

Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

## Diseño de un prototipo IoT para el monitoreo de material particulado en espacios reducidos utilizando ESP32 con servidor hospedado en la nube

### Design of an IoT prototype for particulate material monitoring in reduced spaces using ESP32 with a cloud-hosted server

Javier Steve Gómez-Meza<sup>1</sup> ([jgomezm2@est.ups.edu.ec](mailto:jgomezm2@est.ups.edu.ec)) (<https://orcid.org/0000-0003-3464-1327>)

Shuryca Vanessa Matute-Arias<sup>2</sup> ([smatutea1@est.ups.edu.ec](mailto:smatutea1@est.ups.edu.ec)) (<https://orcid.org/0000-0002-9133-6444>)

Teddy Jhennse Negrete Peña<sup>3</sup> ([tnegrete@ups.edu.ec](mailto:tnegrete@ups.edu.ec)) (<https://orcid.org/0000-0001-6056-3145>)

#### Resumen

El material particulado en el aire es uno de los elementos con mayor repercusión negativa en la salud humana, con presencia en el Ecuador. Dicha situación constituye un problema latente, con poca atención para su control, debido a los elevados costos para adquirir equipos o la existencia de empresas privadas que realicen dichas mediciones. El objetivo de la investigación es diseñar un prototipo de Internet de las Cosas para el monitoreo de material particulado en espacios reducidos, usando ESP32 con servidor hospedado en la nube. La investigación tiene un diseño experimental, con alcance descriptivo y enfoque mixto. El prototipo diseñado para la adquisición de datos utiliza módulos de censado y la configuración del protocolo de comunicación MQTT integrando la plataforma *ThingSpeak*. Con la investigación se determinó la utilización de materiales electrónicos asequibles, software libre para su programación y el uso de herramientas para el tratamiento y visualización de datos de manera remota. El diseño del prototipo incluyó cuatro módulos de censado, un sensor Nova SDS011 y un microcontrolador ESP32 en cada módulo. Se utilizó el entorno de desarrollo integrado Arduino y *Visual Code*, ambos de código abierto para la programación de censado y una red *mesh*. La información obtenida es enviada mediante la red Wi-Fi a una tarjeta Raspberry Pi 4, configurada como servidor local. La información es publicada mediante el protocolo MQTT en un servidor hospedado en la nube en la plataforma *ThingSpeak*, que permite la visualización y tratamiento de los resultados de manera remota.

---

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Electrónica. Universidad Politécnica Salesiana. Guayaquil, Ecuador.

<sup>2</sup> Estudiante de Ingeniería Electrónica. Universidad Politécnica Salesiana. Guayaquil, Ecuador.

<sup>3</sup> Profesor en la Carrera de Ingeniería Electrónica. Grupo de Investigación de Procesos Industriales (GIPI). Universidad Politécnica Salesiana. Guayaquil, Ecuador.

Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

**Palabras clave:** contaminación ambiental, microcontroladores, monitoreo, prototipo IoT, toma de decisiones.

### Abstract

Particulate matter in the air is one of the elements with the greatest negative impact on human health in Ecuador. This situation constitutes a latent problem, with little attention to its control, due to the high costs of acquiring equipment or the existence of private companies that perform such measurements. The objective of the research is to design an Internet of Things prototype for monitoring particulate matter in confined spaces, using ESP32 with server hosted in the cloud. The research has an experimental design, with a descriptive scope and a mixed approach. The prototype designed for data acquisition uses census modules and MQTT communication protocol configuration integrating the ThingSpeak platform. The research determined the use of affordable electronic materials, free software for its programming and the use of tools for remote data processing and visualization. The prototype design included four census modules, a Nova SDS011 sensor and an ESP32 microcontroller in each module. The integrated development environment Arduino and Visual Code, both open source, were used for the census programming and a mesh network. The information obtained is sent through the Wi-Fi network to a Raspberry Pi 4 card, configured as a local server. The information is published through the MQTT protocol on a server hosted in the cloud on the ThingSpeak platform, which allows the visualization and processing of the results remotely.

**Keywords:** decision-making, IoT prototype, environmental pollution, microcontrollers, monitoring.

### Introducción

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), 4.2 millones de muertes al año son causadas por la contaminación del aire, por enfermedades asociadas a derrames cerebrales, problemas cardíacos, cáncer de pulmón y cuadros con problemas en vías respiratorias. Precisamente, los cuadros respiratorios son una de las situaciones causantes de que las defensas inmunológicas decrezcan y que el paciente sea vulnerable, por ejemplo, al padecimiento del Covid-19. Esta y muchas otras enfermedades aqueja o ataca en mayor medida a personas con un sistema inmunológico en decrecimiento (WHO, 2006). La OMS tiene límites establecidos para que el aire se considere apropiado. Poco más del 90% de la población mundial reside en áreas donde los niveles de calidad del aire se encuentran fuera de los límites considerados saludables.

Luego del crecimiento de los parques automotrices e industriales y la creación de nuevas carreteras para la interconexión entre ciudades, se ha evidenciado una acelerada y aun mayor contaminación del aire. A lo largo de las periferias de la ciudad de Guayaquil

Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

también se evidencia la huella de la irresponsabilidad por parte de las empresas privadas. Adicionalmente, se constata la falta de control por parte de organismos reguladores para fatigar estos focos de contaminación ambiental. En este contexto, la presencia de material particulado, como parte de la contaminación del aire, es uno de los elementos que más repercusión tiene con afectaciones considerables a la salud humana.

Según investigaciones realizadas por la OMS, existen dos tipos de partículas PM10 que son consideradas de mayor tamaño y las PM2.5 consideradas partículas finas (WHO, 2006). Entre ambas partículas, la más perjudicial es la PM2.5, por ser partículas muy finas. Estas últimas se consideran partículas tóxicas, debido a que tienen una mayor probabilidad de penetrar en la anatomía humana e interactuar con células más profundas en el pulmón y flujo sanguíneo. En cambio, las partículas más grandes se quedan en los tejidos exteriores de las vías respiratorias. Por esta razón, se propone que es necesario medir estos contaminantes de forma recurrente para su control.

Actualmente existen empresas locales que se dedican a realizar estas mediciones, pero tales servicios tienen un alto costo. Las mediciones se realizan en lugares específicos y en intervalos reducidos de tiempo. Esto quiere decir que existen meses o años entre la realización de una medición y otra. Esto conlleva a que la información recopilada sea deficiente para la toma de decisiones o para ejercer un control. Por otro lado, existe la posibilidad de adquirir ciertos equipos con estas funcionalidades, pero mantienen un costo elevado y aquellos asequibles en el mercado no cuentan con la calidad y prestaciones necesarias para mediciones confiables en función de la problemática identificada, tomando en cuenta la exposición a diario que se tiene a estos agentes contaminantes. Se busca brindar una alternativa, la cual integra tecnología IoT para el monitoreo y visualización remota de dicho material particulado.

El empleo de las Tecnologías de la Información y la Ingeniería Electrónica han contribuido al desarrollo de dispositivos cada vez más pequeños, fáciles de usar, de bajo consumo y costo. De esta manera, se han resuelto problemas similares, destacando el sector de la salud, siendo eficientes, competitivos y útiles, desde el empleo de hardware y software libre, así como de redes informáticas (Cristo, Pérez & Izaguirre, 2020; Pérez, Sentí, Valdés & Pérez, 2017). Dentro de este gran espectro de aplicaciones y arquitecturas basadas en la obtención y el procesamiento de datos para la toma de decisiones, el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) hace referencia al elevado número de dispositivos conectados a internet con el objetivo de compartir información para monitorear, registrar o controlar diferentes procesos industriales o residenciales de manera autónoma. El IoT se compone de tres elementos para su funcionamiento (Maila, 2020).

- **Hardware:** son los dispositivos físicos, internos o externos, sobre los que se soporta la arquitectura IoT y que permiten la recopilación, análisis y procesamiento de los

Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

datos obtenidos o el control de los sistemas. Algunos ejemplos de *hardware* son los dispositivos de comunicación, los actuadores y los sensores.

- *Middleware*: son las plataformas de *software*, por tanto, elementos intangibles y programables a un nivel lógico para la obtención, intercambio, análisis y procesamiento de los datos obtenidos, para la toma de decisiones.
- Aplicaciones: constituyen los instrumentos mediante los cuales se interpreta la información obtenida, la cual tiene un elevado volumen, para que sea utilizable eficientemente por las personas en su proceso de toma de decisiones efectiva y oportuna.

La investigación aborda la problemática de la contaminación y cómo desde la ciencia y la tecnología se puede contribuir a su solución. Para ello se debe monitorear el comportamiento de agentes contaminantes de material particulado en puntos identificados como foco de contaminación. La obtención de esta información en los desarrollos urbanísticos situados a lo largo de las periferias de la ciudad de Guayaquil, permitiría llevar a cabo acciones adecuadas al respecto.

Es por ello, que el objetivo de la investigación es diseñar un prototipo IoT para el monitoreo de material particulado en espacios reducidos, usando ESP32 con servidor hospedado en la nube. Su implementación, para la medición de este parámetro a un menor costo, tiempo, mayor cantidad de muestras y recurrencia en las mediciones, posibilitará el adecuado análisis de esta problemática para la toma de decisiones. Con los resultados a obtener se proyecta tener los datos necesarios para la toma de decisiones de los organismos reguladores a nivel ambiental. La investigación pretende fomentar el uso de la tecnología IoT como una alternativa de alto rendimiento a bajo costo para realizar mediciones remotas en espacios reducidos.

El proyecto tendrá como beneficiarios directos a las personas, a los organismos ambientales y a las empresas públicas y privadas interesadas, quienes podrán tener una opción de menor costo, para tener mayor visibilidad de estas mediciones respecto a la exposición de los agentes contaminantes, de manera que puedan realizar las denuncias o acciones pertinentes. Además, se consideran beneficiarios también a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador, como incentivo investigativo en el uso de sensores para el levantamiento de datos en problemáticas relacionadas con la contaminación ambiental.

La investigación tiene un diseño no experimental, con alcance descriptivo y enfoque mixto. El tiempo para el diseño, implementación y pruebas de funcionamiento del prototipo de monitoreo fue de 6 meses según el cronograma elaborado, comprendido de noviembre de 2020 a abril de 2021. Posteriormente, en mayo de 2021, fueron escritos los principales resultados a los que se arribó. El proyecto estuvo orientado al diseño de un prototipo IoT para la medición de material particulado en espacios reducidos.

Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

A causa de la emergencia sanitaria y siguiendo las indicaciones de la Dirección de Carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil, el análisis de los resultados fue realizado por medio de la utilización de hardware de recopilación y procesamiento de datos. Para ello se estableció la conexión con el servidor hospedado en la nube. Además, se puso en funcionamiento la plataforma para el monitoreo en tiempo real mediante el empleo del protocolo de comunicación MQTT. La implementación y pruebas del sistema se llevaron a cabo con las debidas precauciones, siendo esto un espacio identificado como foco de contaminación por material particulado, debido a la regeneración urbana que se está dando en las afueras del domicilio de uno de los autores del estudio.

Debido a la contaminación por exposición del material particulado es necesario que exista convergencia entre las diferentes tecnologías empleadas. El trabajo investigativo constituye una constancia de que la Universidad Politécnica Salesiana puede seguir demostrando su orientación a la investigación, tomando como referencia herramientas y aplicaciones tecnológicas del momento, generando así propuestas de valor con mayor impacto, innovación y calidad. Los objetivos específicos de la investigación son:

- Diseñar e implementar prototipo IoT del sistema de monitorización con Nova SDS011, ESP32 y Raspberry Pi 4, para la adquisición y procesamiento de datos.
- Diseñar una red *mesh* de 4 sensores, para la adquisición de datos y envío al servidor local con Raspberry Pi 4.
- Configurar un esquema de comunicación mediante protocolo MQTT, para el envío de los datos al servidor Mosquitto u otro servidor web similar.
- Diseñar un manual de prácticas del prototipo IoT de monitorización del material particulado para su uso en los laboratorios de telecomunicaciones.

### **Conceptos principales de la investigación**

#### Contaminación del aire

Hoy en día la contaminación del aire es uno de los principales problemas ambientales de la mayoría de las zonas urbanas en el mundo, como lo es en países desarrollados y en vías de desarrollo. En Ecuador, algunas de las mayores causas de contaminación lo constituyen la falta de planificación de los asentamientos residenciales e industrias, la utilización de tecnologías obsoletas en el transporte y las actividades productivas, una calidad poco adecuada de los combustibles y la explotación de minas sin las medidas adecuadas. Existen cuatro contaminantes que son perjudiciales para la salud de las personas y para el medio ambiente: las partículas de suspensión (PM2.5 Y PM10), el ozono troposférico (O3), el dióxido de nitrógeno (NO2) y el dióxido de azufre (SO2)



Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

### Material particulado

Se refiere a partículas líquidas o sólidas que pueden contener diversos tamaños. Las primeras partículas son emitidas directamente al aire, mientras que las segundas son formadas en la atmosfera por transformaciones de las emisiones gaseosas como los óxidos de azufre y nitrógeno. Diversas investigaciones han evidenciado que las personas que viven en ciudades grandes están expuestas a niveles de contaminación atmosféricas que la OMS considera nocivos. Para ello, las partículas se dividen en dos rangos (Suárez & Pérez, 2006):

- Partículas finas (PM2.5): son las más perjudiciales para la salud por ser extremadamente finas. Las mismas entran por las vías respiratorias, llegando a la sangre, en donde causan enfermedades crónicas.
- Partículas gruesas (PM10): no son tan nocivas ya que por ser partículas un poco más gruesas no logran atravesar los alveolos pulmonares, quedando retenidas en la mucosa que recubre las vías respiratorias.

### Sensor Nova SDS011

El sensor Nova SDS011 mide la cantidad de material particulado PM2.5 presente en el ambiente. Emplea la teoría de dispersión de láser, mediante la cual obtiene la concentración de partículas entre 0.3 a 10µm en el aire. Este sensor posee una detección de láser estable. Además, posee una fácil integración: salida UART (o salida IO, puede ser personalizado), trae un ventilador incorporado y tiene un tiempo de respuesta rápido. La calidad que brinda el diodo láser en este sensor es de alta calidad y su vida útil es hasta de 8000 horas. El sensor de forma predeterminada mide la frecuencia de cada disparo de láser por segundo. Sin embargo, si se usa el método de trabajo discontinuo se podría prolongar el tiempo de vida útil (Morales, Fuentes & Molina, 2018). En la Tabla 1 se muestran las principales características del sensor Nova SDS01.

Tabla 1. Características de SDS011. Fuente: (Morales y otros, 2018).

Sensor SDS011	Características
Parámetro de medición	PM2.5, PM10
Rango	0.0-999.9ug/m <sup>3</sup>
Voltaje	5V
Fuente de alimentación	>1W
Ondulación del voltaje de suministro	<20Mv
Corriente	70mA± 10mA
Corriente de reposo	<4 mA
Rango de temperatura de trabajo	Entorno de almacenamiento de 20 - 60°C Entorno trabajo de -10+50°C

Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

## Microcontrolador ESP32

De acuerdo con Bartlett (2020), un microcontrolador es un circuito integrado con una estructura interna de computador. Los microcontroladores tienen en su interior tres unidades funcionales que son los periféricos de entrada/salida, la memoria y una unidad central de procesamiento. El microcontrolador debe ser programado, de manera que pueda realizar un conjunto de funciones que pueden ir desde un leve parpadeo de un LED hasta el control de un robot (Gridling & Weiss, 2007). Constituye la última generación de productos de la familia Espressif. Es fabricado por TSMC, empleando su proceso de 40 nanómetros. Además, el microcontrolador ESP32 presenta integración de tecnologías Wi-Fi y Bluetooth de modo dual, e incluye interruptores de antena.

El microcontrolador ESP32 tiene integración con un conmutador de antena, que amplifica la potencia de emisión y tiene una recepción de ruido de muy bajo nivel. Además, contiene módulos para la gestión de la energía del equipo y filtros, los cuales se integran en un mismo chip (Saravia, 2019). Adicionalmente, sus principales características son (Espressif, 2021; Saravia, 2019) un procesador primario Tensilica de 32 bits (Xtensa LX6), co-procesador de ultra baja energía (ULP), frecuencia de Clock programable hasta 240MHz, rendimiento de hasta 600 DMIPS, ROM de 448KB para arranque y funciones básicas, y SRAM de 520KiB para datos e instrucciones.

## Raspberry Pi 4

La Raspberry Pi es una serie de miniordenadores pequeños que comúnmente tiene el tamaño de una tarjeta de crédito. Son de placa única o simple, siendo de bajo coste de fabricación. Su desarrollo comenzó en el Reino Unido en 2006 por la compañía de igual nombre, la Raspberry Pi *Foundation*. Su propósito inicial fue inspirar a los niños en las escuelas para el aprendizaje de la programación de computadoras. La Raspberry Pi 4 es hoy la cuarta generación de los modelos Raspberry Pi (Raspberry, 2020). Estas placas son muy populares para diversos fines, entre los que se destacan la conexión de sistemas y dispositivos a internet por medio de sensores, la conversión de TV en Smart TV, como centro multimedia, como servidor FTP y de impresión Wi-Fi, y como Mini PC de escritorio. De igual manera, utiliza software libre en su programación interna (Norris, 2015).

Saltándose a una nueva generación, la Raspberry Pi 4 cuenta con una serie de versión de placa reducida más potente, lo cual lo convierte en un pequeño computador, mejorando su ancho de banda y con capacidades superiores a 1GB, 2GB Y 4GB. Cuenta con conectividad a Bluetooth 5.0, Wi-Fi 802.11ac y Giga Ethernet. Puede realizar tareas típicas de un computador, cuenta con un GPIO de 40 de pines y trabaja a 3.3 v. Todo ello permite que si se desea conectar un sensor que opera a 5V, se necesitará incluir un conversor de niveles lógicos; y si se desea leer sensores analógicos a digital, se requiere

Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

adquirir un conversor ADC externo. Además, cuenta con puertos de comunicación I2C, SPI y UART (Raspberry, 2020).

#### Transporte de telemetría MQ (MQTT)

Es un protocolo de mensajería abierto y ligero que proporciona a los clientes de la red, con recursos limitados, una manera sencilla para difundir información de telemetría en entornos que tienen un ancho de banda realmente bajo (Bernstein, 2021). MQTT es una buena opción para redes inalámbricas que experimentan diferentes niveles de latencia debido a limitaciones ocasionales de ancho de banda o conexiones poco confiables. Este protocolo, que utiliza un modelo de comunicación de publicación/escritura, se utiliza para la comunicación de máquina a máquina (M2M) y juega un papel importante en la arquitectura de Internet de las Cosas (IoT).

Si bien MQTT inició como un protocolo de código propietario, utilizado para comunicarse con sistemas SCADA en la industria del petróleo, actualmente es el protocolo de código abierto líder para conectar dispositivos inteligentes IoT e IoT industrial (IIoT). Sus diversas aplicaciones en la industria van desde la automoción hasta la energía y las comunicaciones (Bernstein, 2021). Los clientes de MQTT incluyen editores y suscriptores, términos que se refieren a si el cliente está publicando mensajes o suscrito para recibir mensajes. Estas dos funciones se pueden implementar en el mismo cliente MQTT. Cuando un dispositivo (o cliente) desea enviar datos a un servidor (o intermediario), se denomina publicación. Cuando la operación se invierte, se llama suscripción.

#### Plataforma *ThingSpeak*

*ThingSpeak* es una plataforma como servicio que permite el análisis de datos en un entorno o arquitectura de Internet de las Cosas. Es por ello que mediante esta plataforma se puede visualizar, agregar y analizar flujos de datos de manera directa en la nube. Con esta plataforma se pueden conectar los dispositivos de forma fácil para el envío de datos. Posteriormente, *ThingSpeak* permite la creación de visualizaciones y análisis en tiempo real de los datos, los cuales pueden ser guardados y compartidos por medio de servicios web implementados para diversas plataformas como *Twitter*. Asimismo, se pueden realizar análisis en Matlab, ejecutar y escribir código, todo ello con el propósito de realizar análisis, procesamiento y visualizaciones. Además, esta plataforma IoT permite la creación de sistemas y prototipos IoT sin la necesidad de tener que desarrollar aplicaciones web o *desktop*, o en cambio, tener que configurar otro tipo de servidores (ThingSpeak, 2021). Algunas de las principales características o potencialidades que tiene *ThingSpeak* son las siguientes.

- Es de fácil configuración en los dispositivos, mediante protocolos IoT que son muy conocidos y populares.



Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

- Permite la visualización de la información en tiempo real, realizando sus análisis de manera automática, por medio de la configuración por eventos y horarios.
- Su integración con MATLAB multiplica las potencialidades en cuanto a los análisis y procesamiento de los datos.

### Redes Mesh

El empleo de las redes de área global (WLAN) permite otra vía de implementación más adecuada en comparación con las redes cableadas, debido a su facilidad de instalación y gestión. Las mismas favorecen una escalabilidad y adaptación mejor para la mayoría de las estructuras físicas actuales. Las redes *mesh* son un tipo más avanzado y actualizado de redes WLAN, por lo que tienen muchos más beneficios y ventajas. Algunas de sus características más destacadas es que tienen mayor cobertura que las redes tradicionales. Disponen de múltiples nodos comunicados entre sí, que ayudan a conservar una conexión estable (Rico-Bautista, Sánchez-Espinosa & Portillo-Ballesteros, 2014).

Con el empleo anterior de tecnología de tipo Wi-Fi 802.11b con capacidades de hasta 11Mbit/s en la frecuencia de 2.4GHz, era común la utilización de sistemas de redes basados en la utilización de amplificadores y repetidores de alta potencia para inundar con radiofrecuencia (RF) el área de cobertura. Con la llegada de los puntos de acceso de tipo Wi-Fi de malla, es posible hacer una cobertura de RF sin la necesidad de inundar la zona de cobertura con amplificadores o con repetidores. Estas redes suponen un reemplazo óptimo de la infraestructura anterior fundamentada en el empleo de repetidores. Este cambio permite una adecuada escalabilidad de la tecnología, al favorecer el funcionamiento de la nueva infraestructura con puntos de acceso de malla, con la adición de nuevos servicios (Padin, 2012).

### Resultados a partir de la implementación

El sistema desarrollado para el monitoreo de material particulado, en puntos designados como focos de contaminación tiene como primera etapa la adquisición de los datos a través del sensor Nova SDS011 y el módulo ESP32. Ambos componentes conforman una red *Mesh*, la cual posteriormente transmite a través del canal de comunicación Wi-Fi la información a una placa controladora Raspberry Pi 4 como servidor local. En la placa Raspberry Pi 4 son preprocesados los datos obtenidos. Luego estos datos preprocesados son transmitidos por medio de un *router* para dar salida a internet a la plataforma ThingSpeak.

La plataforma ThingSpeak es la encargada, mediante un modelo de mensajería de tipo publicación/subscription, de dar visibilidad al cliente suscrito en el mismo tópico en el que se realizó la publicación de la información registrada por el sensor. De esta manera

Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

se podrá realizar una búsqueda inmediata y exacta de la información requerida. El diagrama general del sistema desarrollado se muestra en la Figura 1.

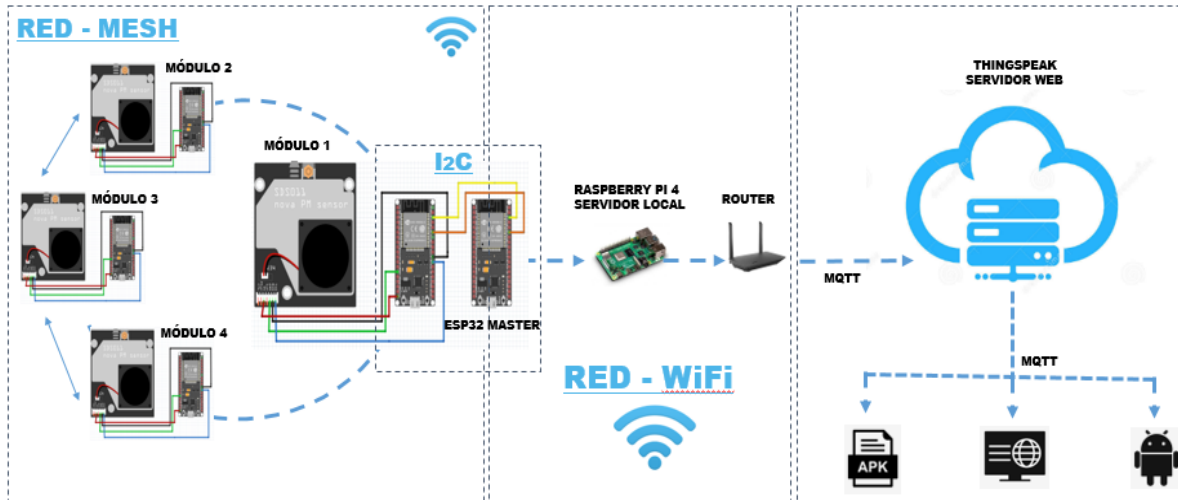


Figura 1. Diagrama general del sistema.

Con el propósito de integrar los conceptos abordados con los conocimientos y herramientas asimiladas en la Carrera de Ingeniería Electrónica, en la Figura 2 se muestra el proceso detallado del proyecto, mediante un diagrama de bloques. De esta manera, se pretende dar solución a la problemática planteada. Este se realizó fundamentalmente utilizando hardware y software libre, lo que posibilitó abaratar los costos.

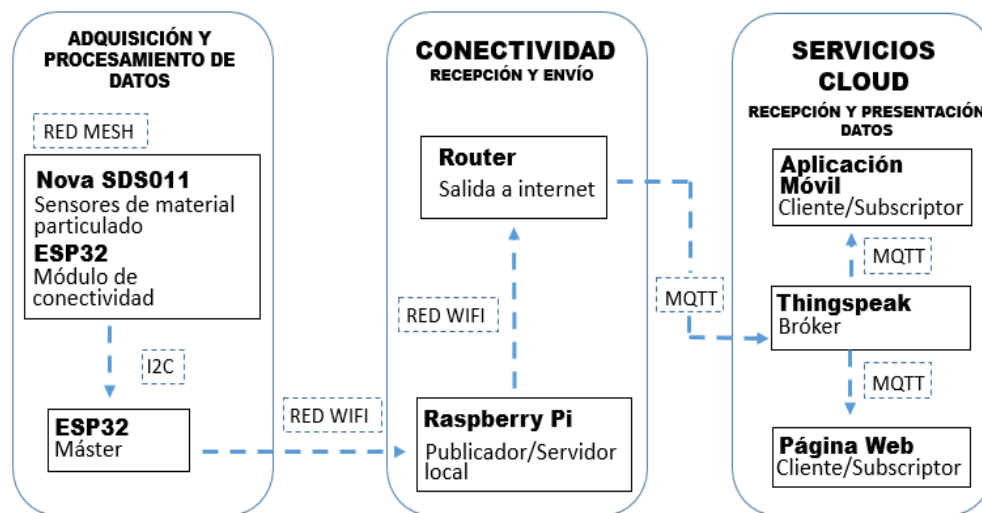


Figura 2. Diagrama de bloques del prototipo. Fuente: elaboración propia.

En su desarrollo se realizaron pruebas, así como el monitoreo del prototipo del sistema en cada una de sus etapas: adquisición y procesamiento de datos, transmisión de

Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

información, y presentación de resultados remotamente. De ahí que, se pudo dar veracidad al correcto funcionamiento de los dispositivos, materiales y herramientas utilizadas en el proyecto de investigación. Todo ello permitió dar cumplimiento al objetivo propuesto. A continuación, en las Figuras 3 y 4 se muestran el diseño de la conexión entre el sensor Nova SDS011 y el módulo ESP32, y el diseño de la conexión del sensor Nova SDS011 y el módulo ESP32 al módulo ESP32 Master, respectivamente.

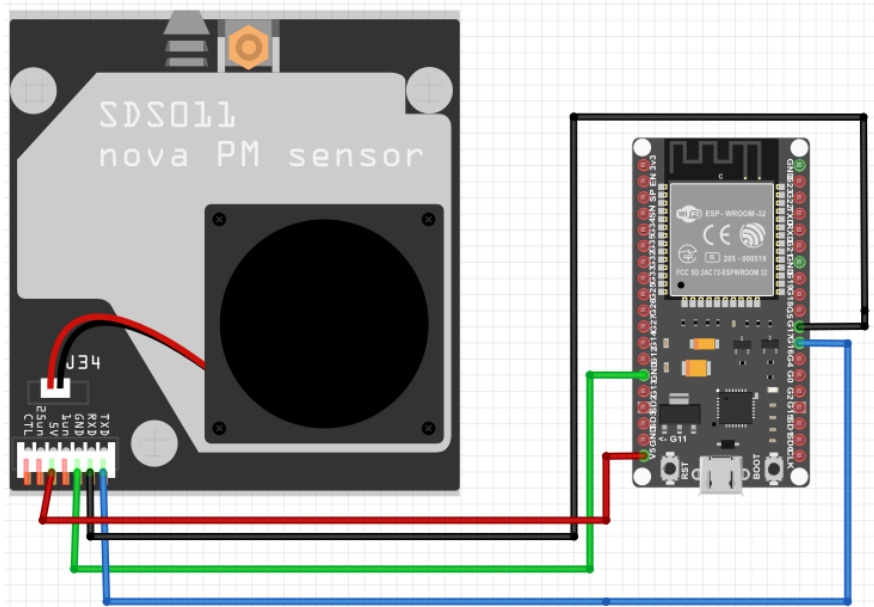


Figura 3. Diseño de la conexión del sensor Nova SDS011 y el módulo ESP32.

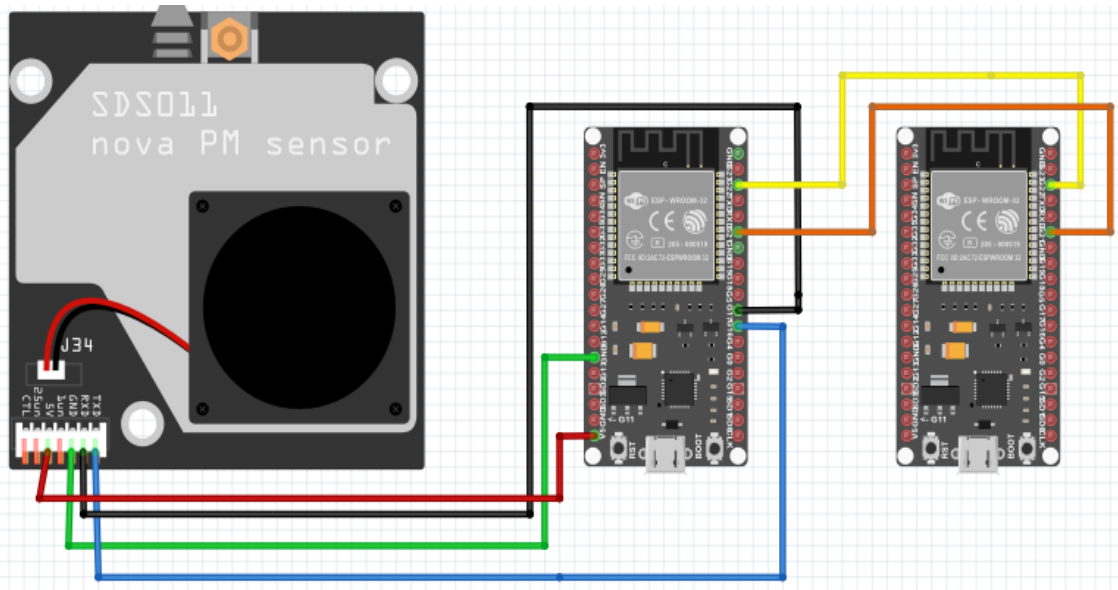


Figura 4. Diseño de la conexión del sensor Nova SDS011 y el módulo ESP32 al módulo ESP32 Master.

Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

El diseño del prototipo busca obtener una mayor visibilidad y mediciones en menores intervalos de tiempo de manera recurrente a bajo costo. Este sistema podrá monitorear partículas PM2.5 hasta PM10 utilizando un sensor Nova SDS011. Enviará los datos recopilados mediante el puerto serial (Rx /Tx) al módulo ESP32. Posteriormente, se comunicará mediante la *Wi-Fi* a la placa Raspberry Pi 4, encargada de publicar los datos en el servidor web, hospedado en la nube. Para ello, empleará la plataforma *ThingSpeak* para el análisis y procesamiento de los datos, teniendo en cuenta la información presentada en el diagrama general del sistema, en el diagrama de bloques del prototipo y en los diseños de cada una de las conexiones. Seguidamente se muestra en las Figura 5 la vista interna del prototipo desarrollado, mientras que en la Figura 6 se visualizan dos registros de mediciones del sensor con la plataforma *ThingSpeak*.

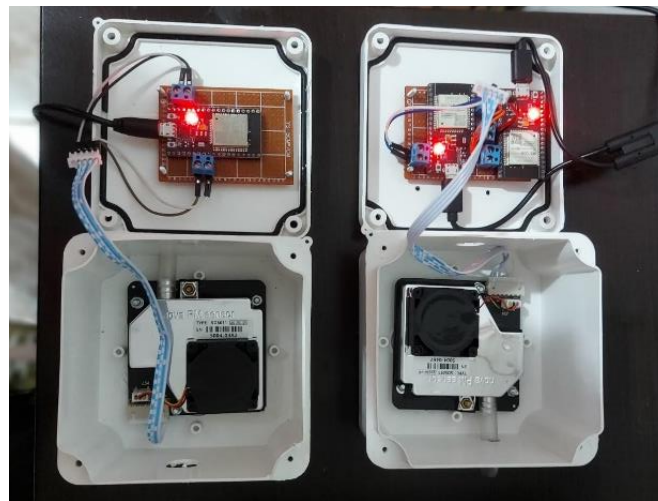


Figura 5. Vista interna del prototipo desarrollado.

Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

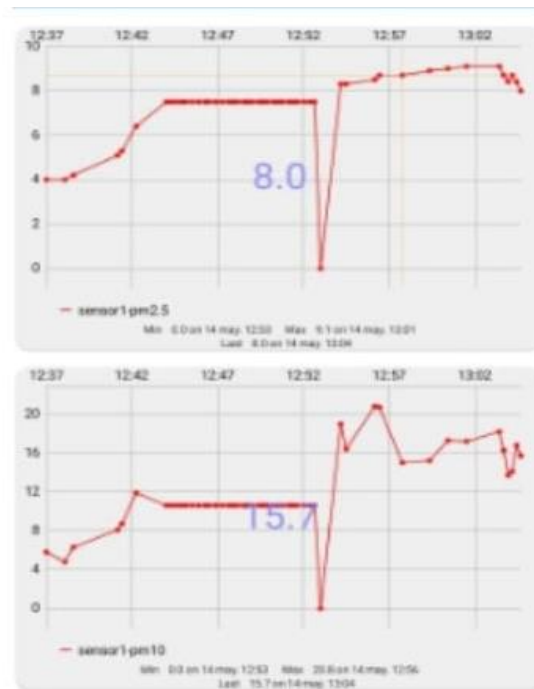


Figura 6. Visualización de registros del sensor con la plataforma *ThingSpeak*.

La investigación desarrollada es pertinente, pues tiene un alto impacto social y hacia el medio ambiente. Emplea fundamentalmente hardware y software libre, y tecnología de bajo costo y bajo consumo, por lo que es sustentable, al ser una investigación que apoya las políticas emergentes. Además, tiene relación con otras investigaciones actuales que trabajan temáticas similares. A continuación, una muestra de ello.

Carrera (2017) diseñó un sistema con tecnologías de código abierto para la medición del material particulado. Esta investigación se lleva a cabo en la ciudad de Santa Elena, con colaboradores investigadores de la Universidad de Guayaquil, en Ecuador. El estudio tiene como propósito al ensamblaje de un equipo de fabricación autónoma, con hardware de costo bajo, que pueda obtener resultados interesantes en cuanto a los niveles de concentración de material particulado fino. Dicho estudio puede ser empleado para conocer la calidad del aire en los espacios físicos. Con los principales resultados obtenidos en la investigación concuerdan los autores del presente trabajo, así como con la problemática identificada que da origen a la investigación.

Junco (2019) implementó, con tecnologías abiertas y partiendo de problemas ambientales similares, un prototipo de un sistema de monitoreo de la calidad del agua subterránea en instalaciones de captación de una localidad rural en Colombia, ubicada en el municipio de Tibaná-Boyacá. Los investigadores que trabajaron en el proyecto de investigación son de la Universidad Piloto de Colombia. El sistema de monitoreo de calidad del agua desarrollado es de bajo costo y de fácil uso. Como parte de la discusión



Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

del autor, se considera un aporte significativo para las comunidades campesinas que habitan en zonas rurales. En estas zonas aún no se cuenta con buenos acueductos, por lo que dependen del agua subterránea para su supervivencia, las cuales transportan sustancias que en ocasiones son nocivas para la salud. De manera específica, en los resultados se plantea el desarrollo de diversas pruebas para evaluar y validar el adecuado funcionamiento del prototipo desarrollado en una localidad rural del municipio de Tibaná-Boyacá en donde el acceso al agua aún es limitado. Los autores de la presente investigación igualmente coinciden con sus hallazgos, las tecnologías empleadas, así como con las necesidades y la justificación que posibilitan la realización del trabajo.

Por último, Lema (2019) propuso una red de controladores para la dosificación automática del agua del reservorio Tunga en el caserío el Rosal de Mocha. El investigador está adscrito a la Universidad Técnica de Ambato, en Ecuador. En su investigación aplicada busca la generación de conocimiento, en base a las situaciones ambientales negativas identificadas en la sociedad, de manera tal que se pueda dar solución desde la ciencia y la tecnología a los problemas de distribución y automatización en sistemas de riego agrícola, creando un sistema autónomo controlable. Para ello, utiliza tecnología libre similar a la empleada en la presente investigación, con resultados positivos y favorables, los cuales ayudan a la resolución de los problemas existentes.

## Conclusiones

Se diseñó un prototipo basado en Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo de material particulado en espacios reducidos, utilizando un servidor hospedado en la nube. Con dicha solución se pretende contribuir con la disminución de la contaminación del aire, como uno de los principales problemas ambientales en las zonas periféricas de la ciudad de Guayaquil y en el Ecuador.

Según el proceso de la implementación, se concluye que los sensores utilizados son una alternativa viable para mediciones de esta índole, junto con las tarjetas controladoras para el procesamiento y envío de la información recopilada. Además, se observa que se debe considerar el empleo de una tarjeta ESP32 adicional, la misma que recibiría los datos obtenidos mediante puertos I2C y evitaría la redundancia entre la red *mesh* y la red Wi-Fi que se conecta con la Raspberry.

Se concluye que la plataforma desarrollada es oportuna, viable para poner en práctica la configuración del protocolo MQTT y la aplicación de la tecnología IoT. Adicionalmente, la utilización de la plataforma *ThingSpeak* brinda diferentes funcionalidades o prestaciones a nivel académico e industrial para el procesamiento, registro, visualización y control de la información de manera remota.

Las principales limitaciones de la investigación se atribuyen a los pocos recursos con los que se contó para su desarrollo, así como su alcance espacio-temporal. Debido a ello no

Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

se pudo analizar los datos para llegar a conclusiones que permitieran correlacionar o explicar por qué hay mayor o menor exposición a agentes contaminantes en determinada área geográfica y su implicación en la salud humana. No obstante, la investigación puede ser empleada como un referente válido en el análisis de la temática y en el desarrollo de soluciones de hardware y software para su resolución en los campos de las Tecnologías de la Información y la Ingeniería Electrónica.

Los trabajos futuros se deben centrar en el desarrollo de plataformas informáticas robustas, basadas en Big Data y en el empleo de Inteligencia Artificial y modelos de *Machine Learning*, para la limpieza y el procesamiento del gran cúmulo de datos generados, que posibilite analizarlos desde diferentes perspectivas para la toma de decisiones más efectiva, de manera oportuna y en menor tiempo. Adicionalmente, se deben continuar desarrollando prototipos que utilicen hardware y software libre, que le continúen dando solución a problemáticas similares, relacionadas con la contaminación ambiental y la protección a la salud. Por último, se recomienda llevar a cabo análisis de campo para comenzar a detectar problemas y proponer soluciones en cuanto a la contaminación ambiental del aire, su implicación puntual en la salud humana y en las áreas geográficas analizadas.

## Referencias

- Antonić, A., Marjanović, M., Skočir, P., & Žarko, I. P. (2015). Comparison of the CUPUS Middleware and MQTT Protocol for Smart City Services. *In 2015 13th International Conference on Telecommunications (ConTEL)*, 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/ConTEL.2015.7231225>
- Bellavista, P., Giannelli, C., & Zamagna, R. (2017). The Pervasive Environment Sensing and Sharing Solution. *Sustainability*, 9(4):585. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9040585>
- Bartlett, J. (2020). Introduction to Microcontrollers. In *Electronics for Beginners* (pp. 201-211). Apress, Berkeley, CA. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5979-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5979-5_13)
- Bernstein, C. (2021). MQTT (MQ Telemetry Transport). *IoT Agenda*. TechTarget. Disponible en: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/MQTT-MQ-Telemetry-Transport>
- Cristo, N. M., Pérez, J. F. R., & Izaguirre, L. V. (2020). Estrategia de entrenamiento y acompañamiento a usuarios para el Sistema de Información Hospitalaria XAVIA HIS. *Revista Cubana de Informática Médica*, 12(1), 76-91. Disponible en <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=94151>
- Maila, C. D. C. (2020). *Análisis de tecnología Li-fi como comunicación por luz visible (VLC) y su integración al internet de las cosas (IOT)* (Bachelor's thesis). Universidad

Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador. Disponible en:  
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18386>

Carrera, S. C. (2017). *Diseño de un sistema de tecnologías abiertas para la medición de material particulado en la ciudad de Santa Elena* (Master's thesis). Universidad de Guayaquil, Ecuador. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/22251>

Espressif. (2021). *ESP32 Series Datasheet*. Espressif Systems. Disponible en: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)

Gridling, G., & Weiss, B. (2007). *Introduction to microcontrollers*. Vienna University of Technology Institute of Computer Engineering Embedded Computing Systems Group. Disponible en: <https://www.skylineuniversity.ac.ae/pdf/software-engineering/Microcontroller.pdf>

Junco, A. D. A. (2019). *Prototipo de un sistema de monitoreo de calidad del agua subterránea en instalaciones de captación de una localidad rural del municipio de Tibaná-Boyacá*. Disponible en:  
<http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/4769>

Lema, D. J. P. (2019). *Red de Controladores para la Dosificación Automática de Agua del Reservorio Tunga en el Caserío El Rosal de Mocha* (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial. Carrera de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones). Disponible en:  
<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/30113>

Morales, A. M. R., Fuentes, A. J. D., & Molina, H. J. C. (2018). *Creación de una estación de monitoreo ambiental utilizando microcontrolador Arduino Yun y sensores electroquímicos para la realización de mediciones de monóxido de carbono, ozono y material particulado de 2.5 y 10um, presentes en el aire en la ciudad de León, con capacidad de enviar datos a través de una red para su posterior consulta en un sitio web especializado, durante el período noviembre 2017 - marzo 2018*. (Doctoral dissertation). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León. Disponible en:  
<http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/handle/123456789/6813>

Norris, D. (2015). *The Internet of Things: Do-It-Yourself at Home Projects for Arduino, Raspberry Pi and BeagleBone Black*. New York: McGraw-Hill Education. Disponible en:  
<https://www.accessengineeringlibrary.com/binary/mheaeworks/463c3e36324b99c7/0d7b544fdc4d6299190965b457400b88261564f6b09536886170a671f0469f04/book-summary.pdf?implicit-login=true>

Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

- Padin, N. (2012). Wireless Mesh en Open Pits. *Revista Electro Industria*. Disponible en: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1790&ni=wireless-mesh-en-open-pits>
- Pérez, J. F. R., Sentí, V. E., Valdés, M. M., & Pérez, L. A. (2017). Modelo para la gestión y análisis de conocimiento para la selección de equipos de trabajo quirúrgico en sistemas de información en salud mediante técnicas de inteligencia organizacional. *Revista cubana de información en ciencias de la salud*, 28(1), 43-60. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2307-21132017000100004&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2307-21132017000100004&script=sci_arttext&tlng=en)
- Raspberry. (2020). *The Official Raspberry Pi Handbook 2021. The MagPi Magazine. The official Raspberry Pi Magazine*. Disponible en: <https://magpi.raspberrypi.org/books/handbook-2021>
- Raspberry. (2021). *Raspberry Pi 4. The Raspberry Pi Foundation*. Disponible en: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/>
- Rico-Bautista, D., Sánchez-Espinosa, L., & Portillo-Ballesteros, E. Y. (2014). Redes Mesh, una alternativa a problemas de cobertura de red: una revisión de literatura. *Revista Ingenio*, 7(1), 27-42. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Dewar-Rico-Bautista/publication/315475585\\_Redes\\_mesh\\_una\\_alternativa\\_a\\_problemas\\_de\\_cobertura\\_de\\_red\\_una\\_revision\\_de\\_literatura/links/58e7a0360f7e9bedbd9ef0f0/Redes-mesh-una-alternativa-a-problemas-de-cobertura-de-red-una-revision-de-literatura.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Dewar-Rico-Bautista/publication/315475585_Redes_mesh_una_alternativa_a_problemas_de_cobertura_de_red_una_revision_de_literatura/links/58e7a0360f7e9bedbd9ef0f0/Redes-mesh-una-alternativa-a-problemas-de-cobertura-de-red-una-revision-de-literatura.pdf)
- Saravia, A. R. B. (2019). *ESP32 NODE MCU. Microelectrónica Componentes srl*. Disponible en: [https://www.microelectronicash.com/downloads/ESP32\\_MANUAL.pdf](https://www.microelectronicash.com/downloads/ESP32_MANUAL.pdf)
- Suárez, V. D., & Pérez, C. P. (2006). Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras. *Acta Nova*, 3(2), 308-322. Disponible en: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S1683-07892006000100011&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S1683-07892006000100011&script=sci_arttext)
- ThingSpeak. (2021). *ThingSpeak. The IoT Platform with MATLAB Analytics. MathWorks. The MathWorks, Inc*. Disponible en: [https://www.mathworks.com/help/thingspeak/index.html?s\\_tid=CRUX\\_lftnav](https://www.mathworks.com/help/thingspeak/index.html?s_tid=CRUX_lftnav)
- World Health Organization. (2006). *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 (No. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02)*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud. Disponible en:

Recepción: 15-03-2021 Aprobación: 03-06-2021

[https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf)