

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Aplicación de sensores de bajo costo para monitorear la
contaminación del aire (CO₂, CO, y PM₁₀ y PM_{2.5}) en cuatro
Colegios del Distrito de San Miguel, Puno- Perú**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Jhoangel Joél Supo Espinoza

Guido Raul Quenaya Calcina

Aracelly Venus Yanque Ramos

Asesor:

Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

Juliaca, diciembre de 2024

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“APLICACIÓN DE SENSORES DE BAJO COSTO PARA MONITOREAR LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE (CO₂, CO, Y PM₁₀ Y PM_{2.5}) EN CUATRO COLEGIOS DEL DISTRITO DE SAN MIGUEL, PUNO-PERÚ”** de los autores **Jhoangel Joél Supo Espinoza, Guido Raul Quenaya Calcina y Aracelly Venus Yanque Ramos** tiene un índice de similitud de 7% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 03 días del mes de diciembre del año 2024



Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 03 día(s) del mes de diciembre del año 2024, siendo las 12:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Msc. Miguel Ángel Salcedo Enriquez el (la) secretario(a) Dr. Jorge Juvenal Bravo Huella y los demás miembros: Msc. Rosa Adelina Gallata Chura Ing. Verónica Haydée Pari Momani y el (la) asesor(a) Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

Aplicación de sensores de bajo costo para monitorear la contaminación del aire (CO2, CO, y PM10 y PM2.5) en cuatro Colegios del Distrito de San Miguel, Puno - Perú

- del(los) bachiller(es): a) Aracelly Venus Yunque Ramos
 b) Thoangel Joel Supe Espinoza
 c) Guido Paul Quenaya Gabino

conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Ambiental
(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado. Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Aracelly Venus Yunque Ramos

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	18	A-	Muy Bueno	Sobresaliente

Bachiller (b): Thoangel Joel Supe Espinoza

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	18	A-	Muy Bueno	Sobresaliente

Bachiller (c): Guido Paul Quenaya Gabino

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	18	A-	Muy Bueno	Sobresaliente

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]
 Presidente/a
[Firma]
 Asesor/a
[Firma]
 Bachiller (a)

[Firma]
 Miembro
[Firma]
 Bachiller (b)

[Firma]
 Secretario/a
[Firma]
 Miembro
[Firma]
 Bachiller (c)

AGRADECIMIENTOS

Jhoangel Joél Supo Espinoza

A Dios por ser mi guía y fortaleza en todo este proceso.
A mis padres, Raul Juan Supo Mamani Y Epifania Espinoza Avendaño, por su amor incondicional y respaldo permanente, que han sido el cimiento de todos mis logros.

Guido Raul Quenaya Calcina

A Dios, por ser mi guía constante y fortaleza inquebrantable en todo este proceso.
A mis padres, Ramon Alejandro Quenaya Aquino y Cirila Calcina Arosquipa, por su amor incondicional, su apoyo permanente y por siempre estar a mi lado, brindándome la confianza y fuerza necesarias para seguir adelante. A mi hermano y hermana, por ser mi fuente de motivación, así como a Mónica Silvia Sucasara Adco por ayudarme a alcanzar este y muchos logros

Aracelly Venus Yanque Ramos

A Dios por ser mi guía y fortaleza inquebrantable en todo este proceso.
A mis padres, Felix Juan Yanque Quispe y Filonila Placida Ramos Coaquira, por su amor incondicional, su apoyo constante y por brindarme la confianza y fortaleza necesaria para superar cada desafío. A mis hermanas y hermano, por su apoyo firme, por sus valiosos consejos y por ser mi fuente de inspiración y guía en cada uno de mis logros.

INDICE

Resumen.....	vi
Abstract.....	vii
1. Introducción.....	8
2. Materiales y Métodos.....	11
2.1. Descripción de los sitios de monitoreo.....	11
2.2. Diseño de sistema de monitoreo de calidad de aire.....	12
2.3. Metodología de monitoreo.....	14
3. Resultado.....	16
3.1. Implementación de prototipos con ESP32, Sensores y Estructura Personalizado 3D 16	
3.2. Concentración de Material Particulado PM _{2.5}	16
3.2.1. Descripción de las fluctuaciones en las concentraciones de PM _{2.5}	17
3.3. Concentración de Material Particulado PM ₁₀	17
3.3.1. Descripción de las fluctuaciones en las concentraciones de PM ₁₀	18
3.4. Concentración de Dióxido de Carbono (CO ₂).....	19
3.4.1. Descripción de las fluctuaciones en las concentraciones de CO ₂	20
3.5. Concentración de Monóxido de Carbono (CO).....	20
3.5.1. Descripción de las fluctuaciones en las concentraciones de CO.....	21
3.6. Modelo matemático por Holt Winters y Arima.....	21
4. Discusiones.....	24
4.1. Material Particulado (PM _{2.5} y PM ₁₀).....	25
4.2. Monóxido de Carbono (CO).....	27
4.3. Dióxido de carbono (CO ₂).....	28
4.4. Influencia de la dirección del viento en la dispersión de contaminantes.....	29
5. Conclusiones.....	30
Referencias.....	31
6. Anexos.....	36

Aplicación de sensores de bajo costo para monitorear la contaminación del aire (CO₂, CO, y PM₁₀ y PM_{2.5}) en cuatro Colegios del Distrito de San Miguel, Puno - Perú

Resumen

El monitoreo de la calidad del aire en las regiones en desarrollo sigue siendo un desafío debido al acceso limitado a las estaciones tradicionales de monitoreo del aire. Este estudio investiga la aplicación de sensores de bajo costo (PMS5003 para PM_{2.5} y PM₁₀, MH-Z19B para CO₂ y MiCS-6814 para CO) para monitorear la contaminación del aire en cuatro colegios del distrito de San Miguel, Puno, Perú. El objetivo fue capturar variaciones espaciales y temporales en las concentraciones de partículas (PM_{2.5} y PM₁₀), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂). Los datos se recopilaron de forma diaria durante el mes en mayo de 2024, utilizando redes de monitoreo basadas en IoT. Los hallazgos revelaron una variabilidad significativa en las concentraciones monitoreadas, siendo los niveles de PM_{2.5}, PM₁₀ y CO₂ más altos en áreas urbanizadas con alto tráfico vehicular y actividades económicas locales, mientras que se observaron niveles más bajos en zonas de regiones suburbanas. A pesar de estar por debajo de los umbrales de seguridad internacionales, las concentraciones de CO y CO₂ mostraron patrones preocupantes que podrían tener implicaciones para la salud a largo plazo. El estudio demuestra la eficacia de los sensores de bajo costo a la hora de proporcionar datos de alta resolución sobre la calidad del aire, destacando el potencial de una aplicación más amplia en regiones con recursos limitados. Estos hallazgos resaltaron la necesidad de un monitoreo continuo y la implementación de estrategias de mitigación para proteger la salud pública, especialmente en poblaciones vulnerables como los escolares.

Palabras clave: calidad del aire, sensores, material particulado, monóxido de carbono, dióxido de carbono, IoT, Salud ambiental

Application of low-cost sensors to monitor air pollution (CO₂, CO, and PM₁₀ and PM_{2.5}) in four schools in the District of San Miguel, Puno - Peru.

Abstract

Air quality monitoring in developing regions remains a challenge due to limited access to traditional air monitoring stations. This study investigates the application of low-cost sensors (PMS5003 for PM_{2.5} and PM₁₀, MH-Z19B for CO₂, and MiCS-6814 for CO) to monitor air pollution in four schools in the district of San Miguel, Puno, Peru. The objective was to capture spatial and temporal variations in particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), carbon monoxide (CO), and carbon dioxide (CO₂) concentrations. Data were collected on a daily basis during the month of May 2024, using IoT-based monitoring networks. Findings revealed significant variability in monitored concentrations, with PM_{2.5}, PM₁₀, and CO₂ levels being highest in urbanized areas with high vehicular traffic and local economic activities, while lower levels were observed in suburban regions. Despite being below international safety thresholds, CO and CO₂ concentrations showed worrying patterns that could have long-term health implications. The study demonstrates the effectiveness of low-cost sensors in providing high-resolution air quality data, highlighting the potential for broader application in resource-limited regions. These findings highlighted the need for continued monitoring and implementation of mitigation strategies to protect public health, especially in vulnerable populations such as schoolchildren.

Keywords: air quality, sensors, particulate matter, carbon monoxide, carbon dioxide, IoT, environmental health.

1. Introducción

Diversos contaminantes son emitidos a la atmósfera desde varias fuentes industriales, como la minería, las plantas de procesamiento de metales no ferrosos y la combustión de combustibles fósiles (Cuciurean et al., 2024). Sin embargo, los impactos ambientales de las industrias a pequeña escala, especialmente en áreas industriales con alta concentración de estas actividades, no han sido suficientemente estudiados. Este fenómeno genera efectos acumulativos que pueden afectar potencialmente a los grupos más vulnerables (Simatupang et al., 2024).

La contaminación del aire por actividades antropogénicas es el resultado de una combinación compleja de gases y material particulado (MP) (Schaidhauer et al., 2024). A pesar de la implementación de políticas gubernamentales para mitigar estos impactos, las industrias locales continúan siendo una fuente importante de contaminación del aire (Lee et al., 2024). Aunque estas actividades generan una gran cantidad de partículas contaminantes (MP) y sustancias tóxicas, todavía hay poca información sobre los riesgos para la salud. Esto se debe a que no se han realizado evaluaciones completas de las emisiones industriales (Yang et al., 2024).

Entre los contaminantes más frecuentes en las ciudades se encuentran las partículas finas, conocidas como $PM_{2.5}$. Estas partículas se generan principalmente por el tráfico vehicular, actividades industriales y la quema de biomasa (Ilenič et al., 2024). El material particulado se divide en dos clases principales tanto como las PM_{10} , con un tamaño inferior a 10 micrómetros y las $PM_{2.5}$, con un diámetro menor a 2.5 micrómetros (Khadom et al., 2024). Monitorear estas partículas representa un gran reto, especialmente en los países en desarrollo, donde la falta de estaciones para medir la calidad del aire a menudo dificulta obtener datos claros y precisos sobre la concentración de estas partículas en el ambiente (Yang et al., 2024). La calidad del aire es un tema fundamental para la salud pública, ya que la contaminación atmosférica provoca millones de muertes en todo el mundo cada año (Zhang et al., 2023).

Entre los contaminantes más peligrosos destacan las partículas finas, conocidas como $PM_{2.5}$, debido a su capacidad para penetrar profundamente en el sistema respiratorio. Estas partículas no solo alcanzan los pulmones, sino que también pueden ingresar al torrente sanguíneo, lo que las convierte en una amenaza grave para la salud (Márquez Lázaro et al., 2024). Investigaciones recientes han señalado que las partículas $PM_{2.5}$ son incluso más perjudiciales que las PM_{10} . Esto se debe a su menor tamaño, que les permite sortear los mecanismos naturales de defensa del organismo y estar vinculadas a enfermedades más graves (Khadom et al., 2024). La exposición a estas partículas se ha asociado con afecciones como la EPOC (enfermedad pulmonar obstructiva crónica), que puede deteriorar significativamente la calidad de vida de quienes la padecen (Zhou et al., 2024).

Aunque en los países de altos ingresos se han logrado avances importantes para mejorar la calidad del aire, en las naciones de ingresos bajos y medios todavía hay mucho camino por recorrer. La investigación en estas regiones sigue siendo limitada (Hilly et al., 2024). Una posible solución ha sido el desarrollo de redes de sensores económicos. Estos sensores ayudan a reducir los costos de monitoreo y ofrecen datos en tiempo real, haciendo que la información sea más accesible y útil (Feng et al., 2024). Aunque menos precisos que las estaciones de monitoreo convencionales, estos sensores permiten vigilar la calidad del aire en áreas desatendidas (Bachechi et al., 2024). Avances recientes en la tecnología de sensores de bajo costo han permitido su adopción en regiones como el África subsahariana, donde las concentraciones de partículas son especialmente altas (Gualtieri et al., 2024). La instalación de monitores de bajo costo en lugares comunitarios, como escuelas y parques, puede ofrecer información valiosa sobre las fuentes locales de contaminación y la exposición. Con la participación de la comunidad, este tipo de monitoreo puede ayudar a mitigar estos problemas (Pradhan et al., 2024). Así mismo la importancia de realizar el monitoreo de la calidad de aire en las escuelas se debe ya que las redes de monitoreo convencionales no llegan a dichos lugares, el acceso es limitado, y no se brinda una vigilancia continua sobre la salud por lo que también los niños son particularmente

susceptibles a los efectos adversos que se tiene sobre material particulado (Pradhan et al., 2024). Este estudio propone el diseño de un sistema de monitoreo de calidad del aire de bajo costo, utilizando la plataforma ESP32, sensores económicos de material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}) y gases como (CO y CO_2).

2. Materiales y Métodos

2.1. Descripción de los sitios de monitoreo

La implementación de sensores de bajo costo en centros educativos es esencial para el monitorear variaciones locales de contaminantes donde los sistemas tradicionales de monitoreo no son de fácil acceso, promoviendo la vigilancia, y participación comunitaria en áreas urbanas de alta exposición, especialmente donde la población infantil pasa gran parte de su tiempo. (Bainomugisha et al., 2024; Pradhan et al., 2024).

Para la instalación de los prototipos de monitoreo de calidad del aire en el distrito de San Miguel, provincia de San Román, Puno, se seleccionaron cuatro centros educativos representativos de diferentes niveles de enseñanza. Estos sitios fueron escogidos estratégicamente para abarcar de manera efectiva diferentes áreas de la ciudad, garantizando una cobertura geográfica amplia y la captura de datos relevantes tanto en zonas urbanas como semiurbanas.

Tabla 1

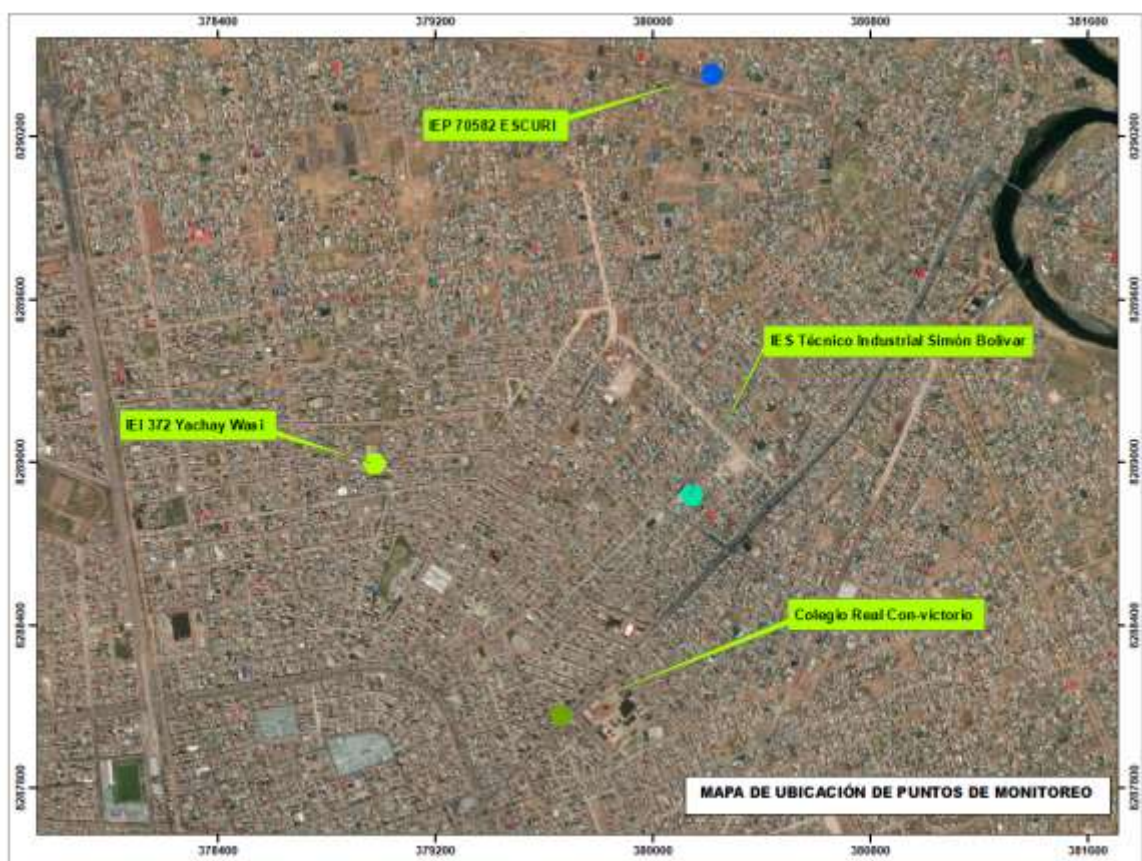
Estaciones de monitoreo de la calidad de aire

Estación de monitoreo	Institución Educativa	Coordenadas		Fuentes De Contaminación
		Este	Norte	
1	IEI 372 Yachay Wasi	378977.14	8288997.10	Presencia de polvo, parque automotor
2	IEP 70582 ESCURI	380212.40	8290433.97	Presencia de polvo, fuentes móviles
3	IES Técnico Industrial Simón Bolívar	380144.38	8288878.02	Presencia de polvo, transporte publico
4	Colegio Real Convictorio	379661.57	8288065.78	Presencia de polvo, parque automotor, fuentes de área

La tabla 1 muestra la ubicación de estos cuatro puntos de monitoreo, fue planificada para asegurar una cobertura representativa en distintas áreas del distrito de San Miguel. Este enfoque permite que las mediciones reflejen bien las variaciones ambientales entre diferentes partes de la ciudad y, por lo tanto, conduzcan a una mejor comprensión de la exposición local a contaminantes y a acciones de mitigación más efectivas (Chatzidiakou et al., 2023; Pradhan et al., 2024).

Figura 1

Ubicación de puntos de monitoreo



2.2. Diseño de sistema de monitoreo de calidad de aire

Se diseñó un sistema de monitoreo de la calidad del aire utilizando sensores específicos para cada parámetro, enfocándose en la metodología empleada y los componentes utilizados en su elaboración. Para la detección de partículas en el aire, se empleó el sensor PMS5003. Que representa una combinación óptima de eficiencia y costo

para la detección efectiva de partículas finas como $PM_{2.5}$. este sensor utiliza tecnología láser para contar y medir partículas, y tras una calibración adecuada puede ser efectivo como equipos de referencia lo que hace útil el costo y la eficiencia son factores clave (Bulot et al., 2023). Aunque presenta limitaciones al contar partículas más grandes como PM_{10} su precisión en la detección de partículas finas lo convierte en el candidato ideal para estudios centrados en monitorear contaminantes relevantes para la salud en áreas urbanas y educativas (Kaur & Kelly, 2023). Además ha sido aplicado en el monitoreo a gran escala de parámetros ambientales, capturando datos espaciales y temporales de alta resolución y considerando variaciones locales que los métodos tradicionales podrían ignorar (Malyan et al., 2024).

Para la medición de dióxido de carbono (CO_2), se seleccionó el sensor MH-Z19B, que mide en un rango de 0 a 5000 ppm utilizando tecnología infrarrojo no dispersivo (NDIR). Esta tecnología permite realizar mediciones muy precisas y confiables al detectar la absorción específica de CO_2 en el aspecto infrarrojo. En muchos estudios, este sensor ha demostrado ser de alta precisión y estabilidad, siendo apropiado para aplicaciones de monitoreo ambiental en tiempo real (Coulby et al., 2021). Los sensores MH-Z19B se han utilizado extensamente en interiores y entornos urbanos o educativos para obtener mediciones precisas de los niveles de CO_2 , fundamentalmente para la salud pública y bienestar integral de las personas (Toschke et al., 2022). La tecnología NDIR permite mediciones selectivas y estables, reduciendo la interferencia de otros gases y garantizando la fiabilidad de los datos a largo plazo (Coulby et al., 2021; Toschke et al., 2022). Además este dispositivo puede conectarse con microcontroladores como el ESP32, lo que facilita su uso en un sistema IoT donde se requiere un monitoreo continuo de la calidad del aire (Toschke et al., 2022).

Para la detección de monóxido de carbono (CO) se optó por el sensor MiCS-6814, que utiliza tecnología de óxidos metálicos semiconductores para detectar concentraciones de CO en el rango de 1 a 1000 ppm. Este sensor es altamente sensible y selectivo, garantizando datos confiables incluso bajo condiciones atmosféricas cambiantes (Eneh

et al., 2023; Frederickson et al., 2023). En estudios enfocados en la exposición prolongado al CO en poblaciones vulnerables, como estudiantes en entornos escolares, su alta precisión es crucial para evaluar el riesgo para la salud (Del Orbe et al., 2022; Krishna Swayampakula et al., 2024). La robustez del sensor y su compatibilidad para integrarse fácilmente en un sistema de monitoreo basado en IoT permiten un seguimiento continuo de las concentraciones de CO en tiempo real. Esta información es muy útil para reducir la contaminación en estudios urbanos, al correlacionar las emisiones de CO con otros factores ambientales (Collado et al., 2024; Lin et al., 2024). Por tanto, estas características respaldan que el MiCS-6814 es adecuado para el monitoreo de la calidad del aire en San Miguel, Puno, con mediciones precisas y confiables en diversas condiciones ambientales, reforzando su uso en estudios destinados a proteger la salud pública en áreas urbanas afectadas por contaminantes atmosféricos (Smulko et al., 2022).

El sistema completo se basa en la plataforma ESP32, que actúa como núcleo central conectando todos los sensores y gestionando la comunicación con redes IoT. Esto permite soluciones robustas, eficientes y en tiempo real, mejorando la precisión de los datos y flexibilidad en su uso en diferentes entornos, siendo así muy importante para el monitoreo ambiental (Lin et al., 2024).

2.3. Metodología de monitoreo

Las redes de sensores de bajo costo, integradas en sistemas IoT desempeñarán un papel crítico en el monitoreo ambiental a largo plazo, al permitir una alta resolución espacial y temporal en áreas urbanas, con una calibración adecuada estos dispositivos complementan sólidamente las redes de instrumentos de calidad regulatoria mejorando la comprensión de las tendencias en la calidad del aire a lo largo del tiempo (Feng et al., 2024).

Altura y ubicación de los sensores: los dispositivos de monitoreo se instalaron a una altura estándar de 1.5 metro sobre el nivel del suelo, siguiendo las recomendaciones nacionales para estaciones de calidad de aire. Esta altura permite una medición

representativa de la exposición humana a los contaminantes atmosféricos (MINAM, 2019). De acuerdo con los Criterios Establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos EPA, La ubicación de los sensores debe considerarse factores adicionales para garantizar mediciones representativas y precisas, para partículas como $PM_{2.5}$ y PM_{10} deben ubicarse a una altura entre 2 y 15 metros del suelo, dependiendo del objetivo del monitoreo, y deben situarse a una distancia mínima de 10 veces la altura de cualquier obstrucción cercana para evitar interferencias. Además, es esencial que la superficie sea natural, como césped corto o tierra no irrigada, para prevenir reflejos de calor que puedan distorsionar las mediciones (EPA, 2008).

Parámetros meteorológicos y su importancia: se integraron sensores meteorológicos para registrar variables como temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento. Estos parámetros son fundamentales para interpretar datos de calidad de aire, ya que influyen en la dispersión y concentración de los contaminantes atmosféricos. Tales como la velocidad y dirección del viento afectan en transporte de partículas y gases mientras que la temperatura y humedad pueden influir en la reacciones químicas en la atmosfera y en la eficiencia de los sensores (Zhou et al., 2024).

Frecuencia de almacenamiento de Datos: el muestreo se realizó registrando datos de $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO_2 Y CO a intervalos de cinco minutos durante un periodo de un mes, esta frecuencia de almacenamiento permite capturar variaciones significativas en la calidad de aire sin generar transmitieron en tiempo real a través de la plataforma ESP31 conectada a una red IoT, lo que facilita respuestas rápidas ante cambios importantes en las condiciones ambientales.

3. Resultado

3.1. Implementación de prototipos con ESP32, Sensores y Estructura Personalizado 3D

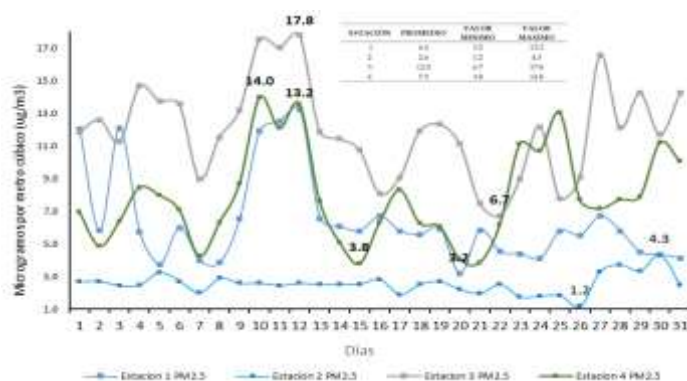
La plataforma ESP32 permite desarrollar prototipos versátiles mediante la integración de diversos sensores y conexiones que facilitan la recopilación de datos y el control de dispositivos. Al complementar esta configuración con estructuras personalizadas creadas mediante impresión 3D, se logra una solución adaptada a las necesidades específicas del proyecto. Esto permite no solo optimizar la disposición y fijación de los componentes, sino también mejorar la funcionalidad y el diseño general, creando un sistema robusto y eficiente para aplicaciones de IoT y automatización como lo muestra en la figura 7. y figura 8.

3.2. Concentración de Material Particulado PM2.5

La figura 2 muestra la tendencia de las concentraciones promedio diarias de material particulado PM_{2.5}, registradas en cuatro estaciones de monitoreo ubicadas en distintas zonas de San Miguel, Puno, durante mayo de 2024. Los datos se capturaron con una frecuencia de un minuto, y los valores diarios promedio se utilizaron para elaborar la gráfica.

Figura2

Evolución de las concentraciones promedio diarias de material particulado PM2.5 en cuatro estaciones de monitoreo durante el mes de mayo 2024.



3.2.1. Descripción de las fluctuaciones en las concentraciones de PM_{2.5}

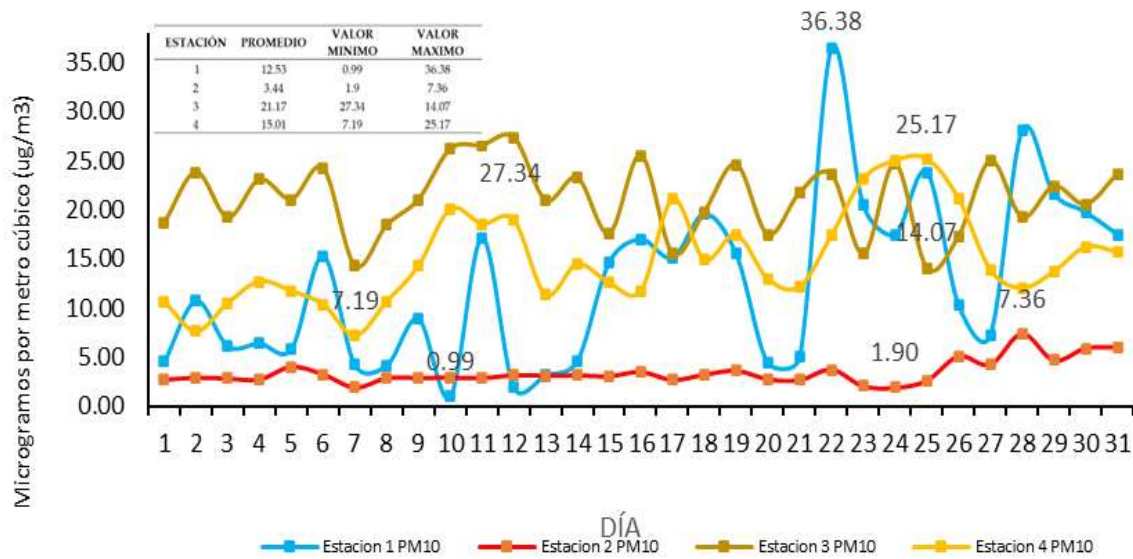
- **Estación 1:** Los niveles de PM_{2.5} en esta estación es de 3.2 µg/m³ en el día 20. como valor mínimo y 13.2 µg/m³ el día 12. como valor máximo y el promedio de este es de 6.4 µg/m³.
- **Estación 2:** Esta estación presenta valores muy estables y bajos, como valor mínimo tenemos 1.2 µg/m³ y valor máximo 4.3 µg/m³, manteniéndose en el rango de 2 a 3 µg/m³ como promedio 2.6 µg/m³ durante todo el período de estudio.
- **Estación 3:** Muestra las fluctuaciones más altas alcanzado un pico de 17.8 µg/m³ el día 12 y un valor mínimo de 6.7 µg/m³ el día 21 se tiene un promedio de 12 µg/m³.
- **Estación 4:** Las concentraciones de PM_{2.5} en esta estación como valor mínimo de 3.8 µg/m³ el día 15 y un valor máximo de 14.8 µg/m³ el día 10 así mismo se tiene un promedio de 7.9 µg/m³.

3.3. Concentración de Material Particulado PM₁₀

La figura 3 muestra la evolución de las concentraciones promedio diarias de material particulado PM₁₀ medidas en las cuatro estaciones de monitoreo distribuidas en diferentes zonas de San Miguel, Puno, durante el mes de mayo de 2024. Los datos también fueron recolectados con una frecuencia de un minuto, y los valores diarios promedio se utilizaron para elaborar la gráfica.

Figura3

Evolución de las concentraciones promedio diarias de material particulado PM₁₀ en cuatro estaciones de monitoreo durante el mes de mayo 2024



3.3.1. Descripción de las fluctuaciones en las concentraciones de PM₁₀

- **Estación 1:** Las concentraciones de PM₁₀ se mantuvieron relativamente bajas, el valor mínimo de 0.99 µg/m³ en el día 10 el valor máximo es de 36.38 µg/m³ en el día 21 y se tiene como promedio 12.53 µg/m³.
- **Estación 2:** Esta estación presenta niveles estables y bajos, alrededor de 1.9 µg/m³ en el día 10 y como valor máximo 7.36 en el día 28 y como promedio ponderado se tiene 3.44 µg/m³ lo que está en un nivel bajo a lo largo del periodo de monitoreo
- **Estación 3:** Se registraron las concentraciones más altas en el día 12 con un pico de 27 µg/m³ el día 25 con un valor mínimo de 14.07 µg/m³, así mismo se tiene un promedio de 21.17 µg/m³.
- **Estación 4:** Las concentraciones en esta estación con un pico de 25.17 µg/m³ el día 25 y un promedio mínimo de 7.19 µg/m³ en el día 28, lo que es notable que

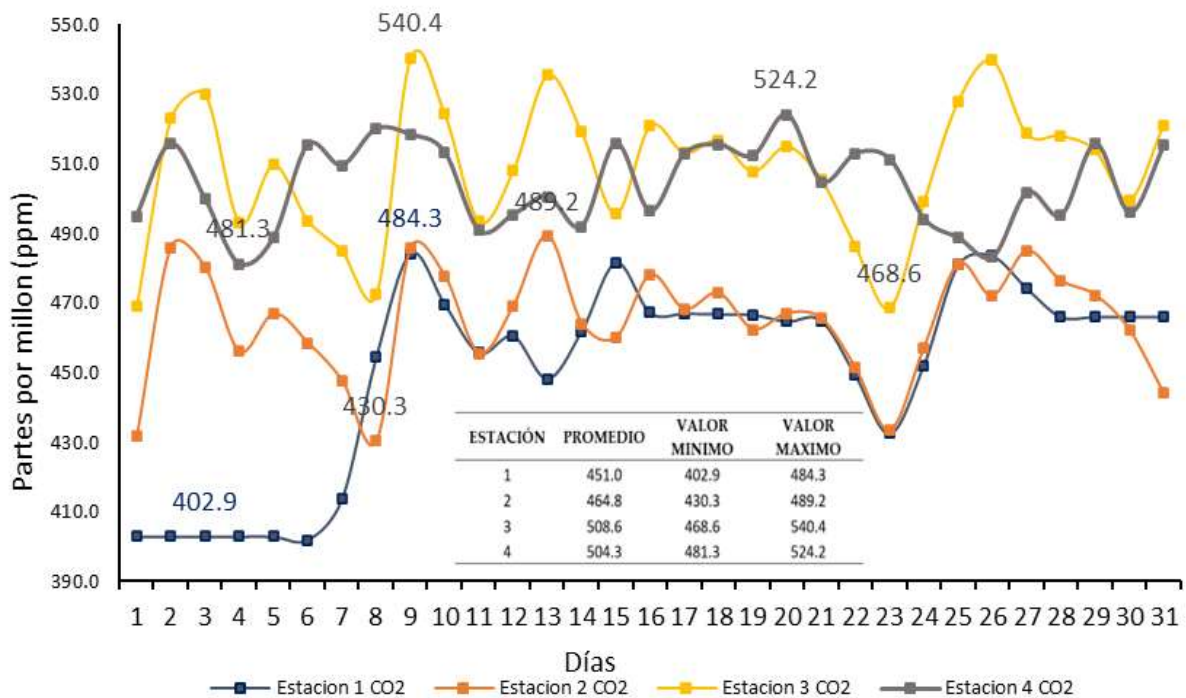
en el día 25 el material particulado llega a un pico más que los demás días, así mismo el promedio es de 15.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.4. Concentración de Dióxido de Carbono (CO_2)

La figura 4 presenta la evolución de las concentraciones promedio diarias de dióxido de carbono (CO_2) registradas en cuatro estaciones de monitoreo ubicadas en distintas zonas de San Miguel, Puno, durante el mes de mayo de 2024. Los datos fueron recolectados con una frecuencia de un minuto y los valores diarios promedio se utilizaron para la elaboración de la gráfica.

Figura 4

Evolución de las concentraciones promedio diarias de dióxido de carbono (CO_2) en cuatro estaciones de monitoreo durante el mes de mayo de 2024.



3.4.1. Descripción de las fluctuaciones en las concentraciones de CO₂

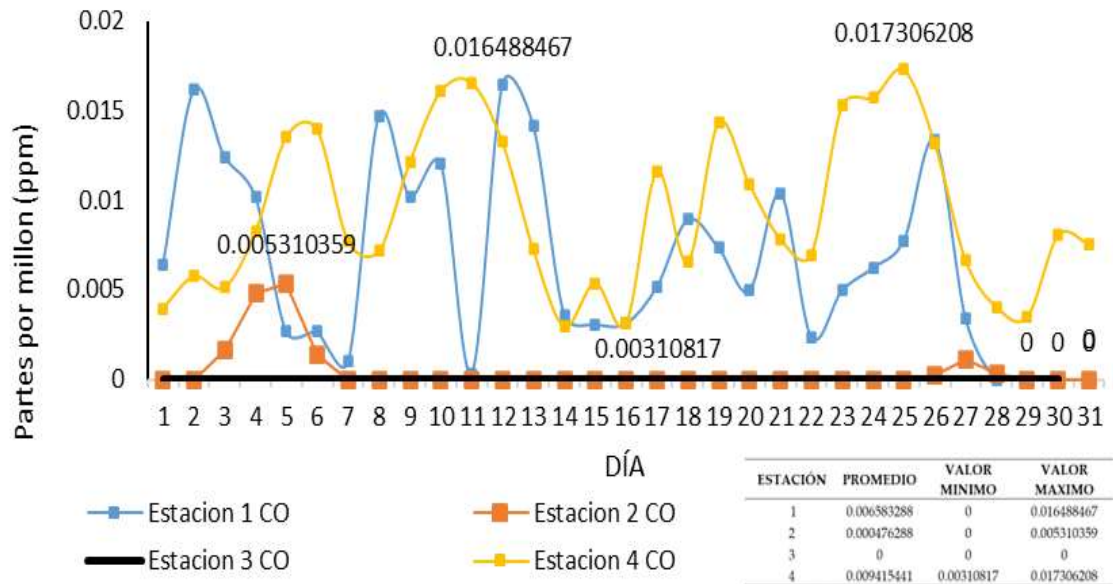
- **Estación 1:** Las concentraciones de CO₂ valor mínimo de 402.9 ppm el día 3 del monitoreo y día que tuvo un incremento notable es de 484.3 siendo el día 9, así mismo el promedio es de 451 ppm.
- **Estación 2:** Esta estación mostró valores más estables, se tiene como valor mínimo 430.3 ppm el día 8 y el día 13 con un valor de 489.2 ppm, así mismo el promedio de CO₂ de los días monitoreados es de 464.8 ppm.
- **Estación 3:** se tiene un valor máximo de 540.4 ppm y un valor mínimo de 468.6 esto es entre los días 9 y 23 donde se registra un valor mínimo, así mismo se tiene un promedio de 508.6 ppm.
- **Estación 4:** Esta estación presentó valores muy consistentes, con concentraciones de CO₂ y el día registrado con un valor mínimo es de 481.3 ppm el 4 día de monitoreo y como valor máximo se registró en el día 20 con 524.2 ppm.

3.5. Concentración de Monóxido de Carbono (CO)

La figura 5 presenta la evolución de las concentraciones promedio diarias de monóxido de carbono (CO) medidas en tres estaciones de monitoreo en San Miguel, Puno, durante el mes de mayo de 2024. Los datos fueron recolectados con una frecuencia de un minuto, y los valores promedio diarios se utilizaron para la elaboración de la gráfica.

Figura 5

Evolución de las concentraciones promedio diarias de monóxido de carbono (CO) en cuatro estaciones de monitoreo durante el mes de mayo de 2024.



3.5.1. Descripción de las fluctuaciones en las concentraciones de CO

- **Estación 1:** Se registró en el día 12 del monitoreo con un valor de 0.016 ppm siendo uno de los más elevados de todo el mes.
- **Estación 2:** Se registró un valor de 0.005 siendo uno de los datos más significativos del mes de monitoreo en cuanto a CO.
- **Estación 3:** Esta estación presentó niveles insignificantes de CO, con valores cercanos a cero durante todo el período de monitoreo.
- **Estación 4:** Muestra fluctuaciones considerables, con picos que alcanzaron 0.017 ppm registrado en el día 25 del monitoreo.

3.6. Modelo matemático por Holt Winters y Arima

Se realizó un análisis de modelo matemático para observar el comportamiento de los monitoreos, utilizando la data obtenida. Se aplicaron dos métodos de modelado: ARIMA y

Holt-Winters. De ambos, el ajuste proporcionado por el modelo resultó ser más cercano a la realidad, proporcionando una representación precisa de los datos observados.

Tabla 2

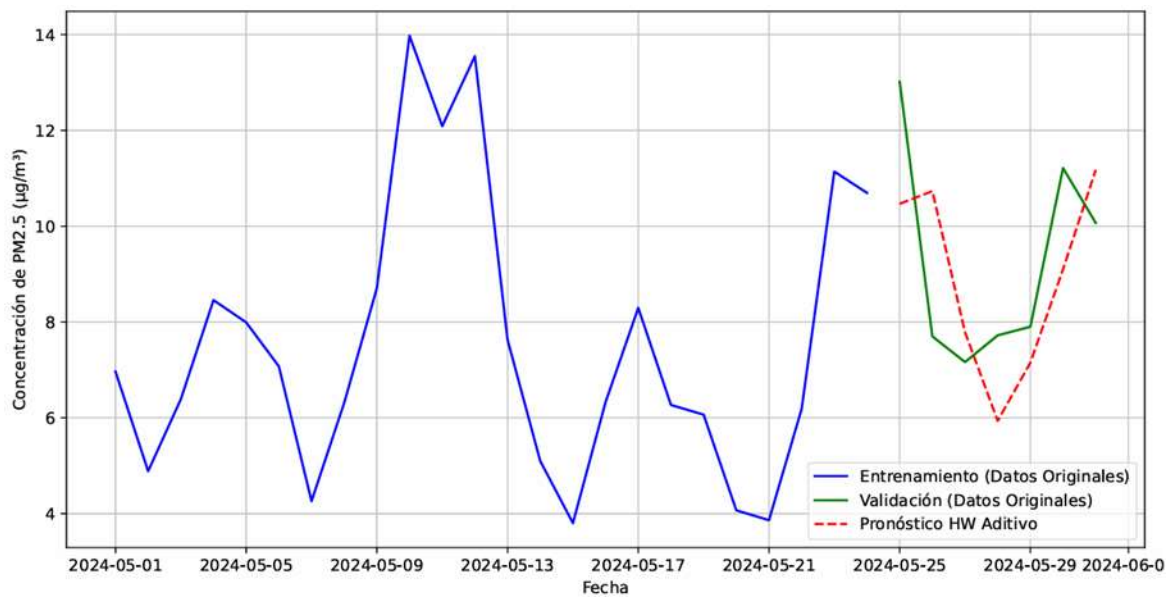
Modelos matemáticos para PM_{2.5}

Material Particulado (PM _{2.5})								
	Estación 1		Estación 2		Estación 3		Estación 4	
Datos	Modelo Holt		Modelo Arima	Modelo Holt Winters	Modelo Arima	Modelo Holt Winters	Modelo Arima	Modelo Holt Winters
	Arima	Winters						
RMSE	1.1913248	2.1389463	1.5024523	1.3536820	3.8801745	2.1723166	1.9880838	1.9093381
MAE	0.9780991	1.8918312	1.3360869	1.1628541	3.3001672	1.7012447	1.5562655	1.7082243
R²	0.8414000	4.9359131	1.1924555	0.7797651	-0.8524534	0.4193813	0.0668145	0.1392753
AIC	120.6468876	55.7800166	17.5220099	45.4288199	118.7764924	55.1284374	112.1042824	51.0183076

La figura 6 del modelo de Holt Winters, tiene un R² más ajustado de la estación 3 teniendo una predicción de datos más cercanos a los datos reales.

Figura 6

Modelo HOLT WINTERS Estación 3 PM_{2.5}.



Se observa que el modelo ARIMA aplicado en la estación 2 se tiene un valor de 17.520099 lo cual indica un buen ajuste, por lo que esta estación tiene un mejor equilibrio entre la precisión y la simplicidad en las predicciones para el PM_{2.5}.

Tabla3

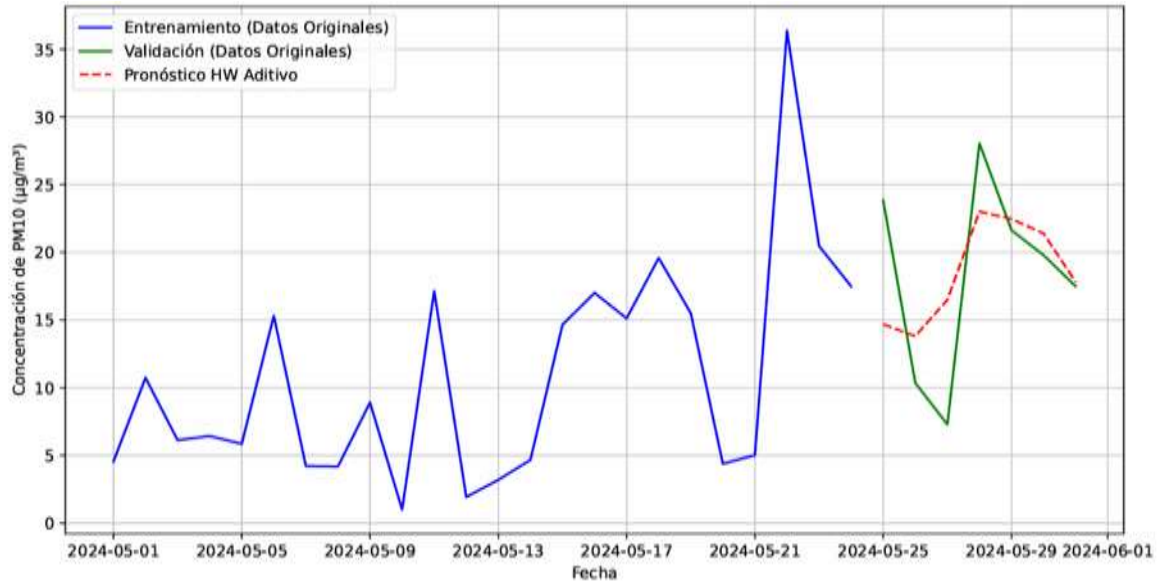
Modelos matemáticos para PM₁₀

Material Particulado (PM ₁₀)								
	Estación 1		Estación 2		Estación 3		Estación 4	
Datos	Modelo Arima	Modelo Holt Winters	Modelo Arima	Modelo Holt Winters	Modelo Arima	Modelo Holt Winters	Modelo Arima	Modelo Holt Winters
RMSE	5.549767	5.467985	2.284522	2.654621	4.448723	3.692170	5.125710	7.077101
MAE	4.377896	4.22901	2.064387	2.328841	3.276151	2.615829	4.750627	6.279464
R²	0.335278	0.354725	-	-2.631901	0.607229	0.107058	0.404484	1.677399
AIC	174.888637	107.817135	52.136227	-	20.481035	139.062448	73.798867	139.432539
				20.481035				65.354015

La figura 7 del modelo de Holt Winters, tiene un R^2 más ajustado de la estación 1 teniendo una predicción de datos más cercanos a los datos reales.

Figura 7

Modelo HOLT WINTERS Estacio 1 PM_{10} .



Se observó que el modelo ARIMA para el PM_{10} en la estación 2 se visualiza un buen ajuste, teniendo un valor de 52.1362227, por lo que dicha estación tiene un mejor equilibrio entre la precisión y la simplicidad en las predicciones.

4. Discusiones

Los parámetros meteorológicos pueden afectar en la medición de los sensores (Franco et al., 2022), el cuadro 4 muestra la influencia de los parámetros meteorológicos cuando se realiza monitoreo de la calidad de aire.

Tabla 4*Influencia de parámetros meteorológicos en monitoreo de calidad de aire.*

Parámetros Meteorológicos	Influencia En Monitoreo De Parámetros
Temperatura	La variación de la temperatura y la concentración de material particulado muestra una correlación débil, concluyendo que los cambios de temperatura tienen poca influencia sobre la concentración de material particulado.
Humedad	La humedad presenta una relación o comportamiento semejante a la precipitación con relación a material particulado, presentado una relación de humedad y material particulado importante pudiendo influir en el tamaño aparente y la cantidad de partículas en el aire.
Viento	La relación de velocidad del viento y la concentración de material particulado afecta directamente al realizar el monitoreo de material particulado, teniendo una tendencia alta o moderada, cuando una variable tiende a subir la otra tiende a bajar. El viento superficial parece jugar de manera desigual según el tipo de tiempo (estación del año) también influye la ubicación de la estación de monitoreo y la altura donde se realice el monitoreo.
Precipitación	Durante el tiempo de precipitaciones pluviales presenta una tendencia a disminuir en el grado de contaminación por material particulado, mostrando una relación inversamente proporcional.

Fuente 1: Efecto de los parámetros meteorológicos sobre la concentración de partículas PM_{2.5} en ciudades del estado de Guanajuato (Villafaña L et al., 2022) , influencia de la humedad de las medidas de pm_{2.5} en monitores comunitarios (Franco et al., 2022).

4.1. Material Particulado (PM_{2.5} y PM₁₀)

Las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ observadas en las estaciones de monitoreo evidenciaron una variabilidad espacial significativa, lo que refleja las diferencias en la exposición a fuentes de contaminación locales. En particular, los picos de PM_{2.5} registrados en las estaciones 3 y 4 como se muestra en la figura 3 y figura 4, situadas en áreas con

mayor tráfico vehicular y actividad industrial, son consistentes con estudios previos que destacan el impacto de transporte y las emisiones por las actividades humanas en las concentraciones de partículas finas en entornos urbanos (Feng et al., 2024; Kaur & Kelly, 2023). Estos resultados sugieren que las fuentes de emisión locales, como la quema de combustibles fósiles y actividades industriales, contribuyen de manera significativa a la contaminación del aire en estas áreas.

Por otro lado, las estaciones 1 y 2 ubicadas en áreas menos urbanizadas, presentaron niveles considerablemente más bajos de $PM_{2.5}$, lo que refuerza la hipótesis de que las áreas con menor densidad vehicular y actividad industrial tienen una menor exposición a estos contaminantes.

Estos resultados coinciden con otros estudios que han mostrado cómo la distribución geográfica influye directamente en las concentraciones de PM, especialmente en regiones menos afectadas por actividades antropogénicas (Chatzidiakou et al., 2023; Feng et al., 2024).

En cuanto al PM_{10} , las estaciones cercanas a zonas de construcción o áreas de mayor movimiento de tierra, como se pudo presenciar en la estación 3, registraron las concentraciones más elevadas. Este resultado es coherente con investigaciones que sugieren que el PM_{10} está fuertemente relacionado con actividades mecánicas, como la construcción y la remoción de tierra, que generan partículas gruesas (Amoah et al., 2023; Kaur & Kelly, 2023). Aunque las partículas de PM_{10} no penetran tan profundamente en el sistema respiratorio como las $PM_{2.5}$, sus altas concentraciones siguen siendo motivo de preocupación, especialmente en áreas escolares, donde los niños son más vulnerables y efectos nocivos de la contaminación del aire (Del Orbe et al., 2022).

Otros estudios recientes, como el de (Feng et al., 2024), han validado las tecnologías de sensores de bajo costo para la medición de $PM_{2.5}$ y PM_{10} , destacando su capacidad para proporcionar datos de alta resolución espacial y temporal, siempre que estén adecuadamente calibrados. En estos entornos, los sensores, incluido el PMS5003 utilizado en nuestro estudio, se han convertido en herramientas eficaces y asequibles para

el monitoreo ambiental, con una cobertura más amplia que las estaciones de monitoreo tradicionales.

4.2. Monóxido de Carbono (CO)

Las concentraciones de CO registradas en las estaciones de monitoreo revelaron una alta variabilidad espacial, lo que refleja las diferencias en la exposición a fuentes locales de contaminación. En particular, se registró valores mínimos de CO en las 4 estaciones de monitoreo (Del Orbe et al., 2022; Frederickson et al., 2023). Así, se puede deducir que las principales fuentes de emisiones provienen de la quema de combustibles fósiles en vehículos. La actividad vehicular en estas zonas parece contribuir directamente a los niveles de contaminación del aire

Este hallazgo coincide con estudios que indican que la distribución geográfica influye directamente en las concentraciones de CO, especialmente en regiones menos impactadas por actividades humanas (Collado et al., 2024; Eneh et al., 2023).

A pesar de que las concentraciones de CO registradas no superan los límites establecidos por las normativas internacionales, la exposición prolongada a bajas concentraciones de CO puede afectar la salud humana, especialmente en poblaciones vulnerables como los niños y personas con enfermedades respiratorias preexistentes (Smulko et al., 2022). Aunque el CO no penetra tan profundamente en el sistema respiratorio como otros contaminantes, sus concentraciones, incluso a niveles bajos, siguen siendo motivo de preocupación en áreas escolares y urbanas (Del Orbe et al., 2022).

Finalmente, el uso de sensores de bajo costo para medir el CO, como el MiCS-6814 utilizado en este estudio, ha demostrado ser una herramienta eficaz para proporcionar datos de alta resolución espacial y temporal después de una adecuada calibración (Frederickson et al., 2023).

Esto permite una mayor cobertura en áreas que carecen estaciones de monitoreo tradicional, lo que resulta crucial para mejorar la vigilancia ambiental en regiones con recursos limitados.

4.3. Dióxido de carbono (CO₂)

Las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) monitoreadas en las estaciones mostraron fluctuaciones notables, lo que refleja la variabilidad en la exposición a fuentes de emisiones locales. En particular las estaciones 3 y 4, cercanas a las zonas con mayor densidad vehicular y actividades económicas locales, registraron las concentraciones más altas de CO₂, superando los 500 ppm. Este tipo de actividad confirma los resultados obtenidos en estudios previos, los cuales tanto el tráfico vehicular como las actividades económicas locales, se identificaron emisores más importantes de CO₂ en entornos urbanos (Coulby et al., 2021; Toschke et al., 2022).

Las concentraciones elevadas en estas dos estaciones revelan una fuerte relación entre las emisiones de CO₂ y la quema de combustibles fósiles, lo que subraya la necesidad de adoptar estrategias de mitigación en estas áreas.

Por otro lado, las estaciones 1 y 2, ubicadas en zonas menos urbanizadas, presentaron niveles más bajos de CO₂, lo que respalda la teoría de que las regiones con menor actividad antropogénica tienden a tener menores concentraciones de este gas. La distribución geográfica y la densidad de población han demostrado estar significativamente relacionadas con la concentración de CO₂ (Bainomugisha et al., 2024; Collado et al., 2024). En estas localidades, la concentración no cambió de manera significativa, lo que demuestra que la influencia de las actividades humanas en la calidad del aire es menor.

Aunque las concentraciones de CO₂ registradas no alcanzaron niveles peligrosos según las normativas internacionales, los picos observados podrían tener efectos negativos a largo plazo si no se toma medidas preventivas y correctivas. Las concentraciones elevadas de CO₂, pueden contribuir al efecto invernadero, al calentamiento global, agravando problemas ambientales tanto a nivel global (Bainomugisha et al., 2024; Toschke et al., 2022). Además, en espacios cerrados, como las aulas de los centros educativos, donde se realizó el monitoreo, la acumulación de CO₂, podrían afectar el rendimiento cognitivo de los estudiantes, como lo sugieren estudios previos (Coulby et al., 2021).

El uso del sensor MH-Z19B para la mediciones de CO₂ demostró ser una herramienta eficaz y precisa, especialmente en entornos escolares y urbanos, donde es crucial obtener datos confiables en tiempo real (Toschke et al., 2022). Este sensor, está basado en la tecnología NDIR, ha sido ampliamente validado por otros estudios por su capacidad para proporcionar datos de consientes de CO₂, minimizando la interferencia de otros gases (Coulby et al., 2021).

La posibilidad de integras este sensor en redes IoT amplía con su aplicativo para un monitoreo continuo, lo que proporcional una solución eficiente y de bajo costo para evaluar la calidad del aire en áreas donde no se disponen de estaciones tradicionales (Collado et al., 2024).

4.4. Influencia de la dirección del viento en la dispersión de contaminantes

La dirección del viento es predominante hacia el este y sureste, según la figura 13, según la rosa de vientos que tiene un impacto directo en la dispersión y acumulación de contaminantes atmosféricos como el PM_{2.5} y 10 en el área de monitoreo. La mayor parte de las velocidades de viento se encuentra entre 2.1 y 3.6 m/s. Estas velocidades son moderadas, pero aportan en la dispersión de partículas a estaciones más alejadas, las velocidades mayores a 5.7 m/s tiende a tener mayor dispersión de estos contaminantes. En la estación 3 y 4 tiene más picos de contaminantes de PM_{2.5} y 10 esto es debido a la dirección del viento y otras actividades humanas.

5. Conclusiones

Los hallazgos de este estudio revelan la efectividad del uso de sensores de bajo costo para el monitoreo de la calidad de aire en los colegios , donde se tuvo en cuenta los siguientes parámetros como $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO y CO_2 donde se presentaron variaciones significativas ,según las fuentes locales con contaminación como tráfico vehicular y las actividades comerciales , la disposición de estos sensores , en combinación con tecnologías IoT, representa una herramienta crítica para el monitoreo continuo y la vigilancia de la salud pública de la calidad de aire asegurando datos referenciales y accesibles en área con recursos limitados

Los posibles efectos en la salud de estos contaminantes, especialmente en el entorno escolar, resaltan la necesidad de una vigilancia continua y adoptar medidas para mitigar su impacto en la salud, resaltando la necesidad de una vigilancia continua y de políticas públicas que reduzca las emisiones contaminantes y que protejan la salud pública.

Referencias

- Amoah, N. A., Xu, G., Kumar, A. R., & Wang, Y. (2023). Calibration of low-cost particulate matter sensors for coal dust monitoring. *Science of The Total Environment*, 859, 160336. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160336>
- Bachechi, C., Rollo, F., & Po, L. (2024). HypeAIR: A novel framework for real-time low-cost sensor calibration for air quality monitoring in smart cities. *Ecological Informatics*, 81, 102568. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102568>
- Bainomugisha, E., Adrine Warigo, P., Busigu Daka, F., Nshimye, A., Birungi, M., & Okure, D. (2024). AI-driven environmental sensor networks and digital platforms for urban air pollution monitoring and modelling. *Societal Impacts*, 3, 100044. <https://doi.org/10.1016/j.socimp.2024.100044>
- Bulot, F. M. J., Ossont, S. J., Morris, A. K. R., Basford, P. J., Easton, N. H. C., Mitchell, H. L., Foster, G. L., Cox, S. J., & Loxham, M. (2023). Characterisation and calibration of low-cost PM sensors at high temporal resolution to reference-grade performance. *Heliyon*, 9(5), e15943. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15943>
- Chatzidiakou, L., Archer, R., Beale, V., Bland, S., Carter, H., Castro-Faccetti, C., Edwards, H., Finneran, J., Hama, S., Jones, R. L., Kumar, P., Linden, P. F., Rawat, N., Roberts, K., Symons, C., Vouriot, C., Wang, D., Way, L., West, S., ... Burridge, H. C. (2023). Schools' air quality monitoring for health and education: Methods and protocols of the SAMHE initiative and project. *Developments in the Built Environment*, 16, 100266. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100266>
- Collado, E., Calderón, S., Cedeño, B., De León, O., Centella, M., García, A., & Sáez, Y. (2024). Open-source Internet of Things (IoT)-based air pollution monitoring system with protective case for tropical environments. *HardwareX*, 19, e00560. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2024.e00560>

- Coulby, G., Clear, A. K., Jones, O., & Godfrey, A. (2021). Low-cost, multimodal environmental monitoring based on the Internet of Things. *Building and Environment*, 203, 108014. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108014>
- Cuciurean, C. I., Sidor, C. G., Camarero, J. J., Buculei, A., & Badea, O. (2024). Detecting changes in industrial pollution by analyzing heavy metal concentrations in tree-ring wood from Romanian conifer forests. *Environmental Research*, 252, 118884. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118884>
- Del Orbe, D. V., Park, H. J., Kwack, M.-J., Lee, H.-K., Kim, D. Y., Lim, J. G., Park, I., Sohn, M., Lim, S., & Lee, D.-S. (2022). Breath analyzer for personalized monitoring of exercise-induced metabolic fat burning. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 369, 132192. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.132192>
- Eneh, A. H., Udanor, C. N., Ossai, N. I., Aneke, S. O., Ugwoke, P. O., Obayi, A. A., Ugwuishiwu, C. H., & Okereke, G. E. (2023). Towards an improved internet of things sensors data quality for a smart aquaponics system yield prediction. *MethodsX*, 11, 102436. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102436>
- EPA. (2008). Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems (No. IV; Versión 2.0). EPA-454/B-08-002. (Final)
- Feng, Z., Zheng, L., Ren, B., Liu, D., Huang, J., & Xue, N. (2024). Feasibility of low-cost particulate matter sensors for long-term environmental monitoring: Field evaluation and calibration. *Science of The Total Environment*, 945, 174089. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174089>
- Franco, P., Iglesias, R., Machado, S., Pizzorno, P., Mañay, N., & Laborde, A. (2022). 25 al 27 de octubre de 2022 Cámara Mercan5l de productos del país.
- Frederickson, L. B., Russell, H. S., Fessa, D., Khan, J., Schmidt, J. A., Johnson, M. S., & Hertel, O. (2023). Hyperlocal air pollution in an urban environment—Measured with low-cost sensors. *Urban Climate*, 52, 101684. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101684>

- Gualtieri, G., Ahbil, K., Brilli, L., Carotenuto, F., Cavaliere, A., Gioli, B., Giordano, T., Katiellou, G. L., Mouhaimini, M., Tarchiani, V., Vagnoli, C., Zaldei, A., & Bacci, M. (2024). Potential of low-cost PM monitoring sensors to fill monitoring gaps in areas of Sub-Saharan Africa. *Atmospheric Pollution Research*, 15(7), 102158. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102158>
- Hilly, J. J., Singh, K. R., Jagals, P., Mani, F. S., Turagabeci, A., Ashworth, M., Mataka, M., Morawska, L., Knibbs, L. D., Stuetz, R. M., & Dansie, A. P. (2024). Review of scientific research on air quality and environmental health risk and impact for PICTS. *Science of The Total Environment*, 942, 173628. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173628>
- Ilenič, A., Pranjić, A. M., Zupančič, N., Milačič, R., & Ščančar, J. (2024). Fine particulate matter (PM_{2.5}) exposure assessment among active daily commuters to induce behaviour change to reduce air pollution. *Science of The Total Environment*, 912, 169117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169117>
- Kaur, K., & Kelly, K. E. (2023). Laboratory evaluation of the Alphasense OPC-N3, and the Plantower PMS5003 and PMS6003 sensors. *Journal of Aerosol Science*, 171, 106181. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2023.106181>
- Khadom, A. A., Albawi, S., Abboud, A. J., Mahood, H. B., & Hassan, Q. (2024). Predicting air quality index and fine particulate matter levels in Bagdad city using advanced machine learning and deep learning techniques. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 262, 106312. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106312>
- Krishna Swayampakula, S. S., Vishal Vedangi, K., Vishwanath Kumar Panangipalli, Madhu Gummadavelli, Narayana Mala, Manjula Naik Banavath, & Naveen Paladugu. (2024). Design and development of a CanSat for air pollution monitoring with RSSI based position retrieval system. *Advances in Space Research*, S0273117724001856. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.02.042>
- Lee, S.-J., Song, C.-K., & Choi, S.-D. (2024). Past and recent changes in the pollution characteristics of PM₁₀ and SO₂ in the largest industrial city in South Korea.

Atmospheric Environment, 319, 120310.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120310>

Lin, Y.-C., Yang, S.-C., Wu, S.-C., & Chen, C.-C. (2024). Developing a system for the real-time collection and analysis of mobile vehicle emission data. *Results in Engineering*, 23, 102706. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102706>

Malyan, V., Kumar, V., Moni, M., Sahu, M., Prakash, J., Choudhary, S., Raliya, R., Chadha, T. S., Fang, J., & Biswas, P. (2024). Assessing the spatial transferability of calibration models across a low-cost sensors network. *Journal of Aerosol Science*, 181, 106437. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2024.106437>

Márquez-Lázaro, J., Madera, M., & Bernabe, E. (2024). Particulate matter 2.5 exposure during pregnancy and birth outcomes: Evidence from Colombia. *Science of The Total Environment*, 927, 172369. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172369>

MINAM. (2019). *PROTOCOLO NACIONAL DE MONITOREO DE LA CALIDAD AMBIENTAL DEL AIRE*. <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/363557-10-2019-minam>

Pradhan, B., Jayaratne, R., Thompson, H., & Morawska, L. (2024). An application of low-cost sensors to monitor children's exposure to air pollution at five schools in Queensland, Australia. *Atmospheric Environment*, 325, 120424. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120424>

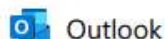
Schaidhauer, A. C. G., Costa, F. V. D., & Melo-Júnior, J. C. F. D. (2024). Air pollution generated in an industrial region: Effect on the cardiovascular health of humans and damage caused to a plant species, *Piper gaudichaudianum* (Piperaceae), used for biomonitoring. *Environmental Pollution*, 360, 124584. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124584>

Simatupang, C. A., Santhaweesuk, K., Strezov, V., Pongkiatkul, P., Boontanon, N., Jindal, R., & Boontanon, S. K. (2024). Health risk assessment of soil contamination with heavy metals in a child care center co-located in vicinity to small scale industrial

- area: Case study of Thailand. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100727. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100727>
- Smulko, J., Chludziński, T., Majchrzak, T., Kwiatkowski, A., Borys, S., Lisset Jaimes-Mogollón, A., Manuel Durán-Acevedo, C., Geovanny Perez-Ortiz, O., & Ionescu, R. (2022). Analysis of exhaled breath for dengue disease detection by low-cost electronic nose system. *Measurement*, 190, 110733. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110733>
- Toschke, Y., Lusmoeller, J., Otte, L., Schmidt, J., Meyer, S., Tessmer, A., Brockmann, C., Ahuis, M., Hüer, E., Kirberger, C., & Berben, D. (2022). Distributed LoRa based CO₂ monitoring network – A standalone open source system for contagion prevention by controlled ventilation. *HardwareX*, 11, e00261. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00261>
- Villafañía L, V. M., Chacón G, M. O., González V, J., & Trejo C, S. (2022). Efecto de los parámetros meteorológicos sobre la concentración de partículas PM_{2.5} en ciudades del estado de Guanajuato. *Verano De la Ciencia*, 16(XXVII), 12.
- Yang, Q., Liu, G., Falandysz, J., Yang, L., Zhao, C., Chen, C., Sun, Y., Zheng, M., & Jiang, G. (2024). Atmospheric emissions of particulate matter-bound heavy metals from industrial sources. *Science of The Total Environment*, 947, 174467. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174467>
- Zhang, Y., Ju, C., Qin, J., Song, L., Liu, X., Sun, W., & Li, Z. (2023). STCM: A spatio-temporal calibration model for low-cost air monitoring sensors. *Information Sciences*, 644, 119307. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119307>
- Zhou, X., Wang, J., Wang, J., & Guan, Q. (2024). Predicting air quality using a multi-scale spatiotemporal graph attention network. *Information Sciences*, 680, 121072. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.121072>

6. Anexos

Anexo 1: Evidencia de Sumisión



RV: [RICA] Envío recibido

Desde Juan Eduardo Vigo Rivera <eduardo.vigo@upeu.edu.pe>

Fecha Dom 17/11/2024 18:24

Para Jhoangel Supo Espinoza <jhoangel.supo@upeu.edu.pe>; Aracelly Venus Yanque Ramos <aracelly.yr@upeu.edu.pe>; Guido Raul Quenaya Calcina <guido.quenaya@upeu.edu.pe>

De: Claudio M. Amescua Garcia via Revista Internacional de Contaminación Ambiental <rica@atmosfera.unam.mx>

Enviado: domingo, 17 de noviembre de 2024 18:22

Para: Juan Eduardo Vigo Rivera <eduardo.vigo@upeu.edu.pe>

Asunto: [RICA] Envío recibido

vigo.rivera:

Gracias por enviarnos su manuscrito "Aplicación de sensores de bajo costo para monitorear la contaminación del aire (CO₂, CO, y PM10 y PM2.5) en cuatro Colegios del Distrito de San Miguel, Puno- Perú: Application of low cost sensors to monitor air pollution (CO₂, CO and PM10 y PM 2.5) in four schools in the district of San Miguel, Puno-Peru" a Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Gracias al sistema de gestión de revistas online que usamos podrá seguir su progreso a través del proceso editorial identificándose en el sitio web de la revista:

URL del manuscrito:

<https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/authorDashboard/submission/55450>

Nombre de usuario/o: jevr72

Si tiene cualquier pregunta no dude en contactar con nosotros/as. Gracias por tener en cuenta esta revista para difundir su trabajo.

Claudio M. Amescua Garcia

Revista Internacional de Contaminación Ambiental <https://www.revistascca.unam.mx/rica>

ANEXO 2: Resolución de inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo



"AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO"

RESOLUCIÓN N° 0665-2023/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Naña 14 de noviembre de 2023

VISTO:

El expediente de **Guido Raul Quenaya Calcina**, identificado(a) con Código Universitario N° 201812083, **Jhoangel Joël Supo Espinoza**, identificado(a) con Código Universitario N° 201812049 y **Aracelly Venus Yanque Ramos**, identificado(a) con Código Universitario N° 201812091, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Guido Raul Quenaya Calcina**, **Jhoangel Joël Supo Espinoza** y **Aracelly Venus Yanque Ramos**, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Evaluación de la calidad de aire con sensores de bajo costo en plataforma Arduino (CO₂, CO, PM 10 y PM 2.5) en cuatro colegios de la Municipalidad de San Miguel, Puno-Perú" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 14 de noviembre de 2023, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "Evaluación de la calidad de aire con sensores de bajo costo en plataforma Arduino (CO₂, CO, PM 10 y PM 2.5) en cuatro colegios de la Municipalidad de San Miguel, Puno-Perú" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar al (a) **MSc. Renny Daniel Diaz Aguilar** como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: **MSc. Rose Adeline Callata Chura** y **Ing. Veronika Haydeé Mamani Pari**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA




Mg. Ketty Magaly Arellano Lino
SECRETARIA ACADÉMICA

cc:
-Interesado
-Asesor
-Dirección General de Investigación
-Archivo

Anexo 3: Panel Fotográfico

Figura 8

Plataforma (SP32) y sensores para el monitoreo de la calidad de aire

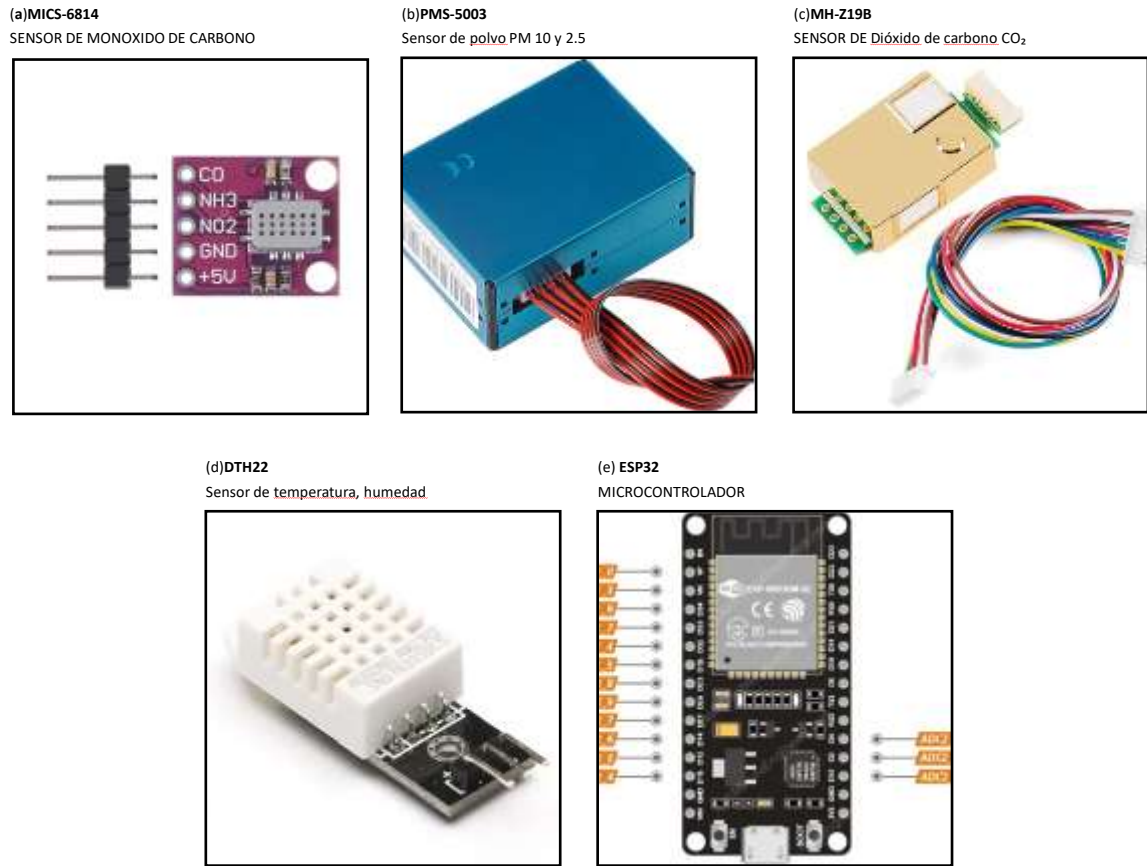


Figura 9

Implementación de prototipos con ESP32, Sensores y Estructura Personaliza 3D

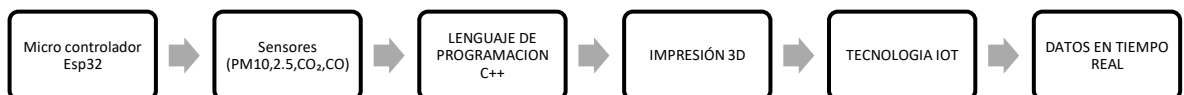


Figura 10

Temperatura del mes de mayo.

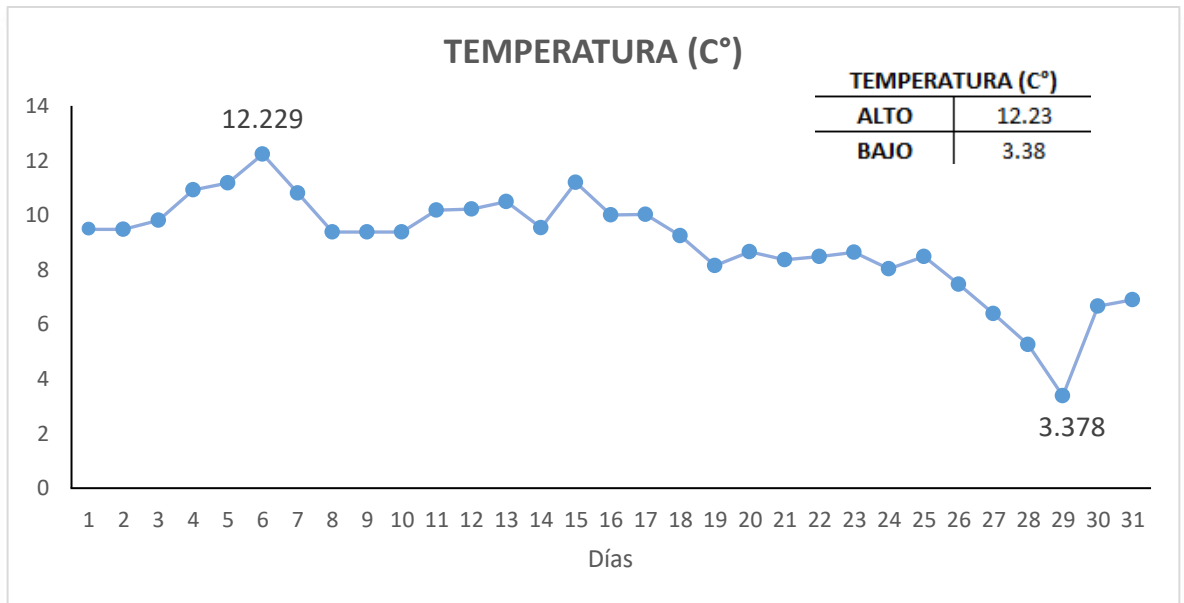


Figura 11

Humedad del mes de mayo.

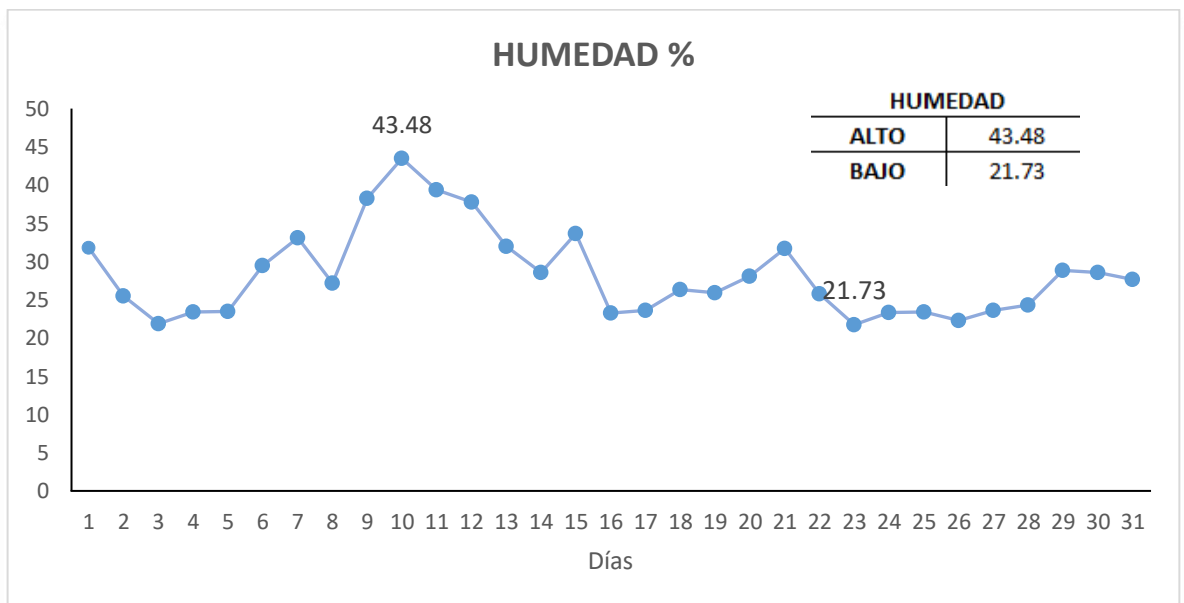


Figura 12

Sensores seleccionados para monitoreo de la calidad de aire y Plataforma ESP3.

(A) INSTALACION DEL EQUIPO



(B) MONITOREO DE PRUEBA DEL EQUIPO



(C) PROCESO DE ARMADO DEL EQUIPO



(D) ROSA DE VIENTO DEL MES MAYO

