UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

División Académica de Ciencias Biológicas

MONITOREO DE LÍNEA BASE DE LA CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN LA CARRETERA VILLAHERMOSA-LA ISLA

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

KEVIN ALEJANDRO ISIDRO GÓMEZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

MIPA. SERGIO RAMOS HERRERA

Villahermosa, Tabasco. Octubre de 2026

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día **21 de octubre del 2026**, el que suscribe **Kevin Alejandro Isidro Gomez** alumno del Programa de **Ingenieria Ambiental** con número de matrícula **212G24049** adscrito a la **División Académica de Ciencias Biológicas** de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como **autor(a)** del **trabajo recepcional (Tesis)** presentado para la obtención del título de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, titulado **MONITOREO DE LINEA BASE DE LA CONCENTRACION DE MATERIAL PARTICULADO EN LA CARRETERA VILLAHERMOSA-LA ISLA** dirigido por el M.I.P.A. Sergio Ramos Herrera.

DECLARO QUE:

El trabajo recepcional (**Tesis**) es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido del Desarrollo Tecnológico presentado de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a **21 de octubre del 2026** .

Nombre y Firma del egresado

Kevin Alejandro Isidro Gomez

Villahermosa, Tab., a 16 de Octubre de 2026

ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. KEVIN ALEJANDRO ISIDRO GOMEZ** egresado de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: **"MONITOREO DE LÍNEA BASE DE LA CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN LA CARRETERA VILLAHERMOSA-LA ISLA".**

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADEMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

OCTUBRE 16 DE 2026

C. KEVIN ALEJANDRO ISIDRO GOMEZ
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL
P R E S E N T E

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 111 al 113 del Cap. IV del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"MONITOREO DE LÍNEA BASE DE LA CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN LA CARRETERA VILLAHERMOSA-LA ISLA",** asesorado por el MIPA. Sergio Ramos Herrera, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el Dr. Raúl German Bautista Margulis, Dra. Liliana Pampillón González, MIPA. Sergio Ramos Herrera, MIPA. Elías de la Cruz Luna y M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar.

A T E N T A M E N T E
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

C.c.p.- Expediente del Alumno.
Archivo.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

Villahermosa, Tab. 15 de octubre de 2026

C. KEVIN ALEJANDRO ISIDRO GOMEZ
Pas. de la Lic. en Ingeniería Ambiental
Presente

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se implementó la revisión del trabajo recepcional (**Tesis**), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad y el Código Institucional de Ética para la Investigación.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la revisión en la plataforma iThenticate de su Memoria de Trabajo **MONITOREO DE LÍNEA BASE DE LA CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN LA CARRETERA VILLAHERMOSA-LA ISLA.**

Se incluyó citas, se excluyó bibliografía y se estableció el umbral de exclusión de coincidencias pequeñas a 16 palabras.

RESULTADO DE SIMILITUD	**4 %**
	51 páginas y 10507 palabras

Finalmente, se le solicita al **C. KEVIN ALEJANDRO ISIDRO GOMEZ**, integrar en la versión final del trabajo recepcional, este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"ESTUDIO EN LA DUDA, ACCIÓN EN LA FE"

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

C.c.p. M.I.P.A. Sergio Ramos Herrera. Director de trabajo recepcional
C.c.p. Archivo

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

KEVIN ALEJANDRO ISIDRO GOMEZ

MONITOREO DE LÍNEA BASE DE LA CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN LA CARRETERA VILLAHERMOS...

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::3117:639052129

Fecha de entrega
14 oct 2026, 3:39 p.m. GMT-6

Fecha de descarga
19 oct 2026, 9:51 a.m. GMT-6

Nombre del archivo
KEVIN ALEJANDRO ISIDRO GOMEZ_TR tesis.pdf

Tamaño del archivo
1.8 MB

51 páginas

10.507 palabras

55.568 caracteres

4% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 16 palabras)
- Abstract
- Trabajos entregados

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

4% Fuentes de Internet
0% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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

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

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Fuentes principales

4% Fuentes de Internet
0% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	
www.coursehero.com		1%
2	Internet	
www.scielo.org.mx		<1%
3	Internet	
diariooficial.gob.mx		<1%
4	Internet	
espanol.epa.gov		<1%
5	Internet	
upcommons.upc.edu		<1%
6	Internet	
laccei.org		<1%
7	Internet	
core.ac.uk		<1%
8	Internet	
hdl.handle.net		<1%
9	Internet	
qdoc.tips		<1%

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco de 21 de octubre del 2026.

Por medio de la presente manifiesto haber colaborado como AUTOR(A) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada **MONITOREO DE LINEA BASE DE LA CONCENTRACION DE MATERIAL PARTICULADO EN LA CARRETERA VILLAHERMOSA-LA ISLA** Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES

Kevin Alexander Isidro Gomez

Nombre y Firma del egresado

Sergio Ramos H.

Nombre y Firma del Director de trabajo recepcional

TESTIGOS

Galilea Mendez Ramirez

Ianna Meraris Castillo Rodriguez

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme llegar hasta esta etapa de mi vida, por darme la fortaleza, la paciencia, la perseverancia y la constancia necesarias para superar los obstáculos que se presentaron a lo largo de mi formación académica.

A mi familia, mi padre y mi madre, por ser una parte fundamental de este camino, por su apoyo y por acompañarme durante las distintas etapas de mi vida. Gracias por contribuir a que pudiera alcanzar esta meta tan importante, resultado de años de esfuerzo, dedicación y compromiso con mi formación profesional.

En especial, agradezco al profesor Sergio Ramos Herrera por su acompañamiento, dedicación y paciencia a lo largo de este trabajo. Gracias por sus consejos, por compartir sus conocimientos y por brindarme valiosas sugerencias que contribuyeron a fortalecer y enriquecer esta investigación. Su orientación y apoyo fueron fundamentales para su desarrollo y culminación.

A mis profesores, por compartir sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, que contribuyeron a mi desarrollo académico y personal. De manera especial, agradezco a quienes me brindaron su orientación y apoyo durante la elaboración de este trabajo de investigación, por su tiempo, sus observaciones y sus valiosas aportaciones.

A mi compañero Gerardo, quien ha estado a mi lado desde el inicio de esta carrera, brindándome su apoyo incondicional y acompañándome en cada etapa. Gracias por ser un pilar fundamental para afrontar y superar los desafíos que la universidad nos ha presentado. Agradezco su amistad, sus palabras de aliento y la motivación que me brindo para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Asimismo, agradezco a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y a la División Académica de Ciencias Biológicas por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente, así como por los conocimientos y experiencias adquiridos durante mi trayectoria universitaria, que han contribuido a mi crecimiento personal y profesional.

A mis primos Pedro y Mika, por su apoyo incondicional, comprensión y cariño a lo largo de este camino. Gracias por estar presentes, por brindarme palabras de aliento y por motivarme a superarme día con día, impulsándome a seguir adelante y a dar lo mejor de mí. Su apoyo ha sido muy valioso durante este proceso y forma parte importante de este logro, que comparto con ustedes con mucho cariño y gratitud.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, directa o indirectamente, contribuyeron a la realización de este trabajo y a la culminación de esta importante etapa. Cada experiencia, enseñanza y muestra de apoyo formó parte de este proceso que hoy me permite cerrar un ciclo y dar un paso más hacia mi futuro profesional.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por acompañarme a lo largo de este camino, por darme la fortaleza para continuar en los momentos difíciles, la sabiduría para aprender de cada experiencia y la perseverancia necesaria para no rendirme ante los obstáculos. Gracias por permitirme llegar hasta este momento y por darme la oportunidad de cumplir una de las metas más importantes de mi vida.

También me dedico este logro a mí mismo, por el esfuerzo, la disciplina y la constancia que me permitieron seguir adelante, incluso cuando el camino no fue sencillo. Por cada sacrificio realizado, por las dificultades que tuve que superar y por las veces que, a pesar del cansancio y las dudas, encontré la manera de continuar. Hoy reconozco todo lo que he aprendido y el crecimiento personal que he alcanzado durante esta etapa.

Esta tesis representa mucho más que la culminación de una carrera universitaria; simboliza una meta alcanzada, una etapa de transformación y la satisfacción de demostrarme que soy capaz de cumplir aquello que me propongo. Dedico este logro al joven que comenzó este camino con sueños y aspiraciones, y al profesionista en el que me he convertido a través del esfuerzo y la experiencia.

A Dios, por guiar mis pasos, y a mí mismo, por no dejar de caminar. Este logro es el reflejo de la fe, la perseverancia y la voluntad de seguir adelante.

A los que confiaron en mi cuando ni yo mismo lo hacía: gracias por ser mi anclo.

Kevin Alejandro Isidro Gómez

INDICE

INTRODUCCIÓN 4
OBJETIVO 7
Objetivo general 7
Objetivos específicos 7
HIPÓTESIS 7
ANTECEDENTES 8
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL 12
Material particulado 12
Contaminantes criterio 13
Tecnologías emergentes 14
Arduino 14
Microcontrolador ATmega328P 15
Sensor PMS5003 16
Análisis de varianza paramétrico y no paramétrico 17
METODOLOGÍA 20
Área de estudio 20
Medición de parámetros ambientales 22
Monitoreo de las concentraciones a lo largo de la carretera Villahermosa-La isla 23
Análisis de los datos generados 25
RESULTADOS 26
Curva de calibración 26
Resumes de estadísticos de material particulado, temperatura y humedad relativa 28
ANOVA de la distribución espacial de partículas PM10 y PM2.5, temperatura y humedad relativa 32
Prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis de la distribución espacial de partículas PM10 y PM2.5, temperatura y humedad 38
DISCUSIÓN 42
CONCLUSION 45

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

RECOMENDACIONES 47
GLOSARIO 48
REFERENCIAS 49
ANEXO 52
Presupuesto 52

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Índice de Tablas

Tabla 1. Cumplimiento gradual para los valores límite de PM10 y PM2.5 en el aire ambiente **13**
Tabla 2. Coordenadas de los puntos de monitoreo a lo largo del tramo carretero Villahermosa-La Isla y distancia entre cada uno. **21**
Tabla 3. Hardware del equipo de medición de partículas **22**
Tabla 4. Curvas de calibración para las concentraciones de PM10 medidas en µg/m3 por el sensor PMS5003. ..... **26**
Tabla 5. Modelos de calibración para PM2.5 ..... **27**
Tabla 6. Resumen estadístico de la concentración (en µg/m3) de PM10 en los 8 sitios de monitoreo en el tramo de carretera Villahermosa-La Isla. **29**
Tabla 7. Resumen estadístico de la concentración (en µg/m3) para PM2.5 en los 8 sitios de monitoreo en el tramo de carretera Villahermosa-La Isla. **29**
Tabla 8. Resumen estadístico de las concentraciones para T en los 8 sitios de monitoreo. **31**
Tabla 9. Resumen estadístico de las concentraciones para HR en los 8 sitios de monitoreo. **31**
Tabla 10. Análisis de varianza para PM10, PM2.5, temperatura y humedad. **34**
Tabla 11. Prueba de Tukey para PM10. ..... **35**
Tabla 12. Prueba de Tukey para PM2.5. ..... **35**
Tabla 13. Prueba de Tukey para Temperatura **38**
Tabla 14. Prueba de Tukey para Humedad Relativa **38**
Tabla 15. Prueba de Kruskal-Wallis para las partículas PM10, PM2.5, temperatura (T) y humedad relativa (HR). **39**
Tabla 16. Prueba de Wilcoxon para PM10. ..... **40**
Tabla 17. Prueba de Wilcoxon para comparaciones múltiples para PM2.5 ..... **40**
Tabla 18. Prueba de Wilcoxon para comparaciones múltiples para temperatura **41**
Tabla 19. Prueba de Wilcoxon para comparaciones múltiples para Humedad relativa **41**

Índice de Figuras

Figura 1. Arduino UNO **15**
Figura 2. Microcontrolador ATmega328P **16**
Figura 3. Sensor PMS5003 ..... **17**
Figura 4. Puntos de muestreo en la carretera Villahermosa-La Isla. **20**
Figura 5. La línea recta continua es la curva de calibración de los datos observados (puntos sobre la gráfica). **24**
Figura 6. Curvas de calibración de los modelos para PM10 y PM2.5. ..... **27**
Figura 7. Distribución de las concentraciones de material particulado PM10 y PM2.5 en el tramo carretero Villahermosa-La isla por sitio. **33**
Figura 8. Distribución de los datos de Temperatura y Humedad relativa en el tramo carretero Villahermosa-La isla por sitio. **37**

Universidad Autónoma de Tabasco.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Organización Panamericana de la Salud, los efectos de la contaminación del aire sobre la salud pueden ser a corto o largo plazo, siendo esta última la más significativa para la salud pública. De las muertes atribuibles a la contaminación atmosférica, el 36% son por cáncer de pulmón, el 35% por enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), el 34% por accidentes cerebrovasculares y el 27% por cardiopatías isquémicas (Organización Panamericana de la Salud, s.f.).

Debido a los efectos sobre la salud, el estudio de la contaminación del aire es un asunto de interés primordial que requiere, entre otras cosas, la necesidad de medir de forma continua la calidad del aire que respiramos en sitios de interés local, mediante monitoreos constantes y la difusión de la calidad del aire. Sin embargo, debido a lo costoso de utilizar equipos de grado de referencia como los que tiene normalmente una red de monitoreo atmosférico, se está optando por tecnologías emergentes como el empleo de detectores comerciales de bajo costo o el desarrollo de detectores con sensores de bajo costo (SBC) y Arduino. De acuerdo con la EPA, los sensores de bajo costo pueden usarse para localizar puntos criterios de contaminación, identificar fuentes de contaminación, complementar datos de monitoreo en sitios fijos, medir la exposición personal a los contaminantes, educar y mejorar la concienciación sobre la calidad del aire. Por lo tanto, el uso de tecnologías emergentes es una de las opciones más relevantes y significativas para el monitoreo de la calidad del aire (United States Environmental Protection Agency [EPA], 2021).

El monitoreo con SBC se ha vuelto una opción viable para muchos investigadores e interesados, por su fácil acceso e implementación. En ciudades en expansión como Villahermosa, Tabasco, la implementación de

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

estos sensores para recolectar información ampliaría la cobertura de los sistemas de monitoreo ambiental que tiene el gobierno del estado (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, s.f.). Por otro lado, permitiría evaluar la calidad del aire en puntos de interés, informar a la ciudadanía, generar conciencia sobre los riesgos para la salud asociados a la contaminación atmosférica y poder contribuir a la toma de decisiones y acciones para la protección de la salud pública y del ambiente. La relevancia del monitoreo atmosférico ha surgido para proteger la salud de la población a través de monitoreos continuos y la difusión del estado de la calidad del aire.

Por otro lado, los estudios de los últimos años indican que las fuentes móviles como los automóviles son las principales fuentes de material particulado (PM, por sus siglas en inglés), especialmente en ciudades grandes y zonas urbanas concentradas. Esto motiva este trabajo donde el objetivo es medir y realizar un análisis exploratorio de los datos de concentración de partículas PM10 y PM2.5 a lo largo del tramo carretero Villahermosa-La Isla, de aproximadamente 15 km. Este trabajo permitirá sentar las bases para el monitoreo de contaminantes en avenidas principales de la ciudad y tramos de carretera o debido a fuentes móviles en la ciudad de Villahermosa, Tabasco.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

OBJETIVO

Objetivo general

Establecer las primeras mediciones de la concentración de material particulado PM10 y PM2.5, complementadas con registros de temperatura y humedad relativa, a lo largo del tramo carretero Villahermosa-La Isla utilizando tecnología desarrollada con sensores de bajo costo y Arduino.

Objetivos específicos

- Adecuar un dispositivo de monitoreo de material particulado, temperatura y humedad para medición en carretera.
- Generar datos de concentración de material particulado, temperatura y humedad a lo largo del tramo de carretera bajo estudio mediante 8 puntos específicos a lo largo de la carretera Villahermosa-La Isla.
- Analizar estadísticamente los datos generados y comparar las concentraciones de las PM, temperatura y humedad relativa entre los diferentes puntos de monitoreo establecidos.

HIPÓTESIS

La concentración de material particulado PM10 y PM2.5 en uno más de los ocho sitios de monitoreo distribuidos a lo largo del tramo de carretera Villahermosa-La Isla es diferente de la de los otros siete.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

ANTECEDENTES

A nivel local, se ha avanzado en el monitoreo de partículas en Villahermosa, Tabasco con SBC. De la Cruz (2026), por ejemplo, desarrolló un sistema emisor-receptor para el monitoreo de PM10, PM2.5, humedad relativa y temperatura del aire utilizando los SBC PMS5003 y DHT22. El monitoreo fue principalmente en tres sitios representativos de la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), ubicada a un costado de la carretera Villahermosa-Cárdenas. Uno de estos fue al interior de la cafetería de la División y los otros dos fueron: el estacionamiento y la Unidad de Manejo Ambiental (UMA), que es una zona con vegetación y una laguna o pantano. Los rangos obtenidos para la cafetería, para PM10 y PM2.5, fueron de 200 µg/m³ a 500 µg/m³ y de 150 µg/m³ a 375 µg/m³, respectivamente, teniendo los valores máximos en horario de 9 am, hora en la que los estudiantes están concentrados en este espacio. En el estacionamiento, las concentraciones de PM10 y PM2.5 fueron de 27 µg/m³ a 49 µg/m³ y de 20 µg/m³ a 29 µg/m³; los valores máximos se presentaron a las 12 horas. En UMA se monitorearon de forma permanente las 24 horas del día, lo que permitió evaluar el cumplimiento de la norma NOM-025-SSA1-2021. La estación UMA registró un total de 47 días con datos válidos. Con base en los criterios establecidos por la NOM-025-SSA1-2021, para PM2.5 se presentaron 20 días en los que se superó el límite máximo permisible (41 µg/m³). Con respecto a PM10 únicamente se registraron 4 días que excedieron el límite máximo permisible (70 $\mu g/m^3$).

Otro estudio de monitoreo de partículas utilizando los mismos sensores que De la Cruz (2026) fue el realizado por Osorio (2025). Una diferencia en este trabajo fue que el dispositivo desarrollado contó con un sistema de registro de datos con frecuencia de medición de 1 minuto. Otra diferencia fue que Osorio (2025) utilizó este dispositivo para medir la concentración de PM2.5 y PM10, temperatura y humedad del aire en dos paradas escolares de transporte escolar, de la DACBIOL: una ubicada en un camino

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

de poco flujo vehicular (que llamo parada Local) y la otra ubicada en la carretera Villahermosa-Cárdenas donde el flujo de vehículos es continuo (que llamo Foránea). El monitoreo lo realizó en la mañana entre las 8 am y 2 pm debido a cuestiones de seguridad personal. En la parada Foránea la concentración de PM10 varió entre 52.7 $\mu g/m^3$ y 103.0 $\mu g/m^3$; mientras que para PM2.5 varió entre 81.4 $\mu g/m^3$ y 177.0 $\mu g/m^3$. En la parada local, las PM2.5 variaron entre 9.74 $\mu g/m^3$ y 43.0 $\mu g/m^3$ y las PM10 entre 0.64 $\mu g/m^3$ y 61.9 $\mu g/m^3$. En general, su estudio mostró que la concentración de partículas fue alta por la mañana, donde la afluencia de transporte es alta debido a que el transporte público y particular deja a los estudiantes frente a DACBIOL.

A nivel nacional, Rodríguez-Trejo et al. (2025) desarrollaron una estación de monitoreo geoambiental (EMGA) utilizando SBC para el monitoreo en tiempo real. La estación se habilitó con capacidad para medir temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, ruido ambiental, partículas PM1.0, PM2.5 y PM10. En particular, para medir la concentración del material particulado utilizó sensores *Plantower PMS5003*. Para mejorar las mediciones de este último sensor, se realizaron comparaciones de las concentraciones medidas por el sensor con las obtenidas con equipos de referencia. Las comparaciones se realizaron con las concentraciones promedio de 4 min, 30 min, 1 hora y 6 horas y en cada caso se midió el coeficiente de correlación. El resultado mostró una correlación entre 0.92 y 0.99 para las concentraciones promedio de 1 hora. En su trabajo, Rodríguez-Trejo et al. (2025), concluyeron que las estaciones EMGA pueden volverse una opción para el monitoreo rápido en ciudades grandes y pequeñas donde la cobertura de monitoreo sea escasa. Además, se concluyó que la calibración adecuada del equipo la debe hacer el usuario final de los datos. Esta conclusión es importante porque significa que una vez que se verifica que los valores medidos por el sensor son razonables, se puede generar información histórica que puede corregirse adecuadamente cuando se cuente con un equipo de referencia.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

A nivel internacional, Ninahuaman et al. (2022) usaron monitores de la calidad del aire de la marca PurpleAir PA-II para evaluar la variación temporal y las zonas fuente de PM2.5 en tres sitios de la ciudad de Huancayo, Perú. Ninahuaman et al. (2022) sometieron a pruebas estadísticas los datos obtenidos del Purple Air y evaluó los cambios temporales en la concentración de las partículas. Con la información recabada pudo realizar análisis para la época seca (mayo-septiembre) y época húmeda (octubre-abril) donde los promedios mensuales máximos de partículas se obtuvieron en la época seca con 37.2±15 $\mu g/m^3$ y 25 ± 15 $\mu g/m^3$ y los mínimos en la época húmeda con 13.4 ± 5 $\mu g/m^3$ y 8.20 ± 4 $\mu g/m^3$. Sus resultados fueron comparables con los monitoreos y trabajos anteriores del 2014, 2017 y 2019. Septiembre fue un mes crítico debido al aumento de incendios forestales y a los escases de precipitación. Los monitores Purple Air, según datos del fabricante disponibles *en https://www2.purpleair.com*, integran dos sensores PMS6003 para la medición de la concentración de partículas PM2.5, evidenciando la factibilidad de usar estos sensores en el monitoreo local.

De acuerdo con el artículo de Luna et al. (2017), en las últimas décadas han sido publicados varios trabajos de investigación en donde se muestra la correlación entre la disminución de la calidad de vida y el aumento de las enfermedades respiratorias y cardiovasculares con la contaminación atmosférica. Utilizando esta información y tomando en cuenta la escasez de estaciones de monitoreo y su alto costo, desarrollaron, equiparon y pusieron en marcha una estación de monitoreo de contaminación atmosférica portátil en el distrito de San Isidro, Lima, Perú. La estación de monitoreo fue equipada con sensores electroquímicos de bajo costo de la marca *Asense* para medir principalmente los gases SO2, CO2 y CO y variables meteorológicas, como: temperatura, humedad y presión atmosférica. Utilizando una red neuronal artificial llamada Levenberg-

Marquardt, evaluaron el desempeño de los sensores y los errores porcentuales absolutos medios. También predijeron que los sensores estuvieron dentro de los rangos esperados. Esto pone de manifiesto que el uso adecuado de herramientas matemáticas puede evaluar el desempeño de los SBC.

Es evidente que ante la falta de equipos de referencia para el monitoreo de la calidad del aire se está optando por emplear monitores comerciales de bajo costo o desarrollar su propio equipo utilizando SBC. En el caso de los monitores comerciales, aunque vienen calibrados de fábrica, el usuario final los calibra de nuevo con algún equipo de referencia para garantizar un desempeño adecuado. Por lo anterior, estas mediciones han permitido establecer niveles de la calidad del aire, detectar fuentes y aumentar la densidad de una red de monitoreo de la calidad del aire.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

Material particulado

EL material particulado (PM por sus siglas en inglés) es una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire, las cuales solo se detectan mediante el uso de microscopio (EPA, 2025). Por su tamaño, llegan a contener sólidos microscópicos y gotas de líquido que, por su tamaño, se pueden inhalar fácilmente y provocan graves problemas de salud en las vías respiratorias y también cardiovasculares (EPA, 2025).

El material particulado se clasifica de acuerdo con el diámetro de la partícula principalmente en:

- PM2.5. Son las partículas que tienen un diámetro de 2,5 micrómetros o menos. Estas partículas pueden desplazarse dentro de los pulmones, llegando a causar problemas de salud como enfermedades cardíacas y respiratorias (OEHHA, s. f.).
- PM10. Son partículas de diferente composición y tamaño con diámetro menor o igual a 10 micrómetros. Estas partículas se pueden generar de forma natural o antropogénica (Eurofins Environment Testing Spain, 2026).

La contaminación atmosférica puede ser originada de forma natural y antropogénica, siendo las principales fuentes antropogénicas. El material particulado es de mucha importancia, ya que con una exposición prolongada favorece el desarrollo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, aumentando la morbilidad, mortalidad y repercutiendo en la esperanza de vida (Cintia et al., 2022).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Contaminantes criterio

Los contaminantes criterio son aquellos contaminantes normados a los que se han establecido límites máximos permisibles de concentración en el aire ambiente para proteger la salud humana y asegurar el bienestar de la población. Los principales contaminantes criterio son las partículas PM10 y PM2.5, el ozono (O_3), el dióxido de azufre (SO_2), el dióxido de nitrógeno (NO_2), el monóxido de carbono (CO) y el plomo (Pb). Estos contaminantes provienen de fuentes naturales y de la quema de combustibles fósiles, entre otras fuentes (Gobierno del Estado de Veracruz, s. f.).

La normatividad mexicana ha establecido límites máximos permisibles para los contaminantes criterio. Estas normas sirven como referencia para determinar niveles aceptables de contaminación y establecer acciones por parte de la autoridad competente cuando los limites son excedidos. La NOM-025-SSA1-2021 establece valores de Límites máximos permisibles para las PM10 y PM2.5. La tabla 1 contiene un resumen de las especificaciones de la NOM-025.

Tabla 1. Cumplimiento gradual para los valores límite de PM10 y PM2.5 en el aire ambiente

Contaminante	Concentración	Año 1ª	Año 3ª	Año 5ª
PM10	24 h	70	60	50
(µg/m3)	Anual	36	28	20
PM2.5	24 h	41	33	25
(µg/m3)	Anual	10	10	10

Tecnologías emergentes

Son avances y desarrollos en el campo tecnológico que han estado surgiendo y evolucionando en diversos campos rápidamente, donde impactan significativamente en mercados y productos ya existentes. Se caracterizan por su capacidad de superar barreras técnicas y abrir oportunidades en diversos sectores, donde se puede adoptar una productividad, calidad y sostenibilidad más altas y menos costosas (Instituto SISE, s. f.).

Los SBC son tecnologías emergentes para el análisis de la calidad del aire pertinentes para la formulación de políticas, incluidos los niveles de contaminación, la identificación de fuentes y las alertas ambientales (World Meteorological Organization, 2024). En las regiones que carecen de dispositivos de monitoreo de grado de referencia, las tecnologías emergentes sobresalen como una opción viable para obtener datos los cuales puedan compararse con otras regiones.

Arduino

Arduino es la plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre, lo que la hace accesible para el público. La placa incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines hembra, los cuales permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores por medio de cables Dupont principalmente. La placa electrónica es una PCB, por sus siglas en inglés, o placa de circuito impreso, la cual tiene una superficie plana fabricada con un material no conductor. Esta placa consta de distintas capas de material conductor, siendo un PCB la forma más compacta y estable de construir un circuito electrónico.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Arduino es libre y extensible, lo cual conlleva que el usuario pueda controlar el hardware de manera que pueda interactuar con él libremente. Existe también un extenso ecosistema de placas no oficiales para distintos propósitos y librerías de software de terceros de modo que se pueda seleccionar el que mejor se adapte al objetivo de un proyecto de bajo costo.

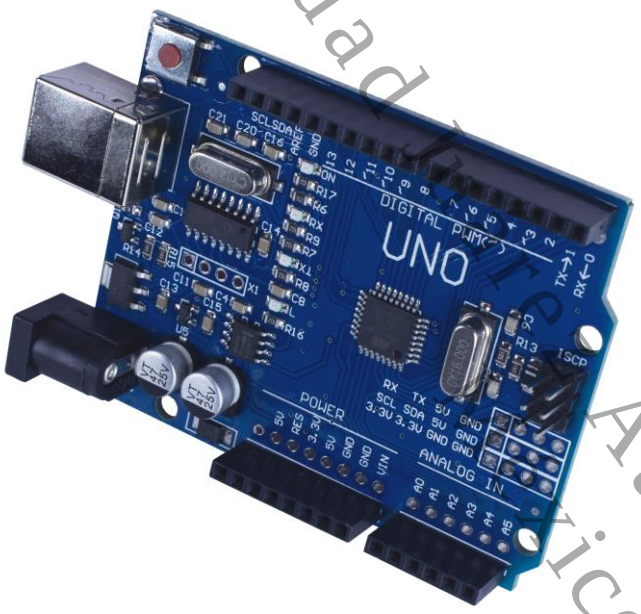


Figura 1. Arduino UNO

Fuente:https://www.geekfactory.mx/producto/tarjeta-compatible-con-arduino-uno-r3/?srsltid=AfmBOoo9v5uTeaEAUkQooHrPrkeWbDsuY2aqzaYlQagGJKbeEF6XSFBQ

Microcontrolador ATmega328P

El microcontrolador ATmega328P tiene una arquitectura tipo AVR, la cual fue desarrollada por Atmel. Siendo este el microcontrolador usado en el Arduino UNO y competencia de otros microcontroladores de arquitectura PIC siendo estos más limitados. En cambio, ATmega328P son más capaces y sus límites son mayores.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

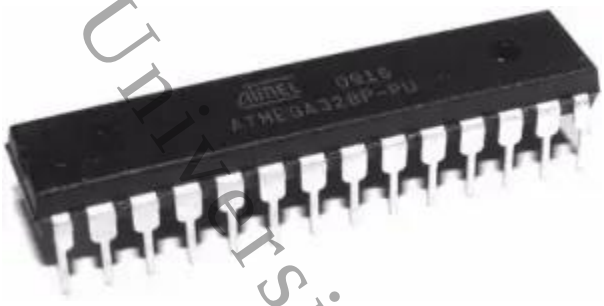


Figura 2. Microcontrolador ATmega328P

Fuente:https://arduino.cl/que-es-arduino/?srsltid=AfmBOoq4lPy0Lep63yTEijgGRxzEw2A3KoQ9nWScmtDajx8WbYhzV1-t.

Sensor PMS5003

El PMS5003 es un sensor diseñado para medir las partículas desde los 0.3 micrómetros hasta 10 micrómetros utilizando un láser interno y un fotodiodo para medir la cantidad de luz dispersada por las partículas en el aire, lo cual permite calcular la concentración. Este sensor se conecta a Arduino mediante protocolo de comunicación serial (González Chavarría, 2024).

El sensor PMS5003 emplea un diodo láser para generar un haz de luz que se dispersa al entrar en contacto con cualquier partícula. Utiliza esta dispersión para calcular su concentración en la atmósfera (He et al. 2020, Kaur et al. 2023). Mediante esta técnica, el sensor es capaz de diferenciar partículas inferiores a 2.5 micras e inferiores a 10 micras. Internamente, emplea un algoritmo para compensar las interferencias en las mediciones, asegurando precisión en los resultados, teniendo un rango efectivo de 0-500 $\mu g/m^3$ y un máximo de 1000 $\mu g/m^3$ a una resolución de 1 $\mu g/m^3$. Su error estándar máximo asociado es más menos 10% a 0-100 $\mu g/m^3$.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México



Figura 3. Sensor PMS5003

Fuente: (González Chavarría, 2024).

Análisis de varianza paramétrico y no paramétrico

El análisis de varianza (ANOVA) es una prueba estadística paramétrica utilizada para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de dos o más grupos (Field, 2018). Para aplicar la prueba, debe cumplirse que las muestras provienen de poblaciones normales e independientes con una varianza común. Esta prueba utiliza el estadístico F de Fisher-Snedecor y su correspondiente valor p para evaluar la hipótesis nula, la cual establece que no existen diferencias significativas entre los grupos evaluados, por lo que las diferencias observadas pueden atribuirse a la variabilidad de los datos. La hipótesis alternativa es que al menos una de las muestras difiere de las otras.

Para determinar si se rechaza o no la hipótesis nula, se utiliza el valor p y un nivel de significancia establecido α, normalmente igual a 0.05. Cuando $p<0.05$, se rechaza la hipótesis nula y se considera que hay suficiente evidencia para apoyar la hipótesis alternativa. Si $p>0.05$, se concluye que no existe suficiente evidencia para poder rechazar la hipótesis nula (Montgomery, 2017).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Si el ANOVA presenta diferencias significativas, se puede aplicar la prueba de Tukey, la cual es una prueba de comparaciones múltiples que se utiliza para determinar específicamente entre cuáles grupos existen diferencias estadísticas. La interpretación se realiza mediante el valor p ajustado. Cuando $p<0.05$, se considera una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los dos grupos comparados, mientras que un $p>0.05$ indica que no existe evidencia suficiente para establecer una diferencia significativa (Field, 2018).

La prueba de Kruskal-Wallis es una prueba estadística no paramétrica usada para comparar tres o más grupos independientes. En esta prueba no se asume ningún tipo de distribución conocida para la población de donde provienen las muestras. La hipótesis nula y alternativa son semejantes a las hipótesis en la prueba ANOVA. Cuando el tamaño de las muestras es grande ($n>=50$), el estadístico de la prueba, H, tiene aproximadamente una distribución chi-cuadrada. La prueba de Kruskal-Wallis es una prueba basada en rangos, no en el valor promedio de la muestra, por lo que no requiere asumir, por ejemplo, que los datos provienen de una distribución normal (Jiang, 2022).

Al igual que la ANOVA, la prueba de Kruskal-Wallis no determina que muestra o muestras difieren. Por tal motivo, se requiere aplicar una prueba por pares, como la prueba de Wilcoxon de suma de rangos, también llamada prueba de Mann-Whitney U. La prueba de rangos de Wilcoxon para grupos independientes es una prueba no paramétrica utilizada para poder determinar si existen diferencias entre dos grupos independientes, usada cuando no se cumplen los supuestos requeridos para las pruebas paramétricas. El estadístico de prueba puede ser la suma de rangos U, que es una medida basada en rangos, de la separación que hay entre las muestras. La hipótesis nula es que las muestras provienen de poblaciones que tienen la misma distribución, contra la alternativa de que tienen

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

distribuciones diferentes. La interpretación de la prueba también se puede hacer mediante el valor p: 1) $p<0.05$, se rechaza la hipótesis nula y se considera que existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos comparados; 2) $p>0.05$ indica que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula (Rivera, 2020).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

METODOLOGÍA

Área de estudio

Este estudio se realizó en un tramo de la carretera 180 que va de la salida de Villahermosa a La Isla, cuya orientación aproximada es de este a oeste (Figura 4). El tramo de aproximadamente 15 km tiene tráfico fluido las 24 horas del día y a lo largo del mismo se encuentran estaciones de servicio, parque industrial, empresas y así por el estilo.



Figura 4. Puntos de muestreo en la carretera Villahermosa-La Isla.

Los puntos de monitoreos seleccionados fueron ocho, distribuidos a lo largo de la carretera Villahermosa-La Isla. Cada punto fue identificado con los siguientes nombres: Foránea (iniciando desde el este), Plaza, JonhDeere, Olmeca, Comedor, Barbacoa, LAMAR e Isla (hacia el oeste). Los sitios se establecieron aproximadamente cada 2 km, con el propósito de obtener una mayor distribución espacial de las concentraciones de material particulado a lo largo del tramo estudiado.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

En cada punto de monitoreo, el vehículo se ubicó a una distancia de 1 a 2 m de la cinta asfáltica. El sensor se colocó a una altura de 1 metro sobre el toldo del vehículo, buscando mantener una altura de muestreo parecida en cada sitio. Asimismo, durante el monitoreo de cada punto se mantuvo el motor del vehículo apagado, con el propósito de reducir las posibles interferencias o aportes de partículas generados por el propio vehículo.

En la tabla 2 se muestran las coordenadas geográficas correspondientes a los ocho puntos de monitoreo establecidos a lo largo del tramo carretero Villahermosa-La Isla y su respectiva distancia, tomando como el km 0 sitio Foránea.

Tabla 2. Coordenadas de los puntos de monitoreo a lo largo del tramo carretero Villahermosa-La Isla y distancia entre cada uno.

Punto de monitoreo	Latitud	Longitud	Distancia (km)
Foránea	17°59'19.53"N	92°58'25.07"O	0
Plaza	17°59'14.51"N	92°59'21.55"O	1.65
JonhDeere	17°59'2.61"N	93° 0'34.66"O	3.85
Olmeca	17°58'51.53"N	93° 1'54.85"O	6.24
Comedor	17°58'45.08"N	93° 3'21.24"O	8.80
Barbacoa	17°58'40.06"N	93° 4'51.40"O	11.45
LAMAR	17°58'32.79"N	93° 6'18.88"O	14.05
Isla	17°58'25.46"N	93° 7'44.83"O	16.60

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Medición de parámetros ambientales

En este trabajo se midieron la concentración de partículas PM2.5, PM10, temperatura (T) y humedad relativa del aire (HR). La presión atmosférica solo se midió en el sitio DACBIOL ya que es un parámetro que varía principalmente con la altitud. Para realizar las mediciones se utilizó un dispositivo electrónico que emplea SBC.

El equipo fue desarrollado en trabajos previos de tesis de licenciatura y el método empleado para asegurar los datos fue mediante tarjeta de memoria microSD (Osorio, 2025) o vía bluetooth desde un equipo emisor a otro equipo receptor equipado con un sistema de registro de datos a tarjeta también microSD (De la Cruz, 2026). Sin embargo, este equipo se programó para que funcionara en modo bluetooth con envío de datos cada minuto a un teléfono celular con sistema operativo Android. El equipo contó principalmente con un sensor PMS5003 para la medición de material particulado y un sensor DHT22 para la medición de la temperatura y la humedad relativa del aire. La tabla 3 muestra el hardware que contendrá el dispositivo.

Tabla 3. Hardware del equipo de medición de partículas.

Hardware	Función
Arduino UNO	Tarjeta controladora y programable
PMS5003	Concentración de partículas en $\mu g/m^3$
DHT22	Temperatura y humedad relativa en °C y % respectivamente
HC-05	Comunicación bluetooth con Android
Powerbank	Fuente de alimentación
Caja estanca	Encapsulado del equipo

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Para la programación del dispositivo se utilizó el software libre Arduino IDE. En esencia, el programa permitió leer los datos y enviarlos vía bluetooth a un receptor, en este caso, un teléfono celular. Para la recepción de datos con el teléfono celular se utilizó la aplicación *Serial Bluetooth Terminal* disponible de forma gratuita en *Playstore*. Mediante esta aplicación el teléfono celular recibió los datos enviados por el equipo.

Monitoreo de las concentraciones a lo largo de la carretera Villahermosa-La isla

Una vez que se tuvo el equipo adaptado, el sensor PMS5003 se calibró con un monitor de partículas marca Temtop. Este equipo tiene un sistema de registro de datos con almacenamiento automático y descarga de archivo a computadora. La calibración se realizó en las instalaciones de la DACBIOL. El procedimiento que se siguió consistió en poner ambos equipos a medir simultáneamente desde la mañana (8 am) hasta la tarde (1 o 2 pm) en el estacionamiento de la DACBIOL. Con los datos generados se realizaron gráficas de dispersión y se ajustaron líneas de tendencia lineal y cuadrática con la concentración de partículas medida por el sensor, la temperatura y la humedad relativa del aire como variables regresoras. La línea o curva de tendencia fue la curva de calibración del equipo. Con esta curva de calibración se corrigieron las lecturas de concentración del sensor PMS5003.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

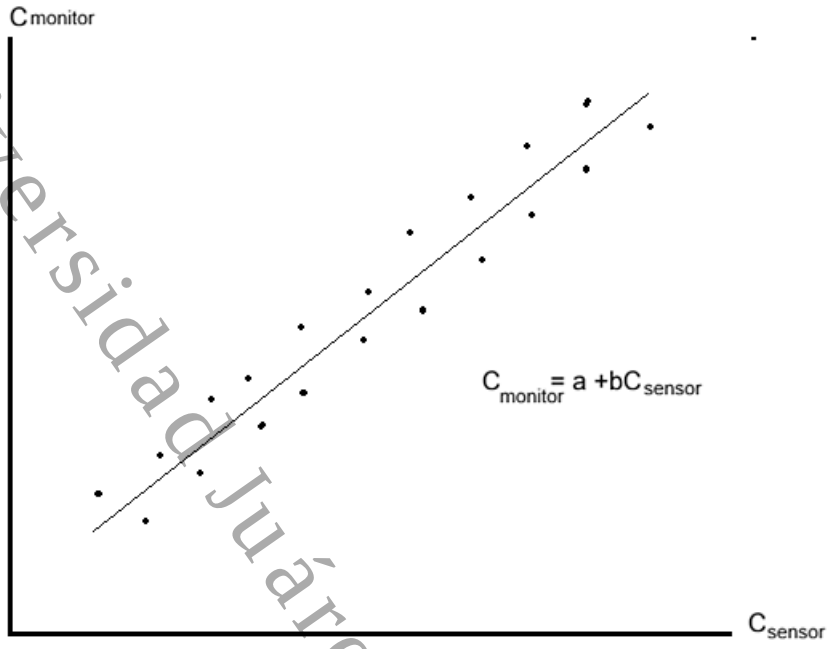


Figura 5. La línea recta continua es la curva de calibración de los datos observados (puntos sobre la gráfica).

Ya calibrado el equipo, se instaló sobre el toldo de un vehículo, lo que facilitó el monitoreo en la carretera. Un "recorrido" o "ruta" implicó que el vehículo se trasladara desde la parada de autobuses en DACBIOL hasta La Isla realizando paradas en los puntos de monitoreo. Las mediciones se realizaron con una frecuencia de 1 minuto y en cada sitio se permaneció por lo menos un lapso de 10 minutos.

Se establecieron 10 recorridos en días distintos en horarios variados a lo largo del mes de junio y, parte de mayo y junio, tomando en cuenta que este es un proyecto de tesis no financiado. Por lo tanto, no se pretendió desarrollar un monitoreo exhaustivo, sino más bien en generar las primeras mediciones con SBC y sentar las bases metodológicas para estudios futuros.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

La aplicación *Serial Bluetooth Terminal* permitió que los datos recibidos en cada sitio se guardaran en un archivo de texto plano. Además, cada vez que se recibieron datos, se registraron automáticamente la fecha y la hora en que se recibieron. Para mantener el orden y evitar mezclar datos, estos archivos de texto se identificaron con el nombre del sitio de monitoreo. Finalmente, los archivos de texto se importaron a Excel para generar la base de datos única que constituyó los datos de línea base para el análisis estadístico.

Análisis de los datos generados

Esta etapa consistió inicialmente en una descripción de los datos medidos. Para ello se utilizaron estadísticos básicos como la media, la mediana, la desviación estándar y los intervalos de confianza del 95 %. El análisis se complementó con gráficas de caja para la comparación espacial de los sitios. Se detectaron los sitios donde se dieron las concentraciones mínimas y donde se dieron las concentraciones máximas.

Para comprobar la hipótesis de que al menos en uno de los sitios de monitoreo la concentración es diferente, se aplicaron principalmente dos pruebas estadísticas: ANOVA y Kruskal-Wallis. La primera prueba supone que las muestras provienen de una distribución normal, que es una hipótesis aceptable pues aquí se obtuvieron muestras con tamaño mayor a 50; mientras que la segunda prueba es más robusta que la primera, ya que se basa en los rangos de la muestra. Para determinar qué sitios difieren, se aplicó la prueba de Tukey después de la prueba ANOVA y la prueba de Wilcoxon de suma de rangos después de la prueba de Kruskal-Wallis. Para el análisis descriptivo de los datos y pruebas de hipótesis se utilizó el software libre *RStudio* debido a la facilidad para realizar visualizaciones gráficas, análisis estadísticos y pruebas de hipótesis.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

RESULTADOS

Curva de calibración

Las tablas 4 y 5 muestran los modelos de calibración para la concentración de partículas PM10 y PM2.5 medidas con el sensor PMS5003 (sensor). En estos modelos, el subíndice c en *PM10c* representa las concentraciones calibradas o corregidas, mientras que el subíndice s en *PM10s* corresponde a las concentraciones directamente medidas por el sensor.

Para PM10 se analizaron diversos modelos de calibración, de los cuales cuatro cumplieron satisfactoriamente con las pruebas de hipótesis referentes a los parámetros de los modelos y presentaron un R^2 mayor a 0.5. Entre los 4 modelos (Tabla 4), los modelos 2 y 4 resultaron con un R^2 de 0.95 teniendo un mejor desempeño que los otros. El modelo 2 es un modelo de regresión lineal sin ordenada al origen y el modelo 4, un modelo cuadrático. Ya que ambos modelos tienen el mismo valor de R^2 se escogió el modelo 2 por ser más sencillo. En el caso de las PM2.5, se obtuvieron de igual forma 4 modelos de regresión que pasaron las pruebas de hipótesis y presentaron un R^2 también mayor a 0.5 (Tabla 5). Del mismo modo que con las PM10, el modelo de regresión lineal sin ordenada al origen (modelo 6) y el modelo cuadrático (modelo 8) obtuvieron un R^2 de 0.95. Sin embargo, por simplicidad, se seleccionó el modelo 6 para la calibración de las lecturas de PM2.5 del sensor.

Tabla 4. Curvas de calibración para las concentraciones de PM10 medidas en µg/m3 por el sensor PMS5003.

ID	Modelo	R^2
1	$PM10c = -27.94 + 1.80 * PM10s$	0.61
2	$PM10c = 1.2897 * PM10s$	0.95
3	$PM10c = 234.54 + 1.83 * PM10s - 4.72 * T - 1.85 * HR$	0.62
4	$PM10c = 0.7658 * PM10s + 0.00918 * PM10s^2$	0.95

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tabla 5. Modelos de calibración para PM2.5

ID	Modelo	R^2
5	$PM2.5c = -13.06005 + 1.25055 * PM2.5s$	0.63
6	$PM2.5c = 0.95470 * PM2.5s$	0.95
7	$PM2.5c = -33.30 + 1.223 * PM2.5s + 0.656 * T + 0.0170 * HR$	0.63
8	$PM2.5c = 0.7751406 * PM2.5s + 0.0038103 * PM2.5^2$	0.95

La figura 6 muestra la curva de calibración modelo 2 (Tabla 4) para las PM10 como la línea recta negra y la curva de calibración modelo 6 (tabla 5) para las PM2.5 como la línea recta roja.

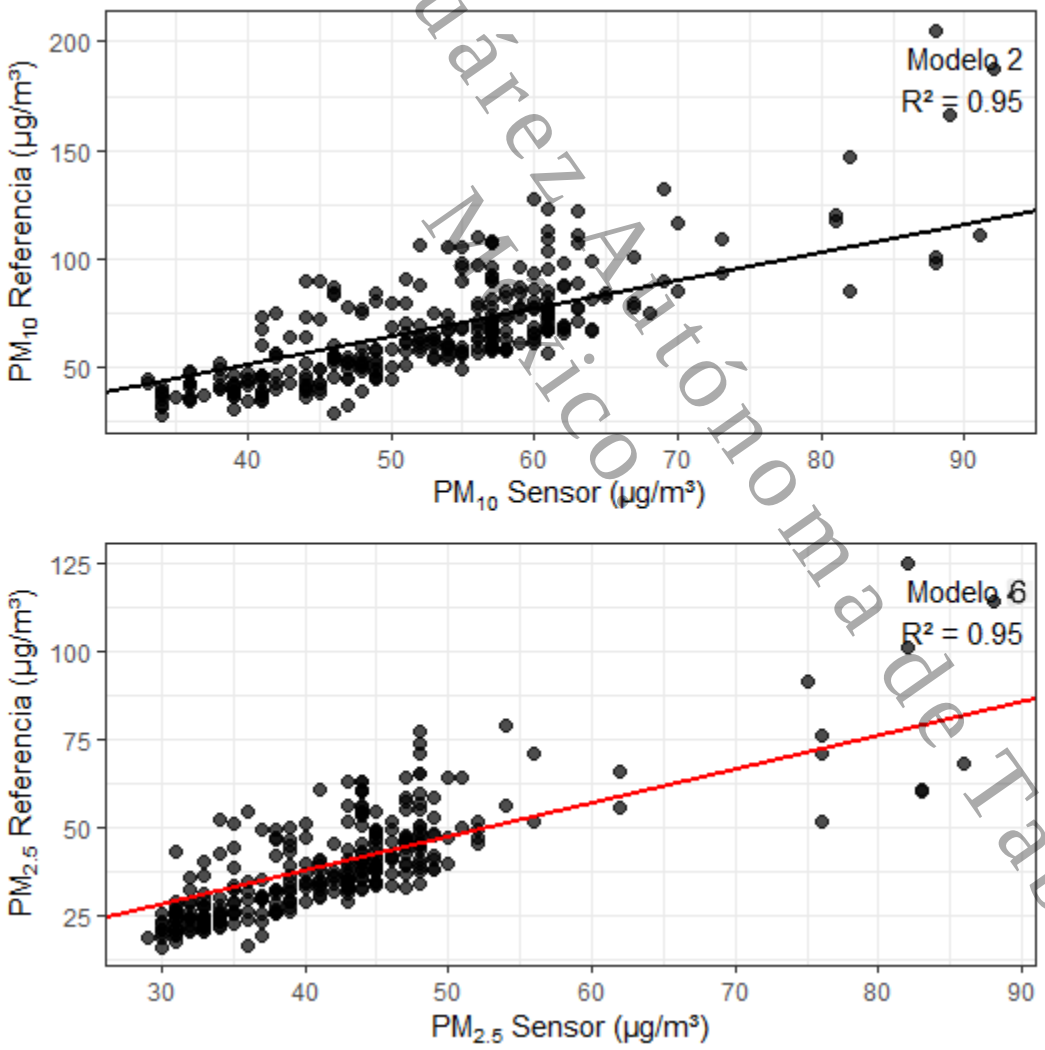


Figura 6. Curvas de calibración de los modelos para PM10 y PM2.5.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Resumes de estadísticos de material particulado, temperatura y humedad relativa

Las tablas 6 y 7 presentan un resumen estadístico de la concentración de partículas PM10 y PM2.5 en los 8 sitios de monitoreo a lo largo del tramo carretero Villahermosa-La Isla. Las columnas Min, Max, DE, P_{25}, P_{75} y P_{95} corresponden a los valores mínimo, máximo, desviación estándar y percentiles 25, 75 y 95. Se incluyeron los percentiles 25 (P25), 75 (P75) y 95 (P95) para proporcionar una descripción más completa de la distribución de las concentraciones de PM10 y PM2.5. El P_{25} permite identificar los valores correspondientes al 25% inferior de las observaciones, mientras que el P_{75} permite caracterizar los niveles relativamente altos de concentración. Por su parte, el P_{95} permite identificar los valores ubicados en la parte superior de la distribución y caracterizar episodios de concentración elevada que podrían no ser representados adecuadamente mediante medidas de tendencia central. De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 6, la concentración promedio de PM10 entre los sitios estuvo en el rango de 43.7 a 64.2 µg/m^3. En el sitio *Isla* fue de 64.2 µg/m^3 y en *Olmeca* fue de 43.7 µg/m^3. Tomando como base la mediana, un indicador más robusto que la media, la concentración de PM10 varió entre 36.1 µg/m^3 (*Olmeca* y *Comedor*) y 61.9 µg/m^3 (*Isla*). De acuerdo con la desviación estándar, la concentración de PM10 varió más en el sitio *Plaza* y fue menor en el sitio *Isla*. Los valores máximos registrados estuvieron entre 142 y 212 µg/m^3.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tabla 6. Resumen estadístico de la concentración (en µg/m3) de PM10 en los 8 sitios de monitoreo en el tramo de carretera Villahermosa-La Isla.

SITIO	Min	Max	Media	Mediana	DE	P25	P75	P95
Foránea	5.2	172	48.2	40.0	34.4	27.8	52.2	121
Plaza	12.9	173	51.1	37.4	40.8	26.8	52.2	163
JonhDeere	6.4	212	53.7	46.4	37.4	27.1	71	119
Olmeca	10.3	208	43.7	36.1	35.5	18.1	50.3	103
Comedor	2.6	142	51.0	36.1	38.9	23.2	84	122
Barbacoa	3.9	201	51.7	45.1	36.3	27.1	68.4	104
LAMAR	7.7	170	51.0	47.0	29.6	28.4	74	94
Isla	15.5	177	64.2	61.9	26.4	47.7	71.2	104

Tabla 7. Resumen estadístico de la concentración (en µg/m3) para PM2.5 en los 8 sitios de monitoreo en el tramo de carretera Villahermosa-La Isla.

SITIO	Min	Max	Media	Mediana	DE	P25	P75	P95
Foránea	3.8	124	31.5	25.8	23.8	20	32.5	82.1
Plaza	8.6	126	33.0	22.0	30.4	17	31.8	120
JonhDeere	4.8	143	32.7	28.2	25.5	18	40.1	78.5
Olmeca	5.7	140	27.1	22.0	23.5	9.5	33.4	59.2
Comedor	1.9	94	32.1	24.8	24.6	15.3	46.8	77.3
Barbacoa	2.9	121	31.7	29.6	22.4	15.3	40.1	67.8
LAMAR	4.8	121	31.3	32.0	19.0	18.6	42	56.6
Isla	8.6	123	39.3	38.2	17.6	31.3	43	66.8

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 7, la concentración promedio de PM2.5 entre los sitios estuvo en el rango de 27.1 a 39.3 µg/m^3. En el sitio *Isla* fue de 39.3 µg/m^3 y en *Olmeca* fue de 27.1 µg/m^3. Tomando como base la mediana, la concentración de PM2.5 varió entre 22.0 µg/m^3 (Plaza y Olmeca) y 38.2 µg/m^3 (*Isla*). De acuerdo con la desviación estándar, la concentración de PM2.5 varió más en el sitio Plaza y menos

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

en el sitio *Isla*. Los valores máximos registrados estuvieron entre 94 y 143 $\mu g/m^3$.

Las tablas 8 y 9 presentan un resumen estadístico de la Temperatura (en °C) y Humedad Relativa (en %) en los 8 sitios de monitoreo a lo largo del tramo carretero Villahermosa-La Isla. En lo que respecta a la temperatura, su promedio registro valores entre 29.8 °C (Foránea) y 33 °C (Isla). Con base a la temperatura mediana, el mínimo fue de 28.1 °C (Foránea) y el máximo fue de 31.6 °C (Isla). La variabilidad en las lecturas fue parecida en todos los sitios y en promedio fue de 4.4 °C. Los valores máximos registrados estuvieron entre 42.0 °C(Foránea) y 44.1 °C (JonhDeere). En general, puede notarse cómo la temperatura promedio o su mediana tendió a incrementarse desde el sitio Foránea hasta el sitio Isla, es decir, desde el este hacia el oeste.

La humedad relativa promedio máxima fue de 85.1 % (Foránea) y la mínima promedio fue de 77.9 % (Isla). La Humedad relativa mediana máxima fue de 90.4 % (Plaza) y la mínima fue de 83 % (Isla). Las mediciones en la humedad variaron entre 13.8 % y 15.5 %. En general, puede notarse cómo la humedad relativa promedio o su valor mediano tendió a disminuir desde el sitio Foránea (desde el este) hasta el sitio Isla (hacia el oeste).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tabla 8. Resumen estadístico de las concentraciones para T en los 8 sitios de monitoreo.

SITIO	Min	Max	Media	Mediana	DE	P25	P75	P95
Foránea	18.3	42.0	29.8	28.1	4.57	27.0	30.9	41.4
Plaza	26.5	42.8	30.6	28.7	4.52	27.6	32.0	41.8
JonhDeere	26.7	44.1	30.8	29.2	4.64	27.6	31.6	42.1
Olmeca	26.9	43.7	30.6	29.7	4.08	27.6	31.5	40.7
Comedor	27.0	42.4	31.2	29.3	4.30	28.7	32.2	42.0
Barbacoa	27.1	43.3	31.5	29.9	4.12	28.6	32.8	41.3
LAMAR	27.8	42.7	32.1	30.4	4.20	28.5	34.6	40.6
Isla	27.4	44.0	33.0	31.6	4.70	29.5	37.0	42.0

Tabla 9. Resumen estadístico de las concentraciones para HR en los 8 sitios de monitoreo.

SITIO	Min	Max	Media	Mediana	DE	P25	P75	P95
Foránea	52.0	100	85.1	87.8	13.8	76.9	97.1	100
Plaza	48.4	100	84.5	90.4	15.4	75.6	96.8	100
JonhDeere	47.4	100	84.2	89.0	15.3	75.2	96.3	100
Olmeca	49.6	100	85.0	88.2	14.1	78.6	95.4	100
Comedor	48.8	100	83.2	87.5	15.2	75.8	95.0	100
Barbacoa	48.5	100	82.1	86.7	14.0	73.1	91.8	100
LAMAR	49.6	100	81.2	85.1	14.6	71.1	91.1	100
Isla	46.2	100	77.9	83.0	15.5	65.9	91.2	100

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

ANOVA de la distribución espacial de partículas PM10 y PM2.5, temperatura y humedad relativa

La figura 7 muestra la distribución espacial de la concentración de partículas PM10 y PM2.5 observada en los sitios de monitoreo. Dentro de cada caja, la línea negra indica la mediana y esta se utilizó como valor representativo de las mediciones en cada sitio para realizar comparaciones visuales sobre si los sitios parecen no diferir entre sí. El extremo inferior de la caja corresponde al percentil 25, mientras que el extremo superior corresponde al percentil 75, por lo que la altura de la caja representa el rango intercuartílico de los datos que es una medida de la variabilidad de estos. Los bigotes muestran la extensión de los valores que se encuentran dentro de los límites establecidos para la distribución. Por ejemplo, en lo que respecta a las partículas PM10, entre los sitios Foránea y Plaza no parece haber diferencias; lo mismo sucede con los sitios Barbacoa y LAMAR. Incluso, la variabilidad entre los datos es parecida en cada par de sitios. Los sitios Olmeca y Comedor parecen tener la misma mediana; sin embargo, la variabilidad en los datos es evidente por la altura de las cajas. El comportamiento entre las PM2.5 es casi parecido.

Para comprobar estos supuestos o descartarlos, se realizó el ANOVA. La tabla 10 muestra los resultados para ambos tipos de partículas. En la tabla 10, Df, SS, MS, F y valor p corresponden a: grados de libertad de la prueba, suma de cuadrados, cuadráticos medios, estadístico de prueba y valor p. Es importante recordar que la prueba se rechaza si el valor p es menor a 0.05. De acuerdo con el valor p (Tabla 10), se rechazó la hipótesis nula de que las medias de la concentración de PM10 y PM2.5 son iguales y se concluyó que hay suficiente evidencia para indicar que la concentración promedio de partículas fue diferente para al menos uno de los ocho sitios.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

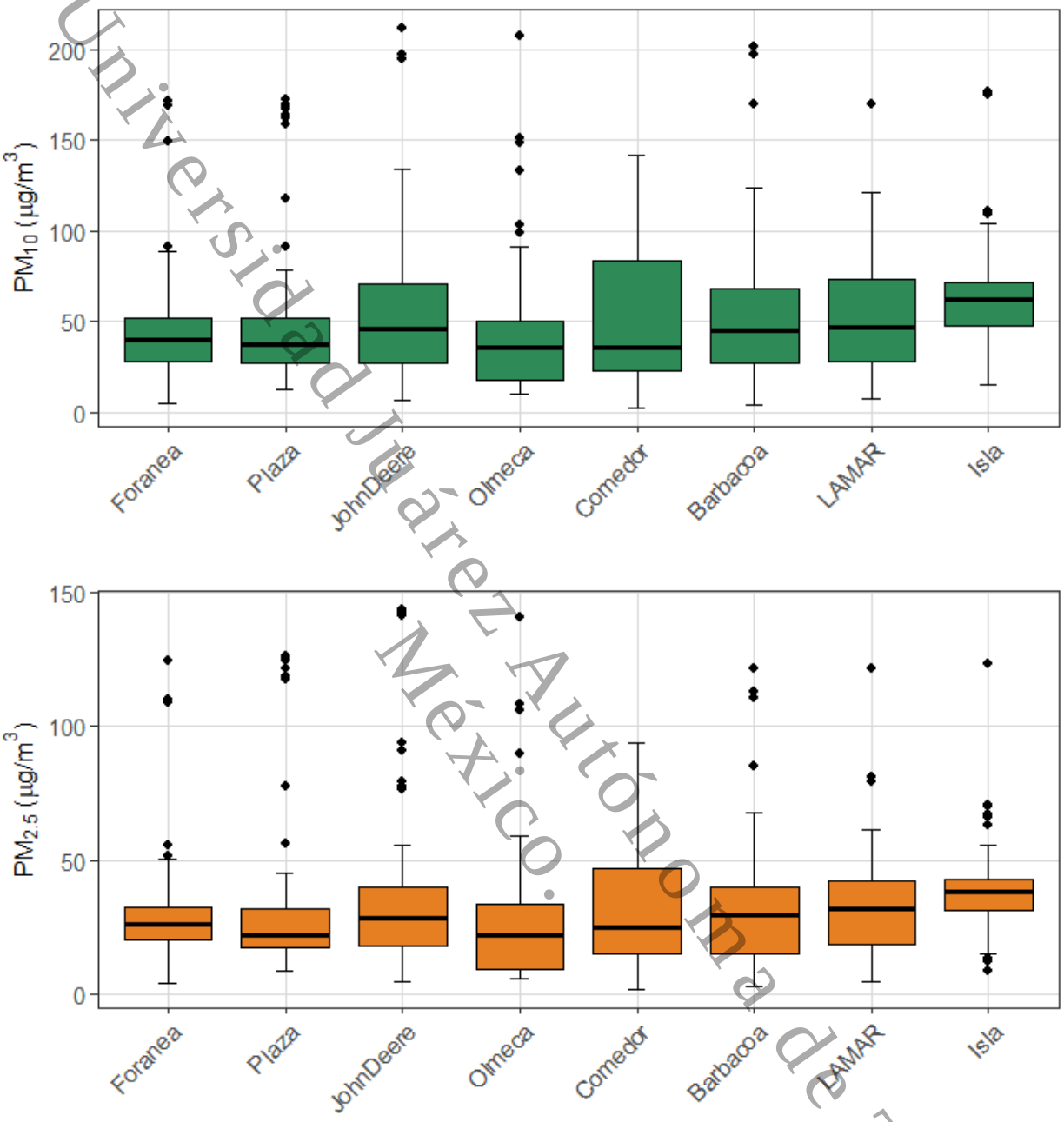


Figura 7. Distribución de las concentraciones de material particulado PM10 y PM2.5 en el tramo carretero Villahermosa-La isla por sitio.

La prueba de comparaciones múltiples de Tukey para las PM10 y PM2.5 (Tablas 11 y 12) muestra los sitios con diferencias en sus medias. En este caso, además del valor p se muestra el intervalo de confianza del 95 %. Esto es común en esta prueba y la idea es que el intervalo no debe incluir

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

el valor cero para que se concluya que se rechaza la hipótesis nula. Con respecto a las PM10, se puede notar que el promedio entre medias en el sitio Isla fue diferente del medido en los sitios Foránea, Plaza, Olmeca, JohnDeere y Comedor. La concentración promedio entre los sitios LAMAR y Foránea también difirió. En lo que respecta a las PM2.5 la concentración promedio en la Isla fue diferente de los promedios en Foránea, Olmeca, Plaza y JohnDeere (Tabla 12).

Tabla 10. Análisis de varianza para PM10, PM2.5, temperatura y humedad.

Parámetro	Fuente	Df	SS	MS	F	Valor P
PM10	Tratamientos	7	26111	3730	2.997	0.0041
	Error	850	1057892	1245		
	Total	857	1084003			
PM2.5	Tratamientos	7	8454	1208	2.153	0.0362
	Error	850	476855	561		
	Total	857	485309			
T	Tratamientos	7	770	109.97	5.68	$1.98*10^{-6}$
	Error	850	16456	19.36		
	Total	857	17226			
HR	Tratamientos	7	4511	644.4	2.964	0.0048
	Error	850	184815	217.4		
	Total	857	189326			

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tabla 11. Prueba de Tukey para PM10.

Comparación	Diferencia	Intervalo Inferior	Intervalo Superior	Valor p
Isla - Foranea	4.1872	1.8527	6.5216	0.0000018
Plaza - Isla	-3.1759	-5.5263	-0.8255	0.00115
Olmeca - Isla	-3.1339	-5.4789	-0.7889	0.00138
LAMAR Foranea	3.0008	0.5936	5.4081	0.00404
JohnDeere-Isla	-2.787	-5.1374	-0.4366	0.00798
Isla - Comedor	2.4366	0.0916	4.7816	0.0351

Tabla 12. Prueba de Tukey para PM2.5.

Comparación	Diferencia	Intervalo Inferior	Intervalo Superior	p ajustado
Isla - Foranea	-6.8826	-12.6387	-1.1265	0.00716
Olmeca - Isla	6.6941	0.912	12.4762	0.01078
Plaza - Isla	6.2963	0.5009	12.0917	0.02233
JohnDeere - Isla	5.8889	0.0935	11.6843	0.0433

La figura 8 muestra la distribución espacial de la temperatura y la humedad relativa observada entre los ocho sitios de monitoreo. Utilizando la mediana como el valor representativo de los datos, se observó cómo la temperatura va en aumento desde el sitio Foránea hasta el sitio Isla (de este a oeste). En lo que respecta a la variabilidad de los datos, esta parece ser homogénea (alto de las cajas) excepto en los sitios LAMAR e Isla al final del recorrido. La humedad relativa, observó también una tendencia, pero a disminuir desde Villahermosa (sitio Foránea) hasta el sitio Isla. Este comportamiento de aumento de temperatura y disminución de la humedad relativa podría estar relacionado, al menos parcialmente, con los horarios

en los que se realizaron las mediciones, debido a que el recorrido se efectuó de manera continua y las condiciones ambientales pueden cambiar conforme avance el día.

La tabla 10 muestra los resultados de la prueba de Tukey para la temperatura (T) y humedad relativa (HR). De acuerdo con el valor p, se rechazó la hipótesis nula de que las medias de temperatura y humedad son iguales y se concluyó que hay suficiente evidencia para indicar que estos parámetros fueron diferentes para al menos uno de los ocho sitios. Los resultados de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey, tablas 13 y 14, muestran los sitios en donde la temperatura y la humedad fueron diferentes. La temperatura en Isla fue diferente de la que se midió en Foránea, Plaza, Olmeca, JohnDerre y Comedor. La humedad relativa fue diferente entre los sitios Foránea, Olmeca, Plaza y JohnDeere. En todos estos casos puede notarse que el valor p de las pruebas fue menor a 0.05.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

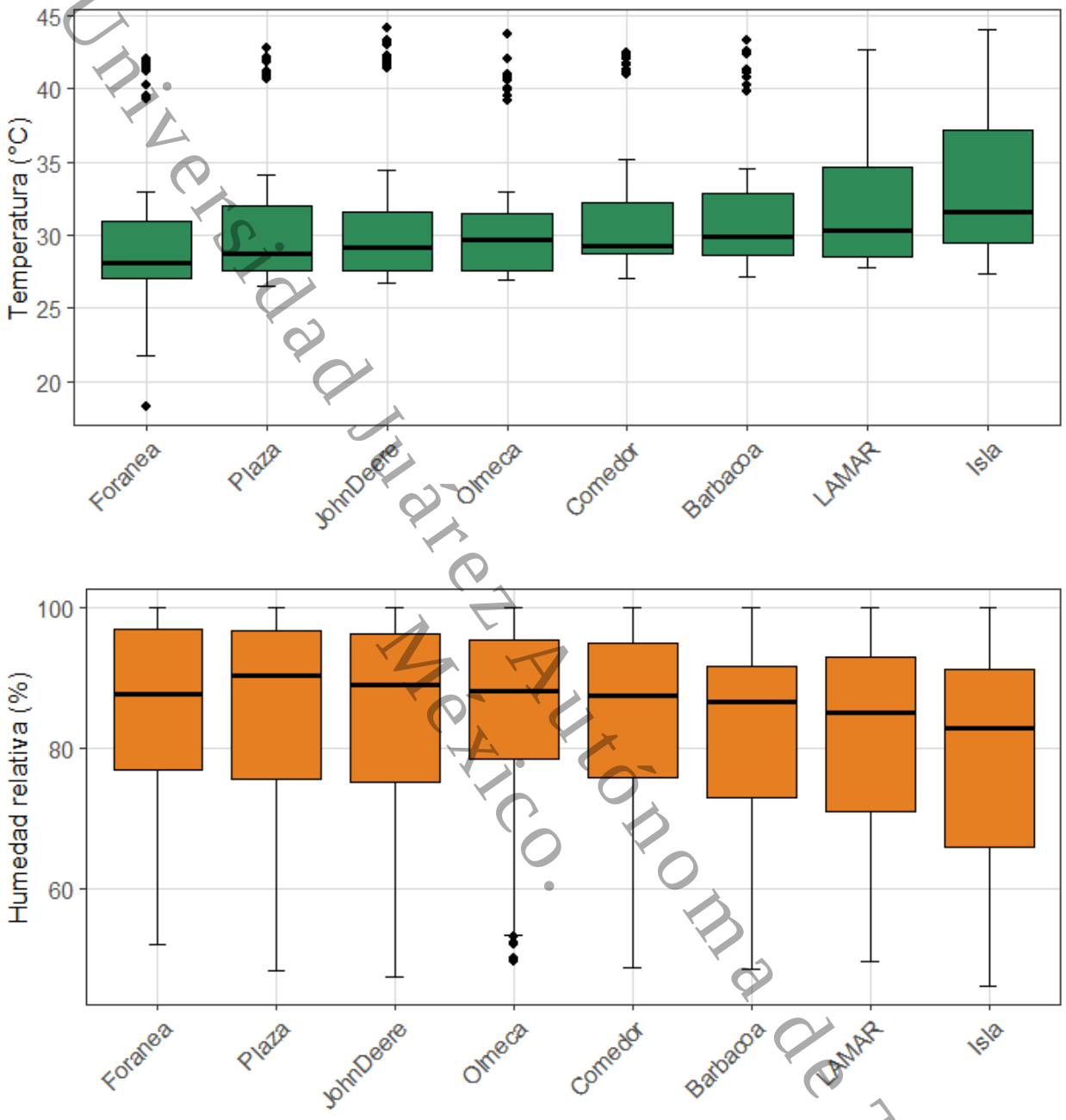


Figura 8. Distribución de los datos de Temperatura y Humedad relativa en el tramo carretero Villahermosa-La isla por sitio.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tabla 13. Prueba de Tukey para Temperatura

Comparación	Diferencia	Intervalo Inferior	Intervalo Superior	p ajustado
Isla - Foranea	3.2449	1.438	5.0519	0.0000018
Plaza - Isla	-2.4315	-4.2508	-0.6122	0.00138
Olmeca - Isla	-2.4113	-4.2264	-0.5961	0.00152
LAMAR - Foranea	2.3507	0.4874	4.2141	0.00339
JohnDeere - Isla	-2.2028	-4.0221	-0.3835	0.00606
Isla - Comedor	1.8737	0.0585	3.6888	0.03739

Tabla 14. Prueba de Tukey para Humedad Relativa

Comparación	Diferencia	Intervalo Inferior	Intervalo Superior	p ajustado
Isla - Foranea	-7.2005	-13.2561	-1.1448	0.0077
Olmeca - Isla	7.0402	0.9572	13.1232	0.0108
Plaza - Isla	6.6259	0.5289	12.723	0.0223
JohnDeere - Isla	6.2472	0.1502	12.3443	0.0401

Prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis de la distribución espacial de partículas PM10 y PM2.5, temperatura y humedad

En esta sección se muestran los resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis acerca de si alguno de los ocho sitios en donde se midieron los cuatro parámetros ambientales (PM10, PM2.5, T y HR) tiene diferencias entre los demás. Esta prueba es más robusta que la anterior.

En la tabla 15 se analizaron los datos mediante la prueba de Kruskal-Wallis. En este caso, chi-cuadrado es el estadístico de la prueba y gl corresponde

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

a los grados de libertad. En cada caso, el valor p fue menor a 0.05, indicando que existe evidencia de que al menos uno de los sitios difiere de los demás. Posiblemente se trate del sitio Isla, que fue recurrente en la prueba ANOVA.

Tabla 15. Prueba de Kruskal-Wallis para las partículas PM10, PM2.5, temperatura (T) y humedad relativa (HR).

Parámetro	Chi-Cuadrado	gl	Valor p
PM10	64.674	7	1.748*10-11
PM2.5	24.944	7	0.0007
T	68.378	7	3.141*10-12
HR	25.451	7	0.0006

Las tablas 16 a 19 muestran los resultados de la prueba de comparaciones múltiples de Wilcoxon para PM10, PM2.5, temperatura y humedad. El valor numérico dentro de las tablas es el valor p asociado a la prueba estadística. Si este valor p es menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula de que todos los sitios tienen la misma distribución con respecto al parámetro que indica.

De acuerdo con los resultados para PM10 (Tabla 16), en el sitio Isla, la concentración fue diferente de lo otros sitios, excepto en el sitio LAMAR. Pero también la distribución de concentraciones en el sitio Foránea es diferente de lo observado en JohnDeere, Olmeca, Comedor, Barbacoa y LAMAR. Lo observado en Plaza, JohnDeere y Olmeca difiere de lo observado en los sitios Barbacoa y LAMAR. El sitio Comedor fue diferente del comportamiento de las partículas en LAMAR.

Para las PM2.5 los resultados variaron significativamente (Tabla 17). Por ejemplo, en los sitios Foránea y PLAZA la concentración solo fue diferente de lo observado en LAMAR e Isla. Los sitios JohnDeere, Comedor y

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Barbacoa difieren de lo observado en el sitio Isla y en Olmeca hay diferencias con las concentraciones en LAMAR e Isla.

Tabla 16. Prueba de Wilcoxon para PM10.

Sitio	Foránea	Plaza	JohnDeere	Olmeca	Comedor	Barbacoa
JohnDeere	0.009	0.338				
Olmeca	0.016	0.489	0.858			
Comedor	0.001	0.063	0.288	0.201		
Barbacoa	0.000	0.003	0.022	0.003	0.119	
LAMAR	0.000	0.000	0.003	0.001	0.044	0.258
Isla	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.023

Tabla 17. Prueba de Wilcoxon para comparaciones múltiples para PM2.5

Sitio	Foránea	Plaza	JohnDeere	Olmeca	Comedor	Barbacoa
JohnDeere	0.859					
Olmeca	0.618	0.723				
Comedor	0.955	0.855	0.883			
Barbacoa	0.330	0.437	0.559	0.390		
LAMAR	0.062	0.062	0.088	0.068	0.201	
Isla	0.025	0.038	0.054	0.023	0.148	0.539

Con la temperatura (Tabla 18) pasó algo parecido a lo de las partículas PM10. Por ejemplo, en el sitio Foránea la temperatura fue diferente a la de los otros sitios excepto en el sitio Plaza. La temperatura en Plaza fue diferente de la temperatura en Comedor, Barbacoa, LAMAR e Isla. En JohnDeere la temperatura fue diferente de Barbacoa y LAMAR; lo mismo sucedió con el sitio Olmeca. La temperatura en Comedor fue diferente que

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

en LAMAR e Isla y finalmente en el sitio Barbacoa la temperatura fue diferente de Isla.

Tabla 18. Prueba de Wilcoxon para comparaciones múltiples para temperatura

Sitio	Foránea	Plaza	JohnDeere	Olmeca	Comedor	Barbacoa
JohnDeere	0.073					
Olmeca	0.013	0.314				
Comedor	0.014	0.442	0.716			
Barbacoa	0.000	0.036	0.070	0.186		
LAMAR	0.000	0.004	0.009	0.004	0.068	
Isla	0.000	0.000	0.000	0.001	0.046	0.175

Tabla 19. Prueba de Wilcoxon para comparaciones múltiples para Humedad relativa

Sitio	Foránea	Plaza	JohnDeere	Olmeca	Comedor	Barbacoa
JohnDeere	0.982					
Olmeca	0.737	0.797				
Comedor	0.983	0.856	0.956			
Barbacoa	0.308	0.354	0.433	0.288		
LAMAR	0.069	0.060	0.071	0.056	0.223	
Isla	0.026	0.028	0.036	0.020	0.132	0.483

La humedad relativa (Tabla 19) en el sitio Foránea fue solo diferente de la del sitio Isla. Los sitios Plaza, JohnDeere y Olmeca tuvieron diferencias significativas con los sitios LAMAR e Isla. Finalmente, la humedad relativa en Comedor y Barbacoa fue diferente de la temperatura del sitio Isla.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

DISCUSIÓN

Osorio (2025) y De la Cruz (2026) también seleccionaron curvas de calibración que resultaron ser rectas sin ordenada al origen como la propuesta en este trabajo para PM10 y PM2.5. Estos estudios respaldan el uso de los modelos lineales para el uso y desarrollo de curvas de calibración debido a la simplicidad y ajuste. En el caso de De la Cruz (2026), se evaluaron modelos lineales y cuadráticos, encontrando que los modelos lineales presentaron un mejor desempeño y comportamiento. De igual manera, Osorio (2025) obtuvo la misma conclusión, reportando coeficientes de determinación de 0.99 para el modelo lineal mientras que modelos cuadráticos alcanzaron un R^2 de 0.46, evidenciando una inferioridad con respecto a los modelos lineales.

Cortez-Lugo et al. (2004) evaluaron las concentraciones de PM2.5 a diferentes distancias de una vialidad de alto tránsito en Ciudad Juárez, Chihuahua, México, ellos encontraron diferencias significativas entre las distancias evaluadas. Los autores observaron una disminución de las concentraciones conforme iba aumentando la distancia con respecto a la vialidad, registrando a partir de los 100 m una reducción de 9.5 µg/m³. En el tramo carretero Villahermosa-La Isla se observaron variaciones espaciales de PM2.5 entre los ocho puntos de monitoreo, donde Isla presentó la mayor concentración media (39.3 µg/m³), seguida de Plaza (33.0 µg/m³) y John Deere (32.7 µg/m³), mientras que Olmeca registró la menor (27.1 µg/m³). Los resultados coinciden con los autores en demostrar que las concentraciones de PM2.5 pueden presentar variaciones espaciales en sitios viales. Sin embargo, a diferencia de dicho estudio, los puntos del tramo carretero no se establecieron en distancias cercanas, por lo cual las diferencias encontradas no pueden atribuirse directamente a la distancia respecto a la carretera.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Hernández-Romero et al. (2026) analizaron las concentraciones de PM2.5 y PM10 en cinco municipios del Área Metropolitana de la ciudad de Monterrey, México, utilizaron la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, mediante la cual identificaron diferencias significativas entre los sitios de monitoreo para PM10 y PM2.5. Las concentraciones medias anuales oscilaron entre 11 y 28 µg/m³ para PM2.5 y entre 35 y 74 µg/m³ para PM10. De manera similar, en el tramo carretero Villahermosa-La Isla se identificaron diferencias estadísticamente significativas entre los ocho puntos de monitoreo mediante ANOVA para PM10 ($p = 0.0041$) y PM2.5 ($p = 0.0362$), resultados que fueron consistentes con la prueba de Kruskal-Wallis para PM10 ($p < 0.001$) y PM2.5 ($p = 0.0007$). La coincidencia entre ambas pruebas aporta evidencia de que las concentraciones de material particulado no presentaron un comportamiento homogéneo entre los sitios estudiados.

Rodríguez-Trejo et al. (2025), en un estudio realizado igual con sensores de bajo costo PMS5003 en Ciudad de México, analizaron la influencia de la temperatura y la humedad relativa sobre las concentraciones de PM10 y PM2.5, y encontraron una correlación significativa, aunque baja entre la humedad relativa y la concentración del material particulado, de 0.025. En este trabajo realizado en el tramo carretero Villahermosa-La Isla, la correlación también fue significativa, pero más baja que la de Rodríguez-Trejo et al., incluso negativa de -0.14. A pesar de ser tan baja la correlación, los autores señalan que estas condiciones ambientales pueden influir en las mediciones realizadas con el PM5003. Sin embargo, en este trabajo consideramos que no tienen mucha influencia ya que el tiempo que se permaneció en cada sitio de monitoreo fue de alrededor de 10 minutos, tiempo en el que la temperatura y la humedad no variaron significativamente. Sin embargo, si este trabajo se realiza en diferentes épocas del año, o incluso en diferentes horarios del día, incluyendo la noche, se espera que la temperatura y la humedad tengan influencia en las lecturas de partículas

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

del sensor, por lo que habría que considerar diferentes curvas de calibración según la hora del día o la época del año.

Los resultados obtenidos muestran que las concentraciones de material particulado no presentaron un comportamiento homogéneo a lo largo del tramo carretero, observándose diferencias espaciales entre los ocho puntos de monitoreo. El punto más destacado fue la Isla por presentar mayores concentraciones medias de material particulado, mientras que las pruebas estadísticas confirmaron diferencias significativas entre los ocho sitios. La temperatura y la humedad relativa presentaron variaciones, observando una tendencia al incremento de temperatura y la disminución de la humedad relativa en dirección este (Foránea)-oeste (Isla).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

CONCLUSION

El trabajo presente permitió establecer las primeras mediciones de línea base de las concentraciones de material particulado (PM10 y PM2.5) en ocho puntos distribuidos a lo largo del tramo carretero Villahermosa-La Isla, mediante el uso de sensores de bajo costo. La calibración del sensor PMS5003 permitió seleccionar los modelos lineales para PM10 y PM2.5 con un coeficiente de determinación de 0.95, ajustando adecuadamente para las mediciones realizadas.

Las concentraciones de PM10 y PM2.5 presentaron diversas variaciones espaciales a lo largo del tramo carretero. Para PM10, las concentraciones medias variaron entre 43.7 y 64.2 µg/m³, mientras que para PM2.5 oscilaron entre 27.1 y 39.3 µg/m³. El punto Isla presentó las mayores concentraciones medias en ambos contaminantes, mientras que Olmeca registró las menores. Las pruebas paramétricas y no paramétricas mostraron diferencias estadísticas entre los sitios, lo que demostró que existen diferencias espaciales de la concentración de PM10 y PM2.5.

Los resultados obtenidos permiten respaldar la hipótesis de investigación, la cual establece que las concentraciones de PM10 y PM2.5 en al menos uno de los sitios de monitoreo a lo largo del tramo carretero son diferentes a las de los otros. Las pruebas de ANOVA y Kruskal-Wallis mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los sitios para PM10 y PM2.5. Asimismo, las comparaciones múltiples mediante las pruebas de Tukey y Wilcoxon permitieron identificar los pares de sitios entre los cuales se encuentra dicha diferencia. Los resultados aportan evidencia estadística para respaldar la hipótesis planteada.

La temperatura y la humedad relativa también mostraron diversas variaciones a lo largo del monitoreo. La temperatura media presentó una

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

tendencia creciente desde el punto Foránea hasta el punto la Isla (de este a oeste), mientras que la humedad relativa se comportó de manera inversa a la temperatura, disminuyendo a lo largo de todo el monitoreo. De manera preliminar, la asociación obtenida entre estas variables y las concentraciones de PM10 y PM2.5 fue baja, por lo que no se estableció una relación entre las condiciones ambientales evaluadas y las concentraciones de ambos contaminantes.

En conjunto, los resultados mostraron que las concentraciones de PM10 y PM2.5 no se distribuyeron de manera homogénea entre los ocho puntos estudiados y esto permitió establecer una línea base para el tramo carretero Villahermosa-La Isla.

El uso de sensores de bajo costo permitió generar información espacial sobre el material particulado en una zona con limitada cobertura de monitoreo atmosférico, por lo que este trabajo puede servir como base para futuros estudios que amplíen el periodo y la frecuencia de las mediciones.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se recomienda ampliar el periodo de monitoreo de las concentraciones de PM10 y PM2.5 en el tramo carretero Villahermosa-La Isla, considerando diferentes meses y épocas del año, con el propósito de identificar posibles variaciones temporales en las concentraciones de material particulado.

Asimismo, se recomienda integrar al equipo de medición un sensor GPS, con la finalidad de registrar simultáneamente la ubicación y las concentraciones de PM10 y PM2.5 durante los recorridos.

Por las diferencias encontradas entre los puntos de monitoreo, se recomienda que en futuros estudios se considere información adicional, como características generales del entorno y su tipo de uso comercial alrededor de los puntos, con la finalidad de explorar su posible relación con las variaciones observadas en las concentraciones de PM10 y PM2.5.

Finalmente, se recomienda ampliar la red de puntos de monitoreo hacia otros tramos carreteros y avenidas principales de Villahermosa, para aportar y generar la mayor información espacial sobre las concentraciones de material particulado y contribuir al desarrollo de una red complementaria de monitoreo mediante sensores de bajo costo.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

GLOSARIO

- PM

Son partículas suspendidas en el aire formadas por polvo, humo, cenizas, hollín y otras sustancias solidad y liquidas microscópicas.

- PM10

Partículas con diámetro menor o igual a 10 micrómetros.

- PM2.5

Partículas con diámetro menor o igual a 2.5 micrómetros.

- Equipo de grado

Equipo utilizado como estándar para determinar la concentración de los contaminantes en el aire, el cual ayuda a la calibración de los equipos de bajo costo.

- Sensores de bajo costo

Dispositivos tecnológicos diseñados para medir contaminantes atmosféricos de manera económica y accesible a comparación de los equipos de referencia.

- EPA

Agencia Gubernamental de estados unidos encargada de proteger el medio ambiente y la salud humana.

NOM

Las normas oficiales mexicanas son regulaciones técnicas obligatorias emitidas por el gobierno mexicano.

- Monitoreo

Proceso sistemático de observación, medición y registro continuo o periódico de variables ambientales con el fin de evaluarlo con respecto al tiempo.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

REFERENCIAS

Aguayo, P. (2025, 24 septiembre). *¿Qué es Arduino? | Arduino.cl - Compra tu Arduino en Línea*. Arduino.cl - Compra Tu Arduino En Línea. https://arduino.cl/que-es-arduino/?srsltid=AfmBOoq4lPy0Lep63yTEijgGRxzEw2A3KoQ9nWScmtDajx8WbYhzV1-t

California Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA). (s. f.). *Air quality: PM2.5*. https://oehha.ca.gov/calenviroscreen/indicator/air-quality-pm25

Cortez-Lugo, M., Holguín-Molina, F., Flores-Luévano, S., & Romieu, I. (2004). Niveles ambientales de las $PM_{2.5}$ y distancia a una vía de alto tránsito en Ciudad Juárez, Chihuahua, México. *Salud Pública de México, 46*(6), 534–537. https://doi.org/10.1590/S0036-36342004000600009

De la Cruz, S. (2026). *Desarrollo de un sistema emisor-receptor de bajo costo para monitoreo de la calidad del aire* (Tesis de licenciatura). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Repositorio Institucional.

Eurofins Environment Testing Spain. (2026, 27 febrero). *Qué son las partículas PM10 y cómo se generan en la atmósfera*. https://www.eurofins-environment.es/es/particulas-pm10-y-como-se-generan

Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (5.ª ed.). SAGE Publications.

Gobierno del Estado de Veracruz. (s. f.). *Contaminantes y calidad del aire*. Secretaría de Medio Ambiente. Recuperado el 18 de mayo de 2026.

González Chavarría, J. F. (2024, 5 enero). *Calidad del aire: Tutorial de uso de PMS5003 con Arduino*. Tecneu. https://www.tecneu.com/blogs/tutoriales-de-electronica/calidad-del-aire-tutorial-de-uso-de-pms5003-con-arduino

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco México

Hernández-Romero, K., Hernández-Romero, I. M., Mendoza, A., Pérez-Rodríguez, M., Barajas-Villarruel, L. R., Medellín-Carrillo, S., & González, L. T. (2026). Persistent air pollution regimes and regulatory exceedances of PM10, PM2.5, and O3 in the Monterrey Metropolitan Area, Mexico. *City and Environment Interactions, 31*, 100410. https://doi.org/10.1016/j.cacint.2026.100410

Jiang, J. (2022). Nonparametric tests based on rank. En *Applied medical statistics*. John Wiley & Sons.

Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9.ª ed.). John Wiley & Sons.

Organización Panamericana de la Salud (OPS). (s. f.). *Cómo impacta la mala calidad del aire en la salud en las Américas*. https://www.paho.org/es/documentos/como-impacta-mala-calidad-aire-salud-americas

Osorio, C. (2025). *Análisis de concentraciones de PM2.5 y PM10 en paradas de transporte usando sensores de bajo costo* (Tesis de licenciatura). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Repositorio Institucional.

Rivera, R. (2020). Nonparametric testing. En *Principles of managerial statistics and data science*. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781119486473.ch16

Rodríguez-Trejo, A., Ibarra-Ortega, H. E., Böhnel, H., & Escalante-González, J. (2025). Estación de monitoreo geoambiental (EMGA): dispositivo de monitoreo ambiental en tiempo real con sensores de bajo costo para entornos urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 41*, 55355. https://doi.org/10.20937/rica.55355

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (s. f.). *Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México*. Gobierno de la Ciudad de México. https://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=%27

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Tecnologías emergentes: qué son | Instituto SISE. (s. f.). https://www.sise.edu.pe/blog/que-son-tecnologias-emergentes

Ulloa Ninahuamán, J., Alvarez-Tolentino, D. M., Peña Rojas, A., & Suarez-Salas, L. (2022). Sensores de bajo costo en la caracterización de partículas finas (PM2.5) de una ciudad altoandina. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research, 24*(3), 199–207. https://doi.org/10.18271/ria.2022.468

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2021). *Collocation instruction guide* [Guía de instrucciones de colocación]. https://espanol.epa.gov/system/files/documents/2021-10/102121-tagged-guide-02p_10-15-2021-spanish-y1010-082521-collocation-instruction-guide-10-13-2021_508-tagged-1.pdf

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2025, 24 junio). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*. https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles

World Meteorological Organization. (2024). *Integrating low-cost sensor systems and networks to enhance air quality applications*. https://www.ccacoalition.org/es/resources/integrating-low-cost-sensor-systems-and-networks-enhance-air-quality-applications

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

ANEXO

Presupuesto

En la tabla 2 se muestra el presupuesto tentativo obtenido mediante una investigación exhaustiva en internet el cual nos muestra que el valor total del equipo es de $1514 pesos mexicanos.

Tabla 20. Presupuesto del dispositivo

Materiales	Costo
Sensor PMS5003	$505
Arduino MEGA	$330
Protoboard Mini	$50
Sensor DHT22	$140
Sensor Bluetooth	$200
Caja estanca	$25

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
Repositorio Institucional

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	MONITOREO DE LÍNEA BASE DE LA CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN LA CARRETERA VILLAHERMOSA-LA ISLA
Autor de la Tesis:	Kevin Alejandro Isidro Gomez
ORCID:	https://orcid.org/0009-0004-1194-0433
Resumen de la Tesis:	El presente trabajo tuvo como objetivo establecer una línea base de las concentraciones de material particulado PM10 y PM2.5, así como de la temperatura y la humedad relativa, en un tramo de la carretera Villahermosa–La Isla, en Tabasco, mediante el uso de sensores de bajo costo. Para ello, se utilizó un dispositivo basado en Arduino, equipado con un sensor PMS5003 para la medición de partículas y un sensor DHT22 para el registro de las variables ambientales. Las mediciones de material particulado se calibraron mediante su comparación con un monitor de calidad del aire marca Temtop, seleccionando modelos de regresión lineal con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.95 para ambos contaminantes. Posteriormente, se realizaron diez recorridos en ocho sitios de monitoreo distribuidos a lo largo del tramo carretero, con registros cada minuto y periodos de medición de al menos diez minutos por sitio. Los datos se analizaron mediante estadística descriptiva y pruebas de ANOVA y Kruskal-Wallis, complementadas con comparaciones múltiples de Tukey y Wilcoxon. Los resultados mostraron que las concentraciones medias de PM10 variaron entre 43.7 y 64.2 µg/m³, mientras que las de PM2.5 oscilaron entre 27.1 y 39.3 µg/m³. El sitio Isla presentó las mayores concentraciones medias de ambos contaminantes, mientras que Olmeca registró las menores. Las pruebas estadísticas identificaron

	diferencias significativas entre los sitios de monitoreo para PM10 y PM2.5. Asimismo, se observó una tendencia al incremento de la temperatura y a la disminución de la humedad relativa en dirección de Foránea hacia Isla. Se concluye que el uso de sensores de bajo costo permitió generar información inicial sobre la distribución espacial del material particulado en el tramo estudiado y constituye una alternativa complementaria para futuros estudios de calidad del aire en Villahermosa, Tabasco.
Palabras claves de la Tesis:	Material particulado, PM10, PM2.5, sensores de bajo costo, calidad del aire, calibración, Villahermosa–La Isla.
Referencias citadas:	Aguayo, P. (2025, 24 septiembre). *¿Qué es Arduino?	Arduino.cl - Compra tu Arduino en Línea*. Arduino.cl - Compra Tu Arduino En Línea. https://arduino.cl/que-es-arduino/?srsltid=AfmBOoq4lPy0Lep63yTEijgGRxzEw2A3KoQ9nWScmtDajx8WbYhzV1-t California Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA). (s. f.). *Air quality: PM2.5*. https://oehha.ca.gov/calenviroscreen/indicator/air-quality-pm25 Cortez-Lugo, M., Holguín-Molina, F., Flores-Luévano, S., & Romieu, I. (2004). Niveles ambientales de las $PM_{2.5}$ y distancia a una vía de alto tránsito en Ciudad Juárez, Chihuahua, México. *Salud Pública de México, 46*(6), 534–537. https://doi.org/10.1590/S0036-36342004000600009 De la Cruz, S. (2026). *Desarrollo de un sistema*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

emisor-receptor de bajo costo para monitoreo de la calidad del aire (Tesis de licenciatura). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Repositorio Institucional.

Eurofins Environment Testing Spain. (2026, 27 febrero). *Qué son las partículas PM10 y cómo se generan en la atmósfera*. https://www.eurofins-environment.es/es/particulas-pm10-y-como-se-generan

Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (5.ª ed.). SAGE Publications.

Gobierno del Estado de Veracruz. (s. f.). *Contaminantes y calidad del aire*. Secretaría de Medio Ambiente. Recuperado el 18 de mayo de 2026.

González Chavarría, J. F. (2024, 5 enero). *Calidad del aire: Tutorial de uso de PMS5003 con Arduino*. Tecneu. https://www.tecneu.com/blogs/tutoriales-de-electronica/calidad-del-aire-tutorial-de-uso-de-pms5003-con-arduino

Hernández-Romero, K., Hernández-Romero, I. M., Mendoza, A., Pérez-Rodríguez, M., Barajas-Villarruel, L. R., Medellín-Carrillo, S., & González, L. T. (2026). Persistent air pollution regimes and regulatory exceedances of PM10, PM2.5, and O3 in the Monterrey Metropolitan Area, Mexico. *City and Environment Interactions, 31*, 100410.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

https://doi.org/10.1016/j.cacint.2026.100410

Jiang, J. (2022). Nonparametric tests based on rank. En *Applied medical statistics*. John Wiley & Sons.

Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9.ª ed.). John Wiley & Sons.

Organización Panamericana de la Salud (OPS). (s. f.). *Cómo impacta la mala calidad del aire en la salud en las Américas*. https://www.paho.org/es/documentos/como-impacta-mala-calidad-aire-salud-americas

Osorio, C. (2025). *Análisis de concentraciones de PM2.5 y PM10 en paradas de transporte usando sensores de bajo costo* (Tesis de licenciatura). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Repositorio Institucional.

Rivera, R. (2020). Nonparametric testing. En *Principles of managerial statistics and data science*. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781119486473.ch16

Rodríguez-Trejo, A., Ibarra-Ortega, H. E., Böhnel, H., & Escalante-González, J. (2025). Estación de monitoreo geoambiental (EMGA): dispositivo de monitoreo ambiental en tiempo real con sensores de bajo costo para entornos urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 41*, 55355. https://doi.org/10.20937/rica.55355

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (s. f.). *Sistema de Monitoreo*

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

Atmosférico de la Ciudad de México. Gobierno de la Ciudad de México. https://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=%27

Tecnologías emergentes: qué son | Instituto SISE. (s. f.). https://www.sise.edu.pe/blog/que-son-tecnologias-emergentes

Ulloa Ninahuamán, J., Alvarez-Tolentino, D. M., Peña Rojas, A., & Suarez-Salas, L. (2022). Sensores de bajo costo en la caracterización de partículas finas (PM2.5) de una ciudad altoandina. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research, 24*(3), 199–207. https://doi.org/10.18271/ria.2022.468

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2021). *Collocation instruction guide* [Guía de instrucciones de colocación]. https://espanol.epa.gov/system/files/documents/2021-10/102121-tagged-guide-02p_10-15-2021-spanish-y1010-082521-collocation-instruction-guide-10-13-2021_508-tagged-1.pdf

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2025, 24 junio). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*. https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

World Meteorological Organization. (2024). *Integrating low-cost sensor systems and networks to enhance air quality applications*. https://www.ccacoalition.org/es/resources/integrating-low-cost-sensor-systems-and-networks-enhance-air-quality-applications

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.