

Generación de mapas de contaminación por material particulado mediante sistemas embebidos: caso de estudio en Cúcuta (Colombia)

Generation of Particulate Matter Pollution Maps through Embedded Systems: Case Study in Cúcuta (Colombia)

Geração de mapas de poluição por material particulado por meio de sistemas embebidos: estudo de caso em Cúcuta (Colômbia)

Jeison Eduardo Eslava Pedraza^{a*} | Franyer Adrian Martínez Sarmiento^b
| Ángel Joseph Soto Vergel^c | Edwin José Vera Rozo^d | Dinael Guevara Ibarra^e

^a<https://orcid.org/0000-0002-3477-2776> Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

^b<https://orcid.org/0000-0003-0393-7678> Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

^c<https://orcid.org/0000-0001-5093-0183> Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

^d<https://orcid.org/0000-0002-2533-1952> Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

^e<https://orcid.org/0000-0003-3007-8354> Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

- Fecha de recepción: 2021-03-29
- Fecha concepto de evaluación: 2021-08-24
- Fecha de aprobación: 2021-08-31
<https://doi.org/10.22335/rlct.v13i3.1433>

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Eslava-Pedraza, J. E., Martínez-Sarmiento, F. A., Soto-Vergel, Á. J., Vera-Rozo, E. J., & Guevara-Ibarra, D. (2021). Generación de mapas de contaminación por material particulado mediante sistemas embebidos: caso de estudio en Cúcuta (Colombia). *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 13(3), 86-97. <https://doi.org/10.22335/rlct.v13i3.1433>

RESUMEN

En la actualidad, la contaminación ambiental es un problema de alto impacto en tanto a múltiples contaminantes, y principalmente el material particulado, pueden llegar a ser dañinos para la salud e incluso mortales; debido a ello, los principales entes gubernamentales han establecido estrategias para su monitoreo y control mediante estaciones fijas. Por este motivo, se desarrolla la caracterización del material particulado en el barrio Trigal del Norte de la ciudad de Cúcuta (Colombia), mediante un sistema móvil adaptable a múltiples estructuras, que incorpora una interfaz gráfica conectada a la red para el bosquejo de mapas de intensidad de contaminantes. El método propuesto tiene un alcance exploratorio/descriptivo, con un enfoque cualitativo y cuantitativo, y es aplicado mediante un diseño experimental que se basa en la identificación y selección de tecnologías, el diseño y ensamble del circuito electrónico y el desarrollo del software de integración tecnológica. Como resultado, se obtuvo un sistema compacto que presenta mapas de intensidad y gráficas de comportamiento, observándose que de los datos obtenidos del proceso de medición se evidencian niveles de contaminación por material particulado, $PM_{2.5}$ y PM_{10} , con valores de $19.95 \mu g/m^3$ y $21.61 \mu g/m^3$, respectivamente, que cumplen con los niveles máximos permisibles según la Resolución 2254 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia.

Palabras claves: Contaminación atmosférica, sistema embebido, mapas de intensidad.

* Autor de correspondencia. Correo electrónico: jeisoneduardoep@ufps.edu.co



ABSTRACT

Currently, environmental pollution is a high impact problem, as multiple pollutants and mainly particulate matter can become harmful to health and even deadly, so the main government agencies have established strategies for monitoring and control through fixed stations. For this reason, the characterization of particulate matter in the Trigal del Norte neighborhood of the city of Cúcuta is developed by means of a mobile system adaptable to multiple structures, incorporating a graphic interface connected to the network for the drafting of pollution intensity maps. The proposed method has an exploratory/descriptive scope with a qualitative and quantitative approach, applied through an experimental design based on identification and selection of technologies, design and assembly of the electronic circuit, software development and technological integration. As a result, a compact system was obtained that presents intensity maps and behavior graphs, where it is observed that the data obtained from the measurement process present levels of contamination by $PM_{2.5}$ and PM_{10} with values of $19.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $21.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively, which comply with the maximum permissible levels according to Resolution 2254 of the Ministry of Environment and Sustainable Development of Colombia.

Keywords: Air pollution, embedded system, intensity maps.

RESUMO

Atualmente, a poluição ambiental é um problema de alto impacto, pois vários poluentes, principalmente partículas em suspensão, podem ser prejudiciais à saúde e até fatais. Por conta disso, os principais órgãos do governo estabeleceram estratégias para seu monitoramento e controle por meio de estações fixas. Por este motivo, a caracterização do material particulado é feita no bairro Trigal del Norte da cidade de Cúcuta (Colômbia), através de um sistema móvel adaptável a estruturas múltiplas, que incorpora uma interface gráfica conectada à rede para o esboço de mapas de intensidade de poluentes. O método proposto tem um escopo exploratório/descritivo, com abordagem qualitativa e quantitativa, e é aplicado por meio de um projeto experimental que se baseia na identificação e seleção de tecnologias, no desenvolvimento e montagem do circuito eletrônico e no desenvolvimento de softwares de integração de tecnologias. Como resultado, foi obtido um sistema compacto que apresenta mapas de intensidade e gráficos de comportamento, observando que a partir dos dados obtidos no processo de medição, são evidenciados os níveis de poluição por material particulado, $PM_{2.5}$ e PM_{10} , com valores de $19,95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $21,61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, que atingem os níveis máximos permitidos de acordo com a Resolução 2254 do Ministério do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da Colômbia.

Palavras-chave: Poluição atmosférica, sistema embebido, mapas de intensidade

El material particulado es un contaminante compuesto principalmente por polvo de minerales, agua, sulfatos, nitratos, amoníaco y hollín, los cuales forman una mezcla de partículas sólidas y líquidas, orgánicas e inorgánicas, que se dispersan en el aire, con diámetros del orden de micrómetros (μm , milésima parte de un milímetro), y que afectan la salud de la población en general, cuando es expuesta constantemente a cantidades significativas de tales partículas contaminantes (Green & Sánchez, 2013; Organización Mundial de la Salud [OMS], 2005).

Por esta razón, Colombia ha establecido una normativa propia, tomando como base los parámetros internacionales de la OMS. A fin de prevenir a futuro daños al medioambiente y a la salud mediante la regulación de

la contaminación por material particulado, se fija la normativa nacional en la Resolución 2254 del 1 de noviembre de 2017 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017), que especifica la clasificación para estos contaminantes mediante rangos y colores, a fin establecer qué tan dañinas para la salud pueden llegar a ser las emisiones de estas partículas en una población que está expuesta a ellas diariamente. Estos parámetros se establecen con el objetivo de regular las industrias, el flujo de vehículos automotores, la emisión de hidrocarburos y las fuentes antropogénicas que contribuyen en mayor medida a la generación de estos contaminantes (Ilizarbe-González et al., 2020). La tabla 1 presenta la clasificación de los contaminantes según dicha normativa.

Tabla 1
 Índices de calidad del aire

Categoría	Color	Rangos	
		PM ₁₀ µg/m ³	PM _{2.5} µg/m ³
Buena	Verde	0 - 54	0 - 12
Aceptable	Amarillo	55 - 154	13-37
Dañina a la salud de grupos sensibles	Naranja	155 - 254	38 - 55
Dañina a la salud	Rojo	255 - 354	56 - 150
Muy dañina a la salud	Púrpura	355 - 424	151 - 250
Peligrosa	Marrón	425 - 604	251 - 500

La normativa establece los niveles máximos permisibles de PM₁₀ y PM_{2.5} para un tiempo de exposición de 24 horas, siendo estas cotas de 75 µg/m³ y 37 µg/m³ respectivamente, valores que no deben ser superados si se busca prevenir posibles enfermedades respiratorias y daños cardiovasculares en poblaciones sensibles.

En la actualidad, la sociedad empieza a concientizarse y darle mayor importancia a la contaminación del aire, debido a que la salud se ve afectada como consecuencia del incremento de gases de efecto invernadero en el planeta (Borbet et al., 2018; Huertas et al., 2012). Además, se evidencia un constante incremento en la mortalidad y la generación de enfermedades cardiovasculares causadas por partículas de material particulado suspendidas en el aire. Un ejemplo claro de estas afectaciones en la calidad de vida de las personas se observó en el 2016, cuando se contabilizaron 4.2 millones de fallecimientos a nivel mundial causados por o relacionados con esta problemática, siendo las partículas PM_{2.5} y PM₁₀ las que influyeron en ello de manera más significativa (Organización Mundial de la Salud, 2018). Por estas razones, se considera importante que la información relacionada con este tema esté al alcance de los ciudadanos, quienes con el paso de los años han mostrado interés y preocupación por su salud, cuestionándose respecto de si los lugares en los que circulan y habitan presentan buena calidad del aire (Ramírez Hernández, 2015).

Considerando lo anterior, los países han ido implementando algunas estrategias para el monitoreo de la contaminación ambiental de manera general dentro de sus territorios (Pita-Morales, 2016), generando sus propios estándares de regulación y control con base en las métricas y medidas de regulación establecidas en las normativas de la OMS relativas a material particulado,

ozono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre (Organización Mundial de la Salud, 2005) su contaminación sigue representando una amenaza importante para la salud en todo el mundo. Según una evaluación de la OMS de la carga de enfermedad debida a la contaminación del aire, son más de dos millones las muertes prematuras que se pueden atribuir cada año a los efectos de la contaminación del aire en espacios abiertos urbanos y en espacios cerrados (producida por la quema de combustibles sólidos. En Colombia, algunas ciudades han desarrollado estrategias para la estimación de contaminación del aire, abarcando zonas determinadas mediante modelos de regresión y sistemas de monitoreo fijos que, en algunos casos, se ven restringidos para medir áreas extensas (Zafra-Mejía et al., 2020; Zárate et al., 2007). Sin embargo, también se han puesto a prueba otros modelos de bajo costo para el monitoreo, empleando redes de sensores y sistemas distribuidos en las localidades (Delgado et al., 2020). Por otra parte, una alternativa para la estimación de contaminación por material particulado de múltiples sectores, que permite obtener un promedio más preciso de la región, es el uso de nodos de sensores basados en sistemas embebidos de tamaño reducido y sistemas de conectividad eficientes, adaptables a edificaciones, medios de transporte e incluso a vehículos aéreos no tripulados (Magaña Villegas & Díaz López, 2020; Messinger & Silman, 2016; Wang et al., 2020).

Por último, las tecnologías aplicadas en el desarrollo de proyectos asociados al monitoreo de la calidad del aire tienen como objetivo mejorar los sistemas y procesos para abarcar zonas extensas o de difícil acceso que, en la mayoría de los casos, no son analizadas por los altos costos en los que se incurriría al establecer estaciones fijas allí. En consecuencia, este artículo presenta un prototipo de sistema embebido, con la capacidad de adecuarse a cualquier estructura o vehículo para así monitorear y alcanzar áreas de mayores dimensiones a un costo reducido, que cuenta además con un aplicativo para la visualización de las medidas.

Método

Para el desarrollo de la investigación se implementó una metodología que considera cinco componentes: a) diseño; b) muestra; c) instrumento; d) procedimiento; y e) análisis de datos.

a) Diseño

La investigación se fundamentó mediante un enfoque cuantitativo/cualitativo, con un alcance exploratorio/descriptivo, aplicando un estudio transversal para la toma de medidas de múltiples variables en una zona específica durante tiempos establecidos.

b) Muestra

Las pruebas se desarrollaron en un periodo de dos días, obteniendo las mediciones durante horarios específicos en el barrio Trigal del Norte de la ciudad de Cúcuta, ubicada sobre la cordillera Oriental de los Andes y en la frontera con Venezuela, con una temperatura promedio de 25°C a 31°C y una humedad relativa de aproximadamente el 74%. Se trabajó específicamente en la comuna 6 de la ciudad, en el área norte, que por su posición geográfica interconecta a la ciudad de Cúcuta con diferentes municipios como Puerto Santander, Zulia y Los Patios, haciendo de este sector una zona estratégica para el monitoreo y análisis de la calidad del aire (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2018).

c) Instrumento

Para la adquisición de la información se hizo uso del sistema embebido desarrollado para la medición de PM, el cual incorpora una interfaz gráfica que permite el análisis de variables como PM, humedad y temperatura, mediante recorridos geo-localizados para la generación de los mapas de intensidad a partir de la información recolectada.

d) Procedimiento

El estudio y desarrollo del prototipo y las pruebas se ejecutó mediante cuatro fases metodológicas: i) identificación y selección de tecnologías; ii) diseño y ensamble; iii) desarrollo del software; iv) adquisición de datos (figura 1).

Identificación y selección de tecnologías

Se seleccionaron y determinaron las variables para la evaluación de contaminación por material particulado,

además de tecnologías idóneas como herramientas de hardware y software compacto, con las cuales se desarrolló la instrumentación del sistema de medición.

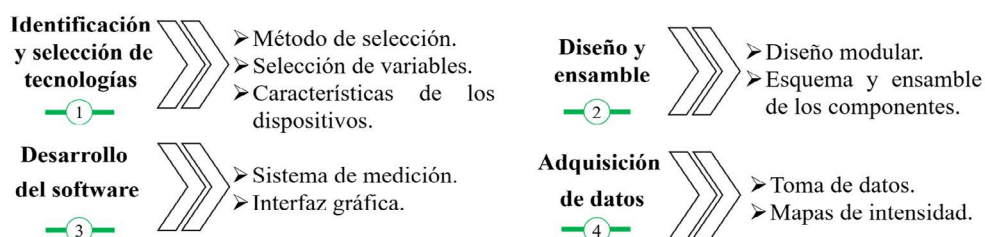
Para la selección de las variables y elementos en cuestión se incorporó inicialmente en el sistema de mediciones material particulado, en rangos de 10 µm-2.5 µm, como parámetros principales a medir. Además fue necesario considerar humedad y temperatura, debido a que ambas influyen de manera significativa en la concentración del contaminante en el aire, puesto que se hace más denso al presentarse variaciones climáticas (Rojano et al., 2012; Volná & Hladký, 2020). Por último, se consideraron las ubicaciones para la adquisición de las medidas, incorporando para esta función un módulo de posicionamiento global.

Para la identificación de los componentes óptimos a emplear se aplicó el método de decisión y selección binaria, que consiste en seleccionar y jerarquizar los parámetros más relevantes de cada dispositivo con el fin de desarrollar una matriz de atributos. Posteriormente, con los parámetros obtenidos se genera una matriz de coeficientes de énfasis y, finalmente, la matriz solución para establecer el dispositivo a utilizar que obtenga la mayor ponderación, enfatizando que resulta óptimo para su implementación de acuerdo con los atributos definidos (Cárdenas, 2010; Medina Delgado et al., 2015).

Diseño y ensamble

Se diseñó la lógica de conexión y funcionamiento estableciendo módulos de instrumentación física, de instrumento virtual y de control, incorporados en el sistema de tal forma que se permitió la escalabilidad del prototipo para adicionar variables de medición según las necesidades del proyecto. En el diseño esquemático y de *board* se definió un área máxima de 9 cm de ancho por 8 cm de largo, fijando en esa superficie los puntos de interconexión de cada elemento (Fernández, 2019).

Figura 1
Fases metodológicas



Desarrollo del software

Esta fase está compuesta por dos partes: I) codificación del sistema de mediciones, que permitió recolectar la información de los sensores y enviarla a la base de datos; II) interfaz gráfica, donde se visualizó la información obtenida con los mapas de intensidad en los periodos de medición del sistema embebido.

Codificación del sistema de medición

En esta etapa se codificó la programación para el funcionamiento del sistema de mediciones, considerando aspectos como tiempo de adquisición de datos, tipo de conexión y protocolos de comunicación empleados, basándose en una lógica de secuencia para el desarrollo de esta, así como también en la conexión hacia la base de datos.

Para la programación de la placa se empleó el lenguaje de programación Python versión 3.7, incorporando librerías de gestión de base de datos, conexión de puertos seriales y temporizadores (Clément, 2018).

Interfaz gráfica

Posteriormente se estableció el modelo de programación para el instrumento virtual y se diseñó e implementó la interfaz gráfica.

Para el desarrollo del aplicativo se emplearon modelos de programación orientada a objetos y estructuras de interfaz de usuario intuitivas, con ventanas para la visualización de la información general del proyecto, la presentación de los mapas de intensidad y las métricas estadísticas de los datos recolectados en el lenguaje de código abierto JavaFX, el cual fue seleccionado para el proyecto gracias a sus múltiples facilidades a la hora de crear modelos visuales e interactivos, además de observar una curva de aprendizaje acorde con los tiempos de ejecución del proyecto (Carrillo & Herranz, 2005).

Adquisición de datos

Se ejecutó la integración de las diferentes tecnologías y se llevaron a cabo pruebas del dispositivo en la zona establecida, validando el funcionamiento adecuado del sistema y obteniendo valores de la contaminación del sector mediante recorridos por la ruta principal de transporte público y zonas de flujo vehicular y peatonal. Además, se realizaron mediante un complemento HTML los mapas de intensidad relacionados a cada una de las variables, los cuales se visualizaron mediante la interfaz gráfica.

Análisis de datos

Los datos recolectados acorde a cada una de las variables implementadas se analizaron aplicando medidas de tendencia central y desviación estándar. Además, se generó con el total de la muestra un diagrama cronológico y un ajuste mediante la función Log-logística, donde se observó el comportamiento de las variables durante los procesos de mediciones.

Resultados

Identificación y selección de tecnologías

Se seleccionó la placa de ordenador reducida Raspberry Pi 3 B+, con un procesador de 1.4GHz, capacidad de almacenamiento de hasta 32 Gb, conectividad Bluetooth, Wi-Fi, LAN, UART, SPI, voltaje de operación de 5 v DC y dimensiones de 85.6mm de ancho, 56mm de largo y 17mm de fondo. Además, fueron seleccionados los siguientes dispositivos de medición: sensor PMS5003, para obtener valores de PM, Módulo DHT22, para la humedad/temperatura, y módulo GPS Neo-6M, para precisar la ubicación en donde se toman las mediciones. La tabla 2 presenta las especificaciones técnicas de estos componentes seleccionados, aplicando el modelo de selección binaria y estableciendo pesos para cada una de las características de los dispositivos electrónicos.

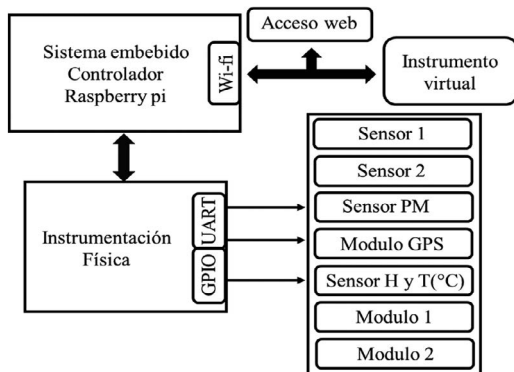
Tabla 2
 Especificaciones técnicas de los componentes que incorpora el sistema de medición

Parámetro	PMS5003	DHT22	NEO-6M
Consumo energético	100 mA	2.5 mA	67 mA
Voltaje de operación	5 v	3.3 a 6 v	3 a 5 v
Protocolo de comunicación	UART	Single Bus	UART
Peso	42.2 g	3 g	15 g
Dimensiones	50 × 38 × 21 mm	20 × 15 × 8 mm	23 × 30 × 5 mm
Resolución	1 µg/m ³	0.1 % [RH] – 0.1 °T (°C)	No aplica
Rango	(0.3 a 1.0, 1.0 a 2.5, 2.5 a 10) µg/m ³	0-100 % [RH] –40 a 80 °T (°C)	Altitud máx. 18.000 [m] Velocidad máx. 515 [m/s]
Precisión	0.3 a 0.5 µg/m ³	±2 % [RH] ±0.5 (°C)	Velocidad 0.1 [m/s] Posición 2.5 [m]

Diseño y ensamble

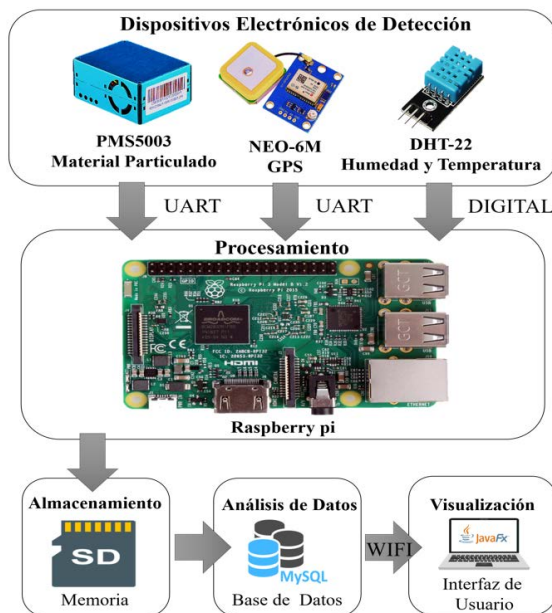
La figura 2 presenta el diagrama modular del sistema de mediciones, resaltando la facilidad del dispositivo para acondicionar nuevos componentes, establecer conexión a la red de diferentes modos, emplear diversos protocolos de comunicación y variar el instrumento virtual a otro tipo de aplicación móvil o industrial.

Figura 2
Diagrama modular



La figura 3 muestra el esquema de conexión de los componentes del sistema de mediciones y el tipo de comunicación empleado.

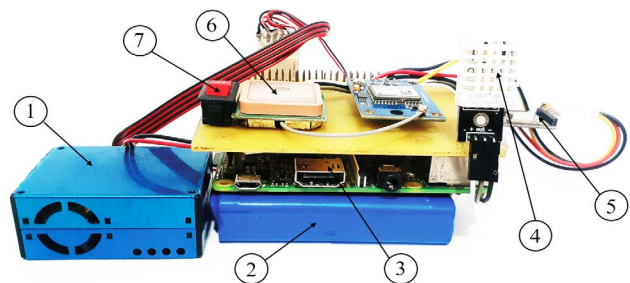
Figura 3
Esquema de conexión



El circuito electrónico se desarrolló con una estructura tipo Shield, en donde la PCB va situada en la parte superior del ordenador de placa reducida, permitiendo

agrupar de manera estratégica cada componente como se aprecia en la figura 3, obteniendo como resultado un sistema compacto de dimensiones: 85 mm de ancho por 98 mm de largo por 55 mm de fondo, que incorpora una batería intercambiable y un sistema de alimentación externo. La figura 4 presenta el prototipo de sistema de mediciones desarrollado, el cual incorpora cada uno de los dispositivos antes mencionados para la ejecución de la toma de mediciones de PM, humedad y temperatura.

Figura 4
Prototipo de sistema de mediciones



Nota: 1- sensor de material particulado; 2- batería de alimentación; 3- placa de control Raspberry PI 3 B+; 4- sensor de humedad y temperatura; 5- conector USB serial; 6- módulo de GPS; 7- interruptor de encendido y apagado.

Desarrollo del software

En este apartado se detallan los procesos para la generación y compilación del software, puntualizando dos ítems: desarrollo de la codificación del sistema de mediciones y la interfaz gráfica.

Sistema de medición

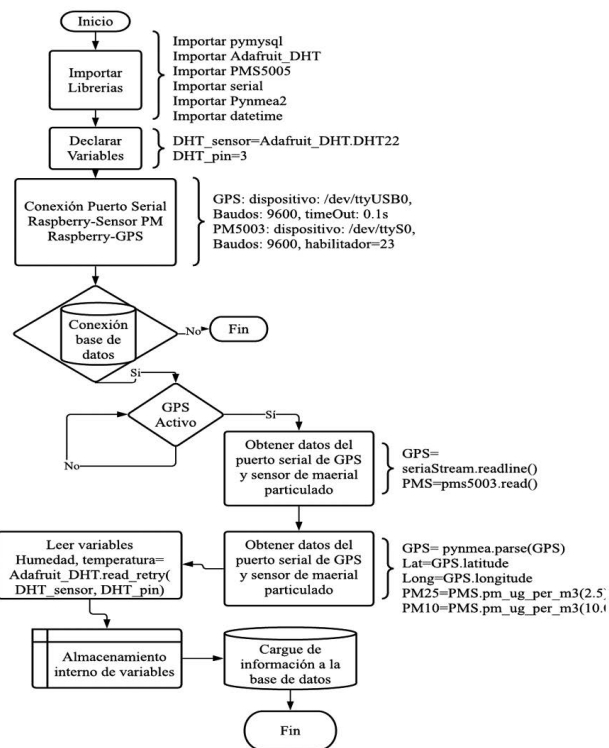
Se desarrolló el algoritmo de la figura 5, el cual permite el control del sistema de mediciones, así como la captura, almacenamiento y envío de la información a la base de datos del sistema embebido.

El algoritmo establece inicialmente las principales librerías, así como la clase DB desarrollada para la manipulación de la base de datos, la cual está compuesta por tres actividades. La primera es de activación automática, donde al llamar a la librería se definen los parámetros de conexión con la base de datos y se crea el acceso; la segunda es una función que permite la creación y el acceso a las tablas existentes en la base de datos para poder ser editadas; y la tercera permite la escritura de las mediciones en la tabla seleccionada.

Seguidamente, se declara la conexión para el uso de los puertos seriales, lo que permite manipular el módulo GPS

y el sensor de PM, además de establecer el pin de conexión para el sensor de humedad y temperatura. Después se define el acceso a la base de datos y se valida la conexión, para luego ejecutar un ciclo donde el sistema comprobará que hay datos en el puerto serial del GPS para así poder realizar la adquisición de los datos. Adicional a esto, se procede a desconcatenar los datos del puerto serial, los cuales son registrados en las variables respectivas de latitud y longitud, adquiriendo las medidas del sensor de PM. Finalmente, se procede a realizar la conversión para la lectura del sensor de humedad y temperatura para así hacer uso de la función inserción (clausula INSERT de la clase DB), añadiendo las mediciones realizadas en la tabla respectiva al día del año y reiniciando luego el ciclo de adquisición de datos.

Figura 5
 Algoritmo lógico del sistema de mediciones



Interfaz gráfica

Se define el aplicativo con un menú principal fijo que permite navegar en cuatro pestañas diferentes (figura 6): Inicio, Medidas, Estándares y Ayuda. Asimismo, la pestaña Medidas cuenta con tres ventanas secundarias: Estadística, Histórico y Descargas, que permiten visualizar toda la información recolectada por el sistema de medición.

La ventana Inicio presenta la descripción general del proyecto, con sus especificaciones generales y los datos de los desarrolladores, dándole al lector una idea generalizada de cómo está constituido este prototipo. En la pestaña Medidas aparece el contenido relacionado con las mediciones realizadas hasta la fecha, y en primera instancia se presenta un mapa de intensidad del área monitoreada, estableciendo en cada una de las zonas intensidades de color según la clasificación establecida por los entes reguladores de la calidad del aire, referente a PM, en Colombia.

Además, la pestaña tiene la funcionalidad de seleccionar la fecha y el tipo de variable a visualizar, así como también un submenú que permite acceder a tres opciones: Estadística, Histórico y Descarga. La primera subpestaña detalla el análisis estadístico aplicado a los datos recolectados por el sistema de medición diariamente, aplicando medidas de tendencia central y de dispersión, además de que permite visualizar mediante un histograma los valores de PM, que pueden ser seleccionados mediante un botón desplegable.

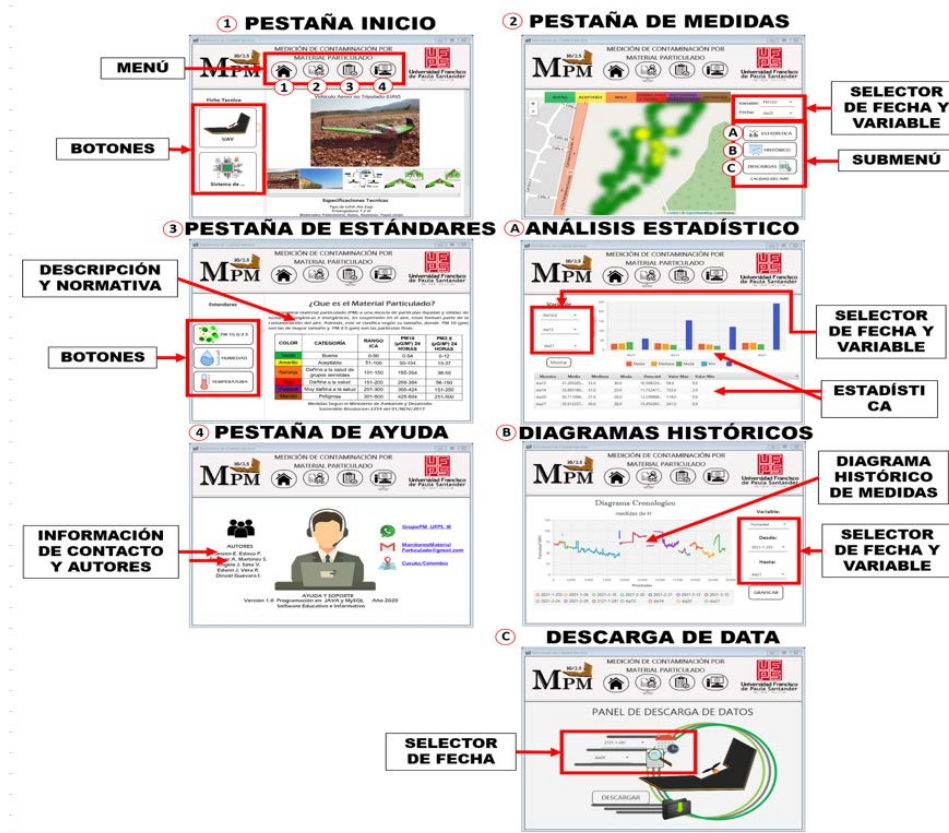
La segunda subpestaña permite al usuario seleccionar el tipo de variable y el rango de fechas de interés que requiera, para posteriormente observar mediante un diagrama la cronología de los valores de contaminación por PM en el aire. Por último, la tercera subpestaña permite descargar la documentación de los datos recolectados, con el objetivo de que el interesado pueda obtener información relevante sobre las mediciones recolectadas en este proyecto para futuras investigaciones o análisis.

Por otra parte, la ventana Estándares presenta los niveles de contaminación máximos permisibles y el tiempo de exposición para las variables $PM_{2.5}$ y PM_{10} , además de dar a conocer el estado de calidad del aire mediante un rango de valores y colores. También, en esta misma pestaña se obtiene la definición de PM según la OMS. Finalmente, la pestaña Ayuda presenta información general de la interfaz gráfica, datos de contacto y nombres de los desarrolladores y diseñadores de la misma.

Adquisición de datos

En esta última etapa se estableció la funcionalidad del sistema de medición y la interfaz gráfica, desarrollando recorridos que abarcan una zona de alto flujo vehicular de medios de transporte público y privado en el barrio Trigal del Norte. La figura 7 muestra un caso particular, con un recorrido de 1.3 km, desarrollado el día 28

Figura 6
Interfaz gráfica

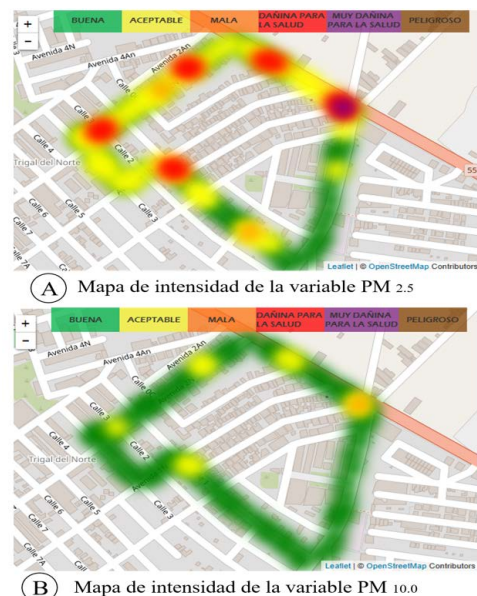


de agosto del 2020 para la toma de mediciones establecidas en tres horarios: 8:00 am, 1:00 pm y 6:00 pm, con desplazamientos que se realizaron a una velocidad promedio de 5 km/h, en un proceso mediante el cual el sistema obtenía las mediciones, las almacenaba y luego las enviaba a la base de datos, para finalmente ser representadas mediante mapas de intensidad y un análisis estadístico en la interfaz gráfica.

Las mediciones obtenidas durante los tres momentos dieron como resultado una valoración de la calidad de aire para las variables $PM_{2.5}$ y PM_{10} de Aceptable y Buena, respectivamente. No obstante, las figuras 7A y 7B detallan en los mapas los focos de contaminación encontrados en la zona analizada, evidenciando variaciones en la ruta 55, vía anillo vial, donde se observó un flujo masivo de buses de transporte, vehículos de carga pesada y volquetas, presentándose un incremento de los índices de contaminación por PM a causa de las emisiones de varios tipos de gases y partículas suspendidas en el ambiente por parte de estos automotores, lo que indica una calidad de aire dañina para la salud en determinados puntos. En la figura 7 se muestran los focos de emisiones dañinas es-

pecificadas en color rojo y morado para los lugares donde se obtuvieron los valores más altos de contaminación durante el proceso de censado de las variables de PM.

Figura 7
Mapas de intensidad de contaminación por $PM_{2.5}$ y PM_{10}



La tabla 3 presenta además las medidas promedio en cada uno de los horarios, así como los valores de humedad, temperatura y denominación de la calidad del aire, tomando como base las métricas establecidas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en la Resolución 2254 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Tabla 3
 Valores obtenidos en la medición

Hora	I. PM ₁₀	PM _{10.0} (µg/m ³)	I. PM _{2.5}	PM _{2.5} (µg/m ³)	H (%)	T (°C)
8:00 am	Buena	27.36	Aceptable	25.14	47.33	36.75
1:00 pm	Buena	14.57	Aceptable	13.60	45.36	37.75
6:00 pm	Buena	22.9	Aceptable	21.10	67.77	31.4
Promedio	Buena	21.61	Aceptable	19.95	53.49	35.30

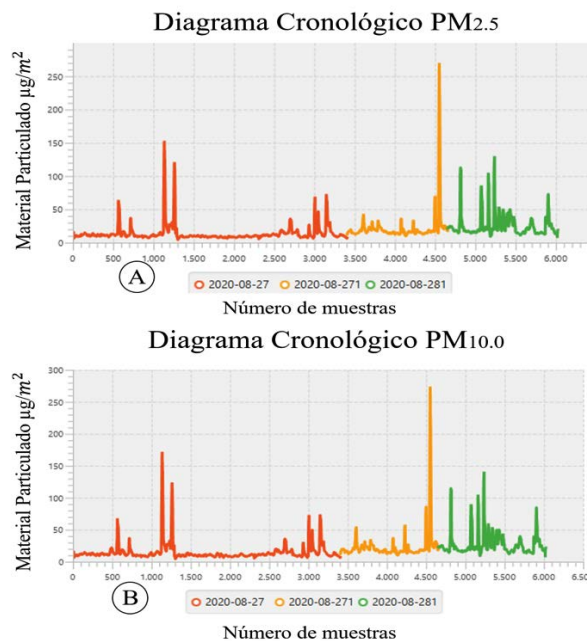
Nota: I. PM₁₀ representa el índice de contaminación por PM₁₀; I. PM_{2.5} representa el índice de contaminación por PM_{2.5}; H representa la humedad; T representa la temperatura.

■ Análisis de datos

Los resultados obtenidos durante el proceso de monitoreo arrojan que la contaminación promedio, en la zona analizada, fue de 21.61 µg/m³ para PM₁₀ y de 19.95 µg/m³ para PM_{2.5} valores por debajo de los límites máximos permisibles que establecen una calidad del aire adecuada para la población. Sin embargo, se observa un promedio de mayor contaminación en el recorrido realizado a las 8:00 de la mañana, y los picos más altos fueron obtenidos en los recorridos realizados a las 6:00 de la tarde, siendo durante estos horarios de alto flujo vehicular cuando circulan mayor cantidad de vehículos particulares, de transporte público y de carga pesada. Estos dos últimos corresponden a los de mayor propagación de contaminantes a la atmósfera debido a que su fuente de alimentación es aceite combustible para motores (ACPM).

Las figuras 8A y 8B presentan un diagrama de tiempos con las medidas, en los cuales se observa una variabilidad significativa de 17.57 µg/m³ y 18.43 µg/m³, respectivamente, con respecto a la media central, evidenciando límites que se alejan considerablemente de esta y que dan origen a esta variabilidad, presentándose en la data recolectada valores de contaminación mínimos y máximos de 7 µg/m³- 274 µg/m³ para las respectivas variables analizadas.

Figura 8
 Diagrama de mediciones



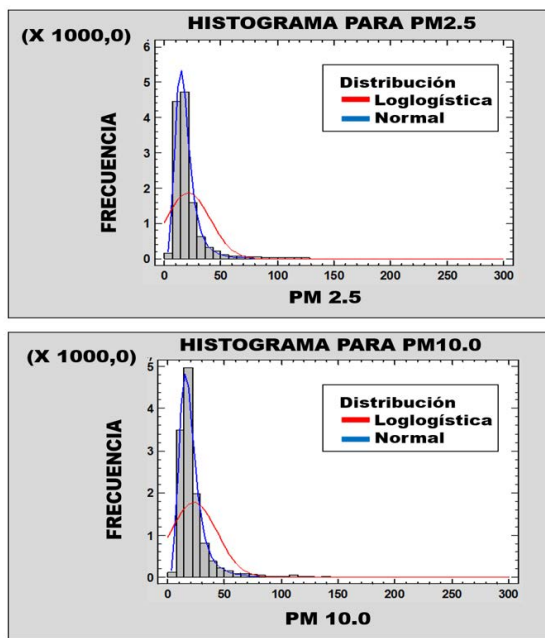
La tabla 4 presenta un resumen estadístico de las mediciones obtenidas por el sistema en cada una de sus variables, para cada recorrido realizado y según el horario establecido. Se establecen los valores obtenidos de las medidas de tendencia central y su respectiva desviación.

Tabla 4
 Descripción estadística de los datos

Variable	Hora	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Mín.	Máx.
PM _{2.5} (µg/m ³)	8:00 am	25.14	20	15	17.11	7.0	130
	1:00 pm	13.60	10	10	12.617	4.0	153
	6:00 pm	21.10	17	14	23.00	10	270
PM ₁₀ (µg/m ³)	8:00 am	27.36	22	18	17.94	7	141
	1:00 pm	14.57	11	10	13.62	4.0	172
	6:00 pm	22.9	18	16	26.81	10	274
H (%)	8:00 am	47.33	46.1	43.6	4.68	40.8	61.2
	1:00 pm	45.36	45.7	48.0	3.96	35	60
	6:00 pm	67.77	67.8	68.8	3.83	75.6	59.3
T (°C)	8:00 am	36.75	37.2	34.4	1.92	22	39.4
	1:00 pm	37.75	37.7	36.0	1.74	32.3	42.0
	6:00 pm	31.4	31.2	31.2	0.71	30.4	33.2

La figura 9 muestra un ajuste de distribución de los datos evidenciando una función Log-logística, generada a partir de la muestra recolectada, la cual resulta la más adecuada para representar la tendencia y comportamiento de los datos. Este tipo de modelo nunca presenta valores negativos y genera una única área con puntos máximos presentes en el centro de los focos contaminantes. Además, la curva de variación de los datos aparece fuertemente correlacionada, por lo que esta función presenta una tasa de incremento abrupto y luego tiende a disminuir, teniendo como parámetros principales α y β , donde α es un parámetro de escala y también es la mediana de la distribución y β es un parámetro de forma o ubicación, lo que permite que la función nunca alcance valores negativos. El punto máximo se alcanza en el segmento entre los $14.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los $21.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, donde la tendencia alcanza su valor máximo para luego decrecer.

Figura 9
Histograma de medidas de contaminación



A pesar de que el promedio de mediciones está dentro del rango permisible se logra identificar que hay focos de contaminación en puntos específicos, que sobrepasan estas medidas debido al alto flujo vial tanto de vehículos como de personas, puesto que la ruta 55 es una zona comercial con variedad de establecimientos, aspecto que afecta de manera indirecta la calidad del aire debido a las diferentes emisiones de gases presentes en esta área concurrida.

Conclusiones

Se obtuvo el desarrollo y construcción de un sistema embebido para el monitoreo de la contaminación del aire, mediante un dispositivo compuesto por sensores de humedad, temperatura, PM y un módulo GPS para su constante localización. El sistema es acondicionado a la placa Raspberry Pi 3 b+, encargada de la adquisición, adecuación y envío de la información a la base de datos desarrollada en MySQL, que mediante una aplicación de escritorio codificada en JavaFX facilita el acceso a la información de manera gráfica, permitiéndole al usuario ver el panorama de contaminación mediante un mapa de intensidad en una zona determinada.

Se desarrolló una interfaz gráfica como alternativa de información, donde se presentan los estándares de calidad, luego de los procesos de monitoreo que se lleguen a desarrollar en áreas urbanas, detallando de manera visual mapas que permitan presentar por una nube de colores, según su categoría, la calidad del aire a la que la población está expuesta, de modo que así se puedan tomar medidas de control y prevención medioambiental enfocadas al cuidado de la salud.

En ese sentido, se destaca la interfaz gráfica, que permite al usuario una interacción con el sistema embebido, el cual puede tener acceso a la información general. Para lograrlo, fue necesario incluir un bloque de código desarrollado en HTML, para graficar las intensidades de las mediciones en el bosquejo del mapa, debido a que JavaFX no incorpora ninguna librería que se adecuara a las necesidades del proyecto.

Debido a que la estructura del prototipo es tipo Shield, es posible acoplar más componentes al sistema de mediciones, permitiendo incrementar las utilidades brindadas. Tales componentes pueden ser un giroscopio, un barómetro, o dispositivos de mediciones para la evaluación, orientación y precisión de más características ambientales. Además, se identifica en el estudio un área de interés para desarrollar a futuro e integrar modelos de predicción de la contaminación del municipio mediante tecnologías de inteligencia artificial.

El dispositivo de monitoreo es capaz de detectar concentraciones de PM en sus dos principales variables, $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} , con resolución de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, además de medir parámetros como humedad y temperatura con resoluciones

de 1 % RH y 0.1 °C, respectivamente. Adicional a esto, el análisis estadístico aplicado a los datos mostró que para las variables de PM_{2.5} y PM₁₀ la distribución que mejor se ajusta a su comportamiento es la Log-logística. Este hallazgo resulta importante, sobre todo en escenarios donde se quiera realizar una predicción sobre el fenómeno estudiado que, en este caso, busca conocer la calidad del aire para diferentes zonas y horarios.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan no tener ningún conflicto de interés que limite la implementación de la propuesta investigativa y la divulgación de los resultados obtenidos.

Referencias

- Borbet, T. C., Gladson, L. A., & Cromar, K. R. (2018). Assessing air quality index awareness and use in Mexico City. *BMC Public Health*, 18(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s12889-018-5418-5>
- Cárdenas, O. (2010). *Transductores industriales*. T. G. U. ULA Rectorado, Ed. <https://sites.google.com/site/clasesinstrumentacion/capitulo1>
- Carrillo, M. G., & Herranz, M. S. M. (2005). *Interfaces gráficas en Java*. Editorial Universitaria Ramón Areces. <https://books.google.com.co/books?id=AWGnDAAAQBAJ>
- Clément, P. (2018). *Python y Raspberry Pi: aprenda a desarrollar en su nano-ordenador*. Ediciones A. Sanchez Conejo. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=vN9PnBbJTCUC&oi=fnd&pg=PA7&dq=Python+y+Raspberry+Pi+libro&ots=aj6XEM1dYm&sig=9Wnq1Yj4h4lI01IZ1hgykVWpIB0#v=onepage&q&f=false>
- Delgado, L., Feliciano, M., Frare, L., Furst, L., Leitão, P., & Igrejas, G. (2020). Construction and Validation of a Low-Cost System for Indoor Air Quality Measurements in Livestock Facilities. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST, 315 LNICST*, 232-245. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45694-8_18
- Fernández, M. A. A. (2019). *Hablemos Embebido: Guía para Diseñar Sistemas Embebidos*. Asociación Mexicana de Software Embebido. <https://books.google.com.co/books?id=BcxIzQEACAAJ>
- Green, J., & Sánchez, S. (2013). La calidad del aire en América Latina: Una visión panorámica. *Clean Air Institute*, 36. https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosAmbientalesySectorialyUrbana/pdf/contaminacion_atmosferica/La_Calidad_del_Aire_en_America_Latina.pdf
- Huertas, J. I., Huertas, M. E., Izquierdo, S., & González, E. D. (2012). Air quality impact assessment of multiple open pit coal mines in northern Colombia. *Journal of Environmental Management*, 93(1), 121-129. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.08.007>
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2018). Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*, 48. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Características+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Turísticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc%0Ahttp://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turísticoscos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee91>
- Illizarbe-González, Gina Mishel, Rojas-Quincho, Jhojan Pool, Cabello-Torres, Rita Jaqueline, Ugarte-Alvan, Carlos Alfredo, Reynoso-Quispe, Patricia, & Valdiviezo-Gonzales, Lorgio Gilberto. (2020). Chemical characteristics and identification of PM₁₀ sources in two districts of Lima, Peru. *DYNA*, 87(215), 57-65, 2021. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.83688>
- Magaña Villegas, E., & Díaz López, M. C. (2020). Air quality trend and proposal of a web application for the atmospheric monitoring network in Tabasco, México. *Tecciencia*, 15(28), 15-28. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.28.2>
- Medina Delgado, B., Castro Casadiego, S. A., & Camargo Ariza, L. L. (2015). Tecnologías de código abierto para la gestión de un proceso industrial. *Revista Gerencia Tecnológica Informática*, 14, 43-58.
- Messinger, M., & Silman, M. (2016). Unmanned aerial vehicles for the assessment and monitoring of environmental contamination: An example from coal ash spills. *Environmental Pollution*, 218, 889-894. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.019>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución 2254 de nov 01. *Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente*.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005*. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf%0Ajsessionid=970454FA25DFB60943EBC3409FF7E87B?sequence=1

- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018, March 2). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Pita-Morales, L. A. (2016). Línea de tiempo: educación ambiental en Colombia. *Praxis*, 12, 118. <https://doi.org/10.21676/23897856.1853>
- Ramírez Hernández, O. (2015). Identificación de problemáticas ambientales en Colombia a partir de la percepción social de estudiantes universitarios localizados en diferentes zonas del país. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31(3), 293-310.
- Rojano, R., Pérez, J., & Freyle, E. (2012). Effect of relative humidity in determining PM₁₀ using a DataRam 4 in coastal region of Colombia. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 35(2), 204-212.
- Volná, V., & Hladký, D. (2020). Detailed assessment of the effects of meteorological conditions on PM₁₀ concentrations in the northeastern part of the Czech Republic. *Atmosphere*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/ATMOS11050497>
- Wang, T., Han, W., Zhang, M., Yao, X., Zhang, L., Peng, X., ... Dan, X. (2020). Unmanned aerial vehicle-borne sensor system for atmosphere-particulate-matter measurements: Design and experiments. *Sensors (Switzerland)*, 20(1). <https://doi.org/10.3390/s20010057>
- Zafra-Mejía, C. A., Rodríguez-Miranda, J. P., & Rondón-Quintana, H. A. (2020). The relationship between atmospheric condition and human mortality associated with coarse material particulate in Bogotá (Colombia). *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 12(3), 57-68. <https://doi.org/10.22335/rlct.v12i3.1237>
- Zárate, E., Carlos Belalcázar, L., Clappier, A., Manzi, V., & Van den Bergh, H. (2007). Air quality modelling over Bogota, Colombia: Combined techniques to estimate and evaluate emission inventories. *Atmospheric Environment*, 41(29), 6302-6318. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.03.011>