA DE CALIDAD DEL AIRE EN CADA PUNTO DE MUESTREO. Fuente: Santos y Hernández, 2025.

El punto con mayor nivel de partículas se localizó en el sector poniente, con una concentración de 26 µg/m<sup>3</sup>, clasificada como “muy mala” según los umbrales de referencia. En contraste, el punto central presentó una concentración de 15 µg/m<sup>3</sup>, correspondiente a una calidad “aceptable”. Esta diferencia

evidencia la heterogeneidad espacial de la contaminación atmosférica, influenciada por la dinámica urbana, la morfología del terreno y la dirección predominante del viento.

La cartografía no solo cumple una función descriptiva, sino que constituye una herramienta analítica para el diagnóstico territorial. La distribución observada sugiere que las zonas con mayor concentración de partículas coinciden con áreas de alta densidad vehicular, escasa cobertura vegetal y presencia de infraestructura logística, como terminales de transporte y zonas de carga. Además, la orientación de los vientos principalmente del suroeste favorece el desplazamiento de contaminantes desde sectores emisores periféricos hacia el núcleo urbano, donde las condiciones de ventilación son limitadas, lo que propicia la acumulación de partículas en suspensión.

En conjunto, el mapa constituye una síntesis visual del comportamiento espacial de los contaminantes atmosféricos, integrando observaciones de campo, datos medidos y contexto territorial. Su análisis detallado permite comprender las dinámicas locales de dispersión, acumulación y exposición, aportando evidencia científica para el diseño de soluciones basadas en el territorio y orientadas a la mejora de la calidad ambiental urbana.

## **X.- DISCUSIONES.**

El desempeño del sensor PMS5003 en la detección de partículas  $PM_{2.5}$  ha demostrado ser funcional y confiable en las pruebas realizadas, con una correspondencia aceptable respecto a una estación fija. Sin embargo, se han identificado ciertas variaciones que podrían estar asociadas a su sensibilidad o a condiciones ambientales externas, la implementación de protocolos más estrictos de su calibración y control en el entorno de medición podría ayudar a reducir estas discrepancias y mejorar la precisión del sensor.

Si bien el sensor es eficaz en la medición de partículas suspendidas, el monitoreo de la calidad del aire sería más completo si se incorporara sensores específicos para gases contaminantes, como monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ), ozono ( $O_3$ ), estos gases pueden influir significativamente en la contaminación ambiental y en la salud pública, por lo que su medición complementaria permitirá una evaluación más precisa de las condiciones del aire. La combinación de sensores de monitoreo más sofisticada, capaz de ofrecer información detallada para estudios ambientales.

Desde un enfoque económico, el sensor representa una alta alternativa accesible, lo que permite su implementación en diversas aplicaciones sin incurrir en los altos costos de una estación fija. Sin embargo, sería recomendable explorar modelos híbridos que combinen sensores de partículas y gases en un solo sistema, optimizando la precisión del monitoreo sin aumentar significativamente la inversión. Para futuras investigaciones, se sugiere evaluar el rendimiento del sensor PMS5003 en distintas condiciones climáticas y ambientales, así como determinar su compatibilidad con sensores complementarios, con el objetivo de mejorar la fiabilidad de los datos y ampliar el alcance del monitoreo de calidad del aire.

## **XI.- CONCLUSIONES.**

El sensor PMS5003 mostro un desempeño adecuado en la detección de partículas  $PM_{2.5}$  en distintas condiciones experimentales. En la calibración y desempeño del sensor realizadas durante 27 días, los resultados evidenciaron una respuesta clara entre la presencia y ausencia de combustión, indicando que es capaz de detectar variaciones en las concentraciones de partículas 2.5 micrómetros ( $\mu m$ ). Asimismo, en las pruebas de vuelo controlado, los datos reflejaron una estabilidad adecuada, lo que sugiere que el sensor puede operar en condiciones dinámicas, sin perder precisión. La comparación con la estación fija evidencia que, aunque existen pequeñas diferencias en algunos registros, el sensor PMS5003 mantiene una correlación aceptable, lo que convierte en una opción confiable para la medición de partículas en el aire, la ausencia de datos en la estación fija el 17 de mayo del 2025 impidió el análisis comparativo en esa fecha, lo que resalta la importancia de contar con múltiples fuentes de referencias en estudios de las concentraciones de partículas suspendidas en el aire.

Desde el punto de vista económico, el sensor PMS5003 es significativamente más accesible que una estación fija, ya que su adquisición y mantenimiento requieren una inversión menor en equipos y calibración. Las estaciones fijas, aunque ofrecen datos con mayor precisión y estabilidad, implican costos elevados en infraestructura, instalación y mantenimiento periódico. En este sentido, el sensor representa una solución práctica y eficiente para aplicaciones de monitoreo ambiental en entornos donde no es viable implementar una estación fija.

Además de sus aplicaciones en investigación y monitoreo ambiental, el sistema de monitoreo móvil tiene potencial como instrumento didáctico para estudiantes y personas interesadas en el estudio de calidad del aire. Su bajo costo y facilidad de uso permiten que sea empleado en entornos educativos, facilitando la comprensión de los principios de medición de partículas y su impacto en la salud y el medio ambiente.

Asimismo, se considera indispensable implementar un esquema de monitoreo atmosférico multitemporal que abarque distintas estaciones del año, con el objetivo de capturar la variabilidad estacional en la concentración, transporte y asentamiento de partículas  $PM_{2.5}$  en el entorno urbano. Esta estrategia permitirá caracterizar con mayor precisión los patrones de dispersión asociados a condiciones meteorológicas. La generación de un mapa anual de distribución de partículas, en periodos cálidos, seco, húmedo, facilitara la identificación de áreas críticas recurrentes y la evaluación de riesgos diferenciados por temporalidad.

## XII.- REFERENCIAS.

Blanco-Jiménez S., Altúzar F., Jiménez B., Aguilar G., Pablo M. y Benítez M.A. (2015). Evaluación de Partículas Suspendidas PM2.5 en el Área Metropolitana de Monterrey. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). México. 39 pp.

Energía Natural. (n.d.). *Herramientas para monitorear el nivel de contaminación del medio ambiente*. Recuperado de <https://energianatural.one/contaminacion/herramientas-para-monitorear-el-nivel-de-contaminacion-del-medioambiente/#:~:text=Algunas%20de%20las%20tecnolog%C3%ADas%20utilizadas%20para%20medir%20la,por%C3%A1tiles%20que%20pueden%20ser%20utilizados%20sobre%20el%20terreno.>

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE (2020). Estudio de la fiabilidad de un sensor de particulado de bajo coste. CONAMA. <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2020/CT%202020/5317.pdf>

SEMARNAT. (2023). NOM-172-SEMARNAT-2023, secretaria del medio ambiente y Recursos Naturales, México.

Bonilla-Granados, CA, Sánchez-Delgado, AY, Rubio-Gómez, YM, & Cortez-Huerta, M. (2023). Niveles de concentración por PM2.5 mediante sensores de bajo costo. Caso de estudio: Pamplona, Colombia. Revista UIS Ingenierías, 22 (3), 29-38. <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n3-2023003>

Miranda Jeissy, M. L. (2020). Evaluación de la calidad del aire en la ciudad de Tacna mediante el uso de sensores de bajo costo. Universidad Privada de Tacna. <https://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/354/Miranda-Jeissy-Merma-Lizbeth.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

García, J., & López, M. (2023). Sistema de monitoreo de partículas suspendidas para determinar la calidad del aire utilizando herramientas IoT. Pistas Educativas, 45(2),123-135. <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/2943/2235>

Blanco-Jiménez S., Altúzar F., Jiménez B., Aguilar G., Pablo M. y Benítez M.A. (2015). Evaluación de Partículas Suspendidas PM2.5 en el Área Metropolitana de Monterrey. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). México. 39 pp.

Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural. (2023, septiembre 5). Chiapas avanza en la conservación de la biodiversidad. SEMAHN. [https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/noticias/ver\\_noticia/1728](https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/noticias/ver_noticia/1728)

Hahn, D.W. Light Scattering Theory; Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Florida: Gainesville, FL, USA, 2009.

Le, K.; Tingey, K.; Becnel, T.; Giallardon, P.; Butterfield, T. Building Air Quality Sensors & Inspiring Citizen Scientists. Chem. Eng. Educ. 2018, 52, 193–201.

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (2022). Importancia de Arduino. Con-Ciencia Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 3 <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa3/issue/archive>.

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6ª ed.). México: McGrwall Hill Education.

Yoon S, Chan W, Pulliam T, (2017). Computational of Torque-Balanced Coaxial Rotor Flows. American Institute of Aeronautics and Astronautics SciTech Forum in Grapevine.

Pöschl, U. 2005. Atmospheric Aerosols: Composition, transformation, Climate and Health effects. Angewandte Chemie International Edition 44: 7520-7540.

Manzanares, L. Echániz, G., López, M.A., Pérez, I.K. y Garibay, V. 2011. Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM2.5. INE, México. 103 pp.

Reyes Flores, E. (2019). Tipos de Sensores. Con-Ciencia Serrana, 2. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/ixtlahuaco/article/view/4405/6154>

López, M.T. y Pérez, I.K. 2014. Valoración económica de los beneficios a la salud de la población que se alcanzarían por la reducción de las PM2.5 en tres zonas metropolitanas mexicanas. INECC, México. 51 pp.

Solórzano-Plaza, H. A., Torres-Estacio, C. C., y Hernández-Martínez, J. S. (2017). Diseño de un robot aéreo móvil con un sistema de sensores inalámbricos para el monitoreo de gases tóxicos en el exterior de la refinería estatal de Esmeraldas. Polo Del Conocimiento, 2(12), 3-14. <https://doi.org/10.23857/pc.v2i12.406>.

Eslava-Pedraza, J. E., Martínez-Sarmiento, F. A., Soto-Vergel, Ángel J., Vera-Rozo, E. J., & Guevara-Ibarra, D. (2020). Diseño de un sistema de medición de material particulado mediante un vehículo aéreo no tripulado. *Aibi Revista De investigación, administración e ingeniería*, 8(S1), 1-15. <https://doi.org/10.15649/2346030X.800>.

Mazeh, H., Saied, M., & Francis, C. (2018). Development of a multicopter-based system for air quality monitoring. 3rd International Conference on Electrical and Biomedical Engineering, Clean Energy and Green Computing, EBCEGC 2018, 23–28. <https://doi.org/10.1109/EBCEGC.2018.8357127>.

Domínguez, A. (2020, febrero 25). Calidad del aire ya es monitoreada a diario en la Zona Metropolitana de Chiapas. *Chiapas Paralelo*. <https://www.chiapasparalelo.com/noticias/chiapas/2020/02/calidad-del-aire-ya-es-monitoreada-a-diario-en-la-zona-metropolitana-de-chiapas/>

Gallego Picó A., González Fernández, I., Sánchez Gimeno, B., Fernández Hernando, P., Garcinuño Martínez, R.M., Bravo Yagüe, J.C., Pradana Pérez, J.A., García Mayor, A. y Durand Alegría, J.S. 2012. Contaminación atmosférica. UNED, Madrid. 440 pp.

González-Santiago, O., Badillo-Castañeda, C.T., Kahl, J.D.W., Ramírez-Lara, E. y Balderas-Rentería, I. 2011. Temporal Analysis of PM10 in Metropolitan Monterrey, Mexico. *Journal of the Air & Waste Management Association* 61: 573-579.

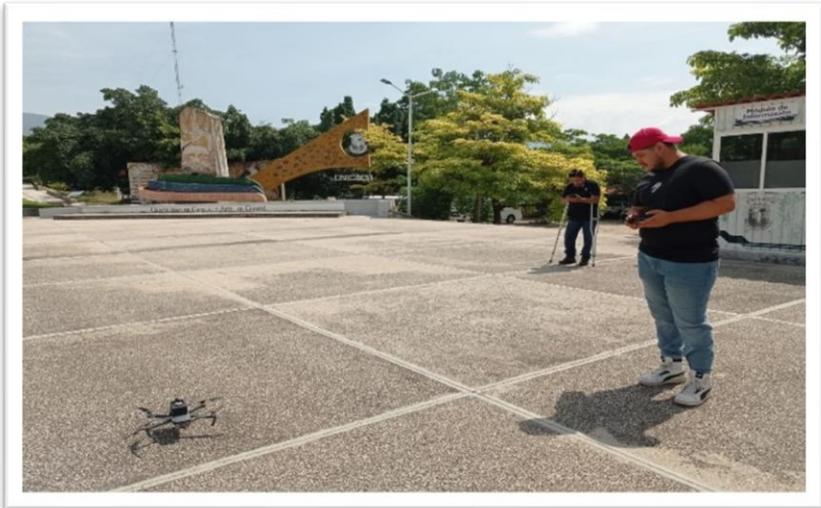
Badillo Castañeda, C. T. 2012. Caracterización del Contenido de Metales en Partículas PM2.5 en dos zonas del Área Metropolitana de Monterrey. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Nuevo León. 114 pp.

Martínez, M. A., Caballero, P., Carrillo, O., Mendoza, A. y Mejía, G.M. 2012. Chemical characterization and factor analysis of PM2.5 in two sites of Monterrey, Mexico. *Journal of the Air & Waste Management Association* 62: 817-827

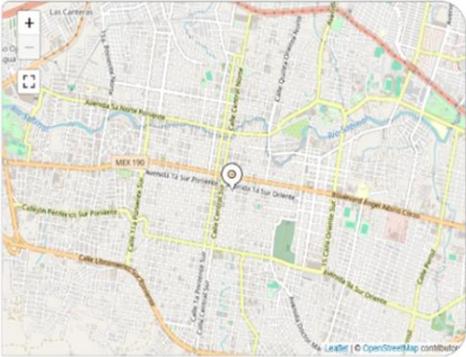
**XIII.- ANEXOS.**



Monitoreo aéreo, en los puntos establecidos de la ciudad.



**Estación: Palacio Municipal (PMN)**



<b>Sistema de monitoreo:</b>	Chiapas (CHIS)
<b>Red de monitoreo:</b>	Tuxtla Gutiérrez (TUX)
<b>Dirección postal:</b>	Calle: Central y Segunda Norte No. Exterior: S/N Colonia: Centro CP: 29000 Estado: Chiapas Municipio: Tuxtla Gutiérrez
<b>Coordenadas:</b>	16.75 N, 93.11 O
<b>Altitud:</b>	0 msnm
<b>Zona horaria:</b>	Tiempo del centro (UTC-6 todo el año)
<b>Último envío de datos:</b>	2025-05-16 08:10:00 (Tiempo del centro)
<b>Personal:</b>	Ing. Ramón Corzo Toledo Encargado de la estación de monitoreo de la calidad del aire corzoramonitoledo@gmail.com

Recolección de datos de la página estación centro

<b>60</b>	<b>40</b>	<b>30</b>
<b>64</b>	<b>40</b>	<b>46</b>
<b>67</b>	<b>40</b>	<b>40</b>
<b>63</b>	<b>41</b>	<b>38</b>
<b>65</b>	<b>40</b>	<b>36</b>
<b>60</b>	<b>40</b>	<b>41</b>
<b>65</b>	<b>43</b>	<b>35</b>
<b>61</b>	<b>45</b>	<b>44</b>
<b>64</b>	<b>44</b>	<b>39</b>
<b>66</b>	<b>44</b>	<b>37</b>
<b>63.5</b>	<b>41.7</b>	<b>38.6</b>
<b>2.460803843</b>	<b>1.95192213</b>	<b>4.57529598</b>

Datos obtenidos por el sensor PMS5003