

Sistema de información basado en IoT para medición de la calidad del aire y seguimiento de rutas en sistemas de transporte público.

Autores

Sebastian Pérez López
Juan Pablo Claro Pérez

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería en Sistemas e Informática
Bucaramanga
2023

Sistema de información basado en IoT para medición de la calidad del aire y seguimiento de rutas en sistemas de transporte público.

Autores

Sebastian Pérez López
Juan Pablo Claro Pérez

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingenieros de Sistemas

Director

Jathinson Meneses Mendoza

Msc. en Gestión, Aplicación y Desarrollo de Software

Codirector

Henry Andrés Jiménez Herrera

Msc. Ingeniería de Sistemas e Informática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería en Sistemas e Informática

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Dedicado a nuestros padres Ilva Rosa López, Edinson Pérez, Cecilia Pérez y Juan Bautista Claro, por todo el apoyo y sentimientos de animo a lo largo de nuestra formación, impulsándonos día a día.

Agradecimientos

En agradecimiento al cielo por permitirnos culminar una etapa de nuestras vidas, adquiriendo habilidades que nos serán de gran utilidad en nuestro desarrollo laboral y personal, con la madurez necesaria para afrontar todos los retos que se presenten.

A nuestros padres Ilva Rosa López, Edinson Pérez, Cecilia Pérez y Juan Bautista Claro, por toda la motivación que nos brindan a diario, entre dificultades y triunfos han estado ahí en todo momento.

A nuestros amigos Alejandra Pérez, Henry Alberto Jaramillo y Frank Sebastián Sánchez los cuales brindaron su conocimiento técnico y apoyo para la realización de este proyecto, estando presentes a lo largo del arduo proceso.

A nuestro director de tesis Jathinson Meneses y nuestro codirector Henry Andrés Jimenes brindando su guía en el proceso de creación y formalización del proyecto.

A los profesores José Geralbert Rubiano y Gabriel Rodrigo Pedraza los cuales brindaron su conocimiento e instrumentaria para hacer posible la creación del prototipo IoT del proyecto.

A cada uno de los profesores que nos enseñaron a lo largo de nuestra carrera haciendo posible todo este proceso.

Tabla de contenido

Introducción	18
1. Planteamiento y justificación del problema	21
2. Objetivos	23
2.1 Objetivo General	23
2.2 Objetivos Específicos	23
3. Marco de referencia	24
3.1 Composición del aire	24
3.2 Contaminación del aire	25
3.3 Efectos en la salud del ser humano	26
3.4 Respuestas ante la problemática	27
3.5 Internet de las cosas	28
3.6 Arquitectura de microservicios	28
3.7 Protocolos de comunicación	29
3.7.1 Protocolo de comunicación MQTT	30
4. Metodología	34
4.1 Fase 1: Fundamentación teórica y estado del arte.	35
4.1.1 Actividad:	35
4.1.2 Producto resultado:	36
4.2 Fase 2: Estudio y selección de parámetros a monitorear.	36
4.2.1 Actividad:	36
4.2.2 Producto resultado:	36
4.3 Fase 3: Diseño y desarrollo del sistema IoT	36

4.3.1 Actividad:.....	37
4.3.2 Producto resultado:	37
4.4 Fase 4: Prototipado	37
4.4.1 Actividad:.....	37
4.4.2 Producto resultado:	38
4.5 Fase 5: Captura y análisis de datos	38
4.5.1 Actividad:.....	38
4.5.2 Producto resultado:	38
4.6 Fase 6: Representación geográfica de los datos.....	38
4.6.1 Actividad:.....	39
4.6.2 Producto resultado:	39
4.7 Fase 7: Presentación de resultados.....	39
4.7.1 Actividad:.....	39
4.7.2 Producto resultado:	39
5. Diseño de la propuesta	40
5.1 Estudio y selección de parámetros a monitorear.....	40
5.1.1 Dióxido de carbono (CO ₂).....	45
5.2 Análisis y diseño del ambiente web.....	47
5.2.1 Actores	47
5.2.2 Requerimientos	48
5.2.3 Diagrama de casos de uso	56
5.2.4 Diagrama de clases	57
5.2.5 Diagrama de actividades	57

6. Implementación del prototipo.....	61
6.1 Capacitación.....	61
6.2 Análisis y definición de la arquitectura	61
6.2.1 Comparación módulos Wifi/Bluetooth.....	62
6.2.2 Comparación de sensores.....	66
6.3 Montaje del prototipo.....	69
6.4 Funcionamiento.....	71
6.5 Descripción del formato de envío de datos.....	72
6.6 Creación del aplicativo	73
6.6.1 Arquitectura del aplicativo.....	73
6.6.2 Framework para la gestión de datos y renderizado del aplicativo	77
6.6.3 Componente visual del aplicativo.....	78
6.7 Vista del aplicativo	79
6.7.1 Dashboard	79
6.7.2 Estaciones y dispositivos	80
6.7.3 Visión geosatelital.....	80
6.7.4 Tabulación de datos	82
6.8 Pruebas unitarias	82
7. Validación.....	88
7.1 Configuración experimental.....	88
7.1.1 Configuración experimental del prototipo.....	88
7.1.2 Configuración experimental del vehículo.....	89
7.2 Presentación de resultados	90

7.2.1 Representación gráfica CO2 vs tiempo.....	90
7.2.2 Representación geográfica de resultados	91
7.2.3 Tabulación y descarga de datos	92
7.2.4 Resultado máximo alcanzado	94
7.3 Análisis de resultados	95
7.3.1 Datos del sensor contra el tiempo	95
7.3.2 Datos del sensor contra la temperatura	97
7.3.3 Datos máximos tomados por el sensor CO2(PPM)	98
7.3.4 Datos mínimos tomados por el sensor CO2(PPM).....	99
7.3.5 Datos promedio tomados por el sensor CO2(PPM).....	100
7.3.6 Mapa de calor de las ubicaciones en donde los datos de CO2(PPM) fueron tomados.....	101
8. Conclusiones.....	105
9. Recomendaciones y trabajo futuro.....	107
Referencias.....	108

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Elementos contaminantes y su efecto en la salud según el volumen de estos en el aire.</i>	42
Tabla 2 <i>Requerimientos funcionales del dispositivo y el software.</i>	49
Tabla 3 <i>Requerimientos no funcionales del dispositivo y el software.</i>	53
Tabla 4 <i>Comparación de los módulos de Arduino.</i>	62
Tabla 5 <i>Pruebas de funcionalidad de la página inicial.</i>	83
Tabla 6 <i>Pruebas de funcionalidad de la página del dispositivo.</i>	84

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Figura sobre una arquitectura de microservicios</i>	29
Figura 2 <i>Figura sobre el funcionamiento del protocolo MQTT</i>	31
Figura 3 <i>Figura sobre la estructura de un mensaje MQTT</i>	32
Figura 4 <i>Figura de la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto</i>	34
Figura 5 <i>Figura del diagrama de casos de uso</i>	56
Figura 6 <i>Figura del diagrama de clases</i>	57
Figura 7 <i>Figura del diagrama de interacción del usuario</i>	58
Figura 8 <i>Figura del diagrama de interacción del dispositivo</i>	59
Figura 9 <i>Figura del diagrama de un ESP32</i>	65
Figura 10 <i>Figura de un sensor MZ-H19B</i>	67
Figura 11 <i>Figura de un sensor NEO-6M</i>	68
Figura 12 <i>Figura de un sensor DS18B20</i>	68
Figura 13 <i>Figura de la construcción del prototipo</i>	69
Figura 14 <i>Figura del fragmento de código de la programación del ESP32</i>	71
Figura 15 <i>Figura de la estructura JSON</i>	72
Figura 16 <i>Figura de la arquitectura del aplicativo</i>	74
Figura 17 <i>Figura de la conexión del prototipo real</i>	75
Figura 18 <i>Figura de la estructura de archivos del proyecto</i>	76
Figura 19 <i>Figura de un fragmento de código del componente encargado de la gestión de datos y el renderizado</i>	77

Figura 20	<i>Figura de un fragmento de código del componente visual.</i>	78
Figura 21	<i>Figura del dashboard del aplicativo.</i>	79
Figura 22	<i>Figura del sistema de estaciones y dispositivos.</i>	80
Figura 23	<i>Figura del sistema de geolocalización generado.</i>	81
Figura 24	<i>Figura del sistema de tabulación y descarga de datos.</i>	82
Figura 25		90
Figura 26	<i>Figura de la representación geográfica de los resultados.</i>	91
Figura 27	<i>Figura de la tabulación y descarga de datos.</i>	93
Figura 28	<i>Figura del CSV generado.</i>	93
Figura 29	<i>Figura del dato máximo alcanzado en la medición.</i>	94
Figura 30	<i>Figura de los datos tomados el día 28 de mayo del 2023 (CO2 vs Tiempo).</i>	95
Figura 31	<i>Figura de los datos tomados el día 29 de mayo del 2023 (CO2 vs Tiempo).</i>	96
Figura 32	<i>Figura de los datos tomados el día 28 de mayo del 2023 y el día 29 de mayo del 2023 (CO2 vs Temperatura).</i>	97
Figura 33	<i>Figura de los datos máximos tomados el día 28 de mayo del 2023 y el día 29 de mayo del 2023 (CO2).</i>	98
Figura 34	<i>Figura de los datos mínimos tomados el día 28 de mayo del 2023 y el día 29 de mayo del 2023 (CO2).</i>	99
Figura 35	<i>Figura de los datos promedios tomados el día 28 de mayo del 2023 y el día 29 de mayo del 2023 (CO2).</i>	100
Figura 36	<i>Mapa de calor de los datos tomados el día 28 de mayo del 2023 y el día 29 de mayo del 2023 (CO2), zona norte de Bucaramanga.</i>	101

Figura 37 <i>Mapa de calor de los datos tomados el día 28 de mayo del 2023 y el día 29 de mayo del 2023 (CO₂), zona central de Bucaramanga.</i>	102
Figura 38 <i>Mapa de calor de los datos tomados el día 28 de mayo del 2023 y el día 29 de mayo del 2023 (CO₂), zona sur de Bucaramanga y parte de Floridablanca.</i>	103

Glosario

Protocolo MQTT: es un protocolo de mensajería ligero para IoT y redes de sensores.

Internet de las cosas: la IoT es la interconexión de dispositivos físicos a través de Internet. Permite recopilar y compartir datos. Los dispositivos van desde electrodomésticos hasta wearables.

Wearables: son dispositivos electrónicos inteligentes incorporados a la vestimenta o usados corporalmente como implantes o accesorios que pueden actuar como extensión del cuerpo o mente del usuario.

Estación: son el conjunto de dispositivos o sensores conectados a un mismo microcontrolador, el cual envía información constante a la plataforma IoT Smart Campus.

Dispositivo: dispositivos encargados de recolectar los datos del entorno para su posterior análisis y visualización.

Arquitectura IoT: define la organización y la interacción de los componentes de un sistema IoT. Permite la conexión, comunicación y procesamiento de datos entre dispositivos.

Aplicación Web: software que se ejecuta en un servidor web y se accede a través de un navegador.

Framework: es un conjunto de herramientas y componentes que brindan una base de trabajo para el desarrollo de aplicaciones.

Frontend: responsable de la visualización y la experiencia del usuario en un sitio web, una aplicación móvil o cualquier otro sistema interactivo.

Backend: parte invisible y procesal de una aplicación o sistema, encargada de la lógica, el procesamiento de datos y la comunicación con los servidores y bases de datos.

Base de datos: sistema que permite almacenar y administrar grandes volúmenes de información de manera estructurada.

Coordenada: pares de valores numéricos que representan la posición de un punto en un sistema de referencia.

Longitud: la longitud es una coordenada geográfica que indica la ubicación de un punto en el eje este-oeste de la Tierra.

Latitud: la latitud es una coordenada geográfica que indica la ubicación de un punto en el eje norte-sur de la Tierra.

Requerimiento Funcional: es una declaración específica que describe una función o capacidad que debe tener un sistema o software para satisfacer las necesidades del usuario.

Requerimiento no Funcional: es una especificación que describe atributos o características del sistema que no se relacionan directamente con su funcionalidad, pero que son igualmente importantes para su rendimiento, seguridad, usabilidad, eficiencia, mantenibilidad y otros aspectos.

Diagrama de casos de uso: es una representación gráfica que muestra las interacciones entre los actores y el sistema en un escenario de uso específico.

Diagrama de clases: es una representación visual de las clases y sus relaciones en un sistema orientado a objetos.

Diagrama de actividades: es una representación visual que muestra el flujo de actividades en un proceso o procedimiento.

Mapa de calor: es una representación visual de datos en la que se utiliza el color para mostrar la distribución y la intensidad de un fenómeno o variable geográfica. Los colores más intensos indican valores con mayores concentraciones, mientras que los colores más suaves indican valores de menores concentraciones.

Grafica de serie: muestra la relación y el cambio de una serie de datos a lo largo del tiempo. Se utiliza principalmente para representar datos secuenciales, como valores numéricos, a lo largo de un eje de tiempo.

Resumen

TÍTULO: Sistema de información basado en IoT para medición de la calidad del aire y seguimiento de rutas en sistemas de transporte público.

AUTORES: Sebastian Pérez López, Juan Pablo Claro Pérez.

PALABRAS CLAVES: calidad del aire, internet de las cosas, monitoreo, mapeo geográfico, transporte público.

DESCRIPCIÓN: la medición y evaluación de la calidad del aire en nuestro entorno es crucial para comprender su impacto en nuestra salud y en el ecosistema circundante. En este sentido, se llevó a cabo un estudio para abordar el problema específico de los niveles de calidad del aire en las rutas del transporte público de Bucaramanga.

Para resolver este problema, se propone el desarrollo de un sistema de información basado en IoT. Este sistema utiliza sensores de gases para medir los niveles de concentración y registra y almacena los datos generados por estos sensores. Además, se establecen umbrales de concentración considerados perjudiciales para generar visualizaciones de las áreas donde se detectan niveles nocivos para los seres humanos. Asimismo, se aprovechan los datos recopilados y las coordenadas de cada ubicación en las rutas para crear un mapa geográfico del área metropolitana de Bucaramanga, que muestra las rutas y sus respectivos niveles de calidad del aire.

En cuanto a los resultados obtenidos, se ha logrado una mayor comprensión de los niveles de calidad del aire en las rutas del transporte público de Bucaramanga. El sistema de información basado en IoT ha permitido identificar áreas con concentraciones nocivas de gases y visualizarlas de manera clara en el mapa geográfico. Estos hallazgos brindan una base sólida para tomar decisiones informadas y abordar de manera eficiente los problemas de calidad del aire en la ciudad.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Programa académico. Director: Jathinson Meneses Mendoza. MTh en Gestión, Aplicación y Desarrollo de Software. Codirector: Gabriel Rodrigo Pedraza Ferreira. Ph D. Ciencias de la computación.

Abstract

TITLE: IoT-based information system for air quality measurement and route tracking in public transport systems.

AUTHORS: Sebastian Pérez López, Juan Pablo Claro Pérez

KEYWORDS: air quality, internet of things, monitoring, geographic mapping, public transportation.

DESCRIPTION: the measurement and evaluation of the air quality in our environment is crucial to understand its impact on our health and on the surrounding ecosystem. In this sense, a study was carried out to address the specific problem of air quality levels on public transport routes in Bucaramanga.

To solve this problem, the development of an information system based on IoT is proposed. This system uses gas sensors to measure concentration levels and records and stores the data generated by these sensors. In addition, concentration thresholds considered harmful are established to generate visualizations of areas where levels harmful to humans are detected. Likewise, the data collected and the coordinates of each location on the routes are used to create a geographical map of the Bucaramanga metropolitan area, which shows the routes and their respective levels of air quality.

Regarding the results obtained, a better understanding of the levels of air quality in the public transport routes of Bucaramanga has been achieved. The IoT-based information system has made it possible to identify areas with harmful concentrations of gases and visualize them clearly on the geographical map. These findings provide a solid foundation for making informed decisions and efficiently addressing air quality issues in the city.

* Degree Work

** Faculty of Physical-mechanical Engineering. School of Systems Engineering and Informatics. Academic program. Director: Jathinson Meneses Mendoza. MTh in Software Management, Application and Development. Codirector: Gabriel Rodrigo Pedraza Ferreira. Ph D. Computer Science.

Introducción

La contaminación presente en el aire es una problemática que afecta a las personas desde hace mucho tiempo, pero se ha intensificado en la última década, el efecto invernadero provocado por los diferentes gases contaminantes presentes en la atmósfera ha incrementado, provocando diferentes cambios en el ambiente y el entorno. Con el tiempo, el interés presente en las diferentes áreas de investigación de este fenómeno ha ido en aumento y actualmente es un motivo de alarma en gran parte del mundo. “Trabajemos juntos en este día, y todos los días, para limpiar el aire que respiramos y poder así proteger tanto a las personas como al planeta”. António Guterres.

Hoy en día, debido a las diferentes crisis sanitarias por las cuales la sociedad ha pasado, se da gran importancia a la regulación de la contaminación en el aire, ya que puede determinar la salud de una población. Existen diferentes gases que, dependiendo de su nivel de concentración, pueden ser nocivos para los seres vivos, por ejemplo, el dióxido de carbono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.

Estos gases se forman naturalmente a concentraciones muy pequeñas que no son nocivas para la vida, pero actualmente dichos gases han incrementado en proporciones significativas, debido a que gran parte de los procesos cotidianos desarrollados por el ser humano deja residuos particulados elevando así la concentración de estos, lo cual afecta fuertemente a muchos de los ciclos naturales.

La contaminación del sistema de transporte es una de las principales causas del aumento de los gases que contribuyen al deterioro de la calidad del aire. Los vehículos motorizados, como automóviles, camiones, motocicletas y autobuses, emiten una variedad de contaminantes

atmosféricos que incluyen dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas suspendidas, monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles (COV).

Se plantea la investigación de la calidad del aire por medio de sensores los cuales se encargan de monitorear y producir diferentes lecturas del ambiente presente en las rutas de transporte público las cuales presentan un flujo alto de usuarios que se encuentran expuestos a diferentes agentes contaminantes, esto con el fin de producir un sistema de información elaborado a partir de los datos obtenidos y así determinar la contaminación presente en las rutas seguidas por las personas.

En este libro, se abordan los objetivos planteados en el proyecto, con la intención de proporcionar una visión completa de su alcance y relevancia. Se establece un marco de referencia necesario para comprender el contexto en el que se llevó a cabo la investigación, incluyendo una revisión detallada de la literatura existente en el campo de la calidad del aire y el monitoreo ambiental.

Además, se describe en detalle la metodología utilizada en el proyecto, desde la selección de los parámetros a monitorear hasta el diseño y desarrollo del prototipo IoT encargado de la obtención de los datos. Se aborda el proceso de selección de los sensores adecuados, la configuración y despliegue de los dispositivos en las rutas del transporte público, y la implementación de la infraestructura necesaria para la transmisión y almacenamiento de los datos recopilados.

En cuanto al entorno web, se detallan los requisitos funcionales y técnicos necesarios para su desarrollo, junto con el diseño de la interfaz de usuario y la implementación de las funcionalidades requeridas para el procesamiento y visualización de los datos en tiempo real. Se

realizan pruebas exhaustivas para garantizar la fiabilidad y precisión de la plataforma, asegurando que los usuarios puedan acceder a información relevante de manera intuitiva y efectiva.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos a partir de los datos recolectados, brindando un análisis en profundidad que permite evaluar el cumplimiento de los objetivos establecidos. Se analiza el comportamiento en los niveles de la calidad del aire en las rutas del transporte público, y se discute el impacto de estos resultados en relación con el área urbana de Bucaramanga.

En resumen, este libro proporciona un enfoque integral y detallado sobre el desarrollo del proyecto, desde los fundamentos teóricos hasta la implementación práctica, brindando una visión completa de los resultados obtenidos y su relevancia para la gestión ambiental en Bucaramanga.

1. Planteamiento y justificación del problema

Los ciudadanos que utilizan el transporte público están expuestos constantemente a niveles significativos de contaminación, lo cual puede tener un impacto negativo en su salud y aumentar el riesgo de enfermedades respiratorias. Esta situación afecta directamente su calidad de vida, considerando que la contaminación ambiental aumenta a lo largo del tiempo. Actualmente, la calidad del aire se monitorea mediante torres de vigilancia que evalúan los compuestos presentes en el ambiente y calculan su concentración para determinar si se encuentran dentro de los límites permitidos; sin embargo, surge el interrogante de qué ocurre en zonas con altos índices de contaminación.

En este sentido, obtener información específica de cada medio de transporte que recorre la ciudad, podría aportar a la identificación de los puntos que exponen a los usuarios a mayores niveles de agentes contaminantes, los cuales tienen grandes implicaciones sobre las personas propensas a padecer enfermedades respiratorias.

Asimismo, la implementación de un sistema de información para monitorear la calidad del aire proporciona datos relevantes para evaluar las diferentes zonas del entorno de transporte público, donde miles de personas se desplazan a diario en la ciudad. Estos datos serán fundamentales para evaluar la efectividad de las políticas y estrategias ambientales implementadas, identificar áreas prioritarias de enfoque, ajustar las medidas existentes con el objetivo de lograr una mejora continua en la calidad del aire, y cumplir con los estándares ambientales establecidos.

La obtención de datos en tiempo real permite a los usuarios participar de manera activa, accediendo a las lecturas del sistema para generar conciencia sobre la importancia de la calidad

del aire, cuidar su propia salud y la de los demás usuarios, evitando las zonas más contaminadas. Además, fomenta la búsqueda colaborativa de soluciones entre los ciudadanos y las autoridades competentes, promoviendo un enfoque conjunto para abordar el problema de la contaminación atmosférica. Considerando los argumentos anteriores, se plantea una investigación enfocada en la creación de un sistema de información para monitorear y evaluar la calidad del aire en el área de Bucaramanga.

Este sistema integra un seguimiento de las rutas de transporte público, con el fin de proporcionar a los usuarios información detallada sobre la calidad del aire en las zonas por las que transitan. El sistema de información dispone de tecnologías para el monitoreo de la calidad del aire, así como en la recopilación de datos sobre las rutas de transporte público. Estos datos se analizan y presentan de manera accesible para que los usuarios puedan consultarlos fácilmente a través de una plataforma web, esto con el fin de mantener informada a la población y a todo aquel que lo necesite.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de información basado en IoT para medición de la calidad del aire y seguimiento geográfico de rutas en sistemas de transporte público en la ciudad de Bucaramanga.

2.2 Objetivos Específicos

Definir los requerimientos de la herramienta para medir la calidad del aire, así como los parámetros a monitorear en las rutas de transporte público.

Diseñar una arquitectura basada en tecnología IoT que permita obtener información de los parámetros seleccionados.

Desarrollar e implementar un prototipo de la herramienta IoT basado en la arquitectura previamente definida.

Evaluar el prototipo y recolectar datos sobre la calidad del aire.

Analizar los datos obtenidos para su posterior presentación de resultados mediante una distribución espacial usando herramienta geográfica.

3. Marco de referencia

El aire presente en el planeta es un componente de la troposfera, que es la capa más delgada de la atmósfera y el lugar donde habitan los seres vivos. Comprende en altitud, 7 kilómetros en los polos y 17 kilómetros en el ecuador. Se encuentra compuesto de múltiples componentes, que varían dependiendo de la altitud y latitud, así como de los miles de kilómetros recorridos, los cuales otorgan nuevas propiedades, por ejemplo, a través del transporte de pequeños microorganismos, animales aéreos, polen de diferentes especies de flora, e insectos, entre otros elementos, que se trasladan a diferentes partes del mundo.

3.1 Composición del aire

Cuando el aire que conocemos se encuentra con bajo porcentaje de humedad, está compuesto por un 78% de nitrógeno, un 21% de oxígeno y un 1% de argón, también entre su composición se encuentra el vapor de agua que compone un 0,1% (Agencia europea de medio ambiente, 2013) del mismo pero esto ocurre en condiciones donde al aire se encuentre totalmente puro, en realidad este compuesto se encuentra combinado con algunos gases denominados “gases traza” los cuales como el dióxido de carbono y el metano son parte del mismo ya que cada ser vivo produce su “huella de carbono” en mayor o menor medida, estos gases son producto de las actividades diarias de cada ser al respirar o al realizar sus necesidades fisiológicas; estos tipos de gases presentan una medida de partes por millón (ppm) las cuales permiten encontrar las concentraciones presentes en la atmósfera (troposfera).

3.2 Contaminación del aire

Los gases traza no necesariamente se consideran contaminantes, ya que contribuyen al ciclo normal del ambiente, estos se encuentran con frecuencia en juego las erupciones volcánicas las cuales además de expedir dióxido de carbono a la atmósfera libera azufre y otras sustancias que se consideran contaminantes, al igual que las tormentas de arena como por ejemplo las provenientes del Sahara hasta el suelo Amazónico, los incendios forestales y tormentas; estos agentes son totalmente beneficiosos para mantener la temperatura estable en el planeta además de favorecer al ecosistema, pero ¿Por qué se escucha hablar de la contaminación del aire? Esto se debe a que en la naturaleza la concentración de los gases traza se presenta entre 300 a 400 ppm donde no presentan un riesgo en la salud ni un desequilibrio en el medio, pero en la actualidad las concentraciones de estos gases ha ido en aumento presentando un efecto adverso en el ambiente donde la temperatura de la tierra a incrementado haciendo que el equilibrio en la tierra no esté presente, además las enfermedades respiratorias y algunas no transmisibles han ido en aumento, tan solo en el 2020 se calcula que 3.2 millones de personas fallecieron a causa de la contaminación del aire doméstico entre las cuales se encuentran 237.000 niños menores de 5 años (Organización mundial de la salud., 2022).

Al hablar de contaminación se visualiza un panorama donde las ciudades se encuentran cubiertas por nubes de humo, personas sin posibilidad de respirar y cielos opacos, pero esto no es del todo cierto ya que puede existir un cielo totalmente despejado pero las concentraciones de gases trazas y materiales particulados pueden encontrarse en sus porcentajes más altos; pero aquí surge una nueva pregunta ¿Qué son los materiales particulados? Estos son los contaminantes más perjudiciales para la vida en general, son pequeñas partículas como el dióxido de azufre, el óxido

de nitrógeno, el amoníaco, el ozono y algunos metales pesados como el arsénico, el cadmio, el mercurio y el níquel los cuales penetran en el organismo y pueden alojarse en el torrente sanguíneo (Agencia europea de medio ambiente, 2013), siendo expedidos por la combustión de diferentes compuestos como en los vehículos o simplemente en la comodidad del hogar al cocinar.

3.3 Efectos en la salud del ser humano

La polución del aire trae consigo diferentes problemas de salud para muchas personas. Para la (Organización mundial de la salud., 2022). cada año, 3,2 millones de personas mueren prematuramente por enfermedades que son atribuibles a la contaminación del aire doméstico, siendo la mayor causa la cardiopatía isquémica con un 32%, es decir las enfermedades causadas por la arteriosclerosis que consiste en la formación de colágeno, lípidos y linfocitos en las arterias coronarias encargadas de enviar sangre al miocardio (Pérez, 2022), de las cuales un 12% son atribuibles a la contaminación del aire doméstico. En seguida, el 23% de las defunciones son atribuibles a accidentes cerebrovasculares, de los cuales el 12% ocurrieron en ambientes domésticos. El 21% siguiente se debe a infecciones de las vías respiratorias como la neumonía (infección de los alveolos), el 19% se deben a las enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (EPOC) que encapsulan el enfisema y la bronquitis, y por último aproximadamente el 6% se debe a cáncer de pulmón por exposición a diferentes niveles de material particulado presente en la combustión de ciertos componentes (Organización mundial de la salud., 2022).

La realidad presente en el mundo sobre la importancia de mantener bajo control los niveles de contaminación del aire va en aumento, donde cada país ha iniciado la ardua labor de realizar estudios históricos sobre sus condiciones y tomar medidas drásticas si es necesario. En Colombia los estudios son realizados por el Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales

(IDEAM) fundado en 1993 donde se han presentado diferentes monitoreos a nivel nacional desde el año 2007, donde las mediciones presentan un histórico anual del aire en el territorio; en Bucaramanga se presenta el SVCA el cual se encarga de la medición y evaluación del aire en el área metropolitana, enfrentándose a diferentes factores como las corrientes de aire y la densidad del mismo, esto juega un papel importante en el comportamiento de la información, presentando la información a un nivel general.

3.4 Respuestas ante la problemática

En respuesta a esta problemática la organización mundial de la salud ha pedido y prestado asistencia a los diferentes países del mundo para mejorar la capacidad en la realización de estudios y evaluaciones de la calidad del aire presente en sus territorios esto con el fin de preservar la salud de los diferentes habitantes, elaborando directrices en conjunto con diferentes avances tecnológicos para así reducir las emisiones nocivas tanto en hogares como en ambientes externos, esto con el fin de mejorar la calidad de vida.

Teniendo en cuenta todos los aspectos y fenómenos que afectan directamente a la sociedad y a la vida en general, en los últimos años, se han desarrollado diferentes proyectos e investigaciones, con el fin de estudiar la calidad del aire, como el presentado en el 2020, en la 4ta Conferencia Internacional de Electrónica, Comunicaciones y Tecnología Aeroespacial (ICECA). En esta conferencia se menciona que más del 85% de las personas se encuentran expuestas a altos niveles de material particulado y gases nocivos para la salud. Teniendo esto en mente un equipo integrado por Syed Faiazuddin, M.V. Lakshmaiah, K. Tanveer Alam y M. Ravikiran desarrollaron un dispositivo basado en IoT que captura parámetros del ambiente como CO, CO₂, temperatura, humedad, fuga de gas, humo y etc. Esta información es obtenida por Rasp Pi4, Arduino Uno, para

su posterior procesamiento, análisis y transmisión a la nube donde se monitorean continuamente (Faiazuddin, Lakshmaiah, Alam, & Ravikiran, 2020).

3.5 Internet de las cosas

El internet de las cosas o por sus siglas en inglés IoT es definido por (Oracle, 2022) como una red de objetos físicos conformados por sensores, software y otras tecnologías que se conectan entre sí, intercambiando datos con otros dispositivos y sistemas a través de internet.

Cada vez el campo de la IoT adquiere más relevancia, debido al fuerte crecimiento de la tecnología en los últimos años. Actualmente una gran cantidad de objetos que se utilizan cotidianamente se pueden conectar a internet a través de dispositivos integrados, que facilitan el intercambio de información y amplían las funcionalidades de los mismos, permitiendo así, que poco los procesos utilizados para la realización de tareas diarias sean más autónomas.

Esto se debe al decremento en el costo de la informática, la incorporación del método de “guardado en la nube”, el big data, analítica y tecnologías móviles las cosas físicas pueden compartir y recopilar datos con una mínima interacción humana (Oracle, 2022).

3.6 Arquitectura de microservicios

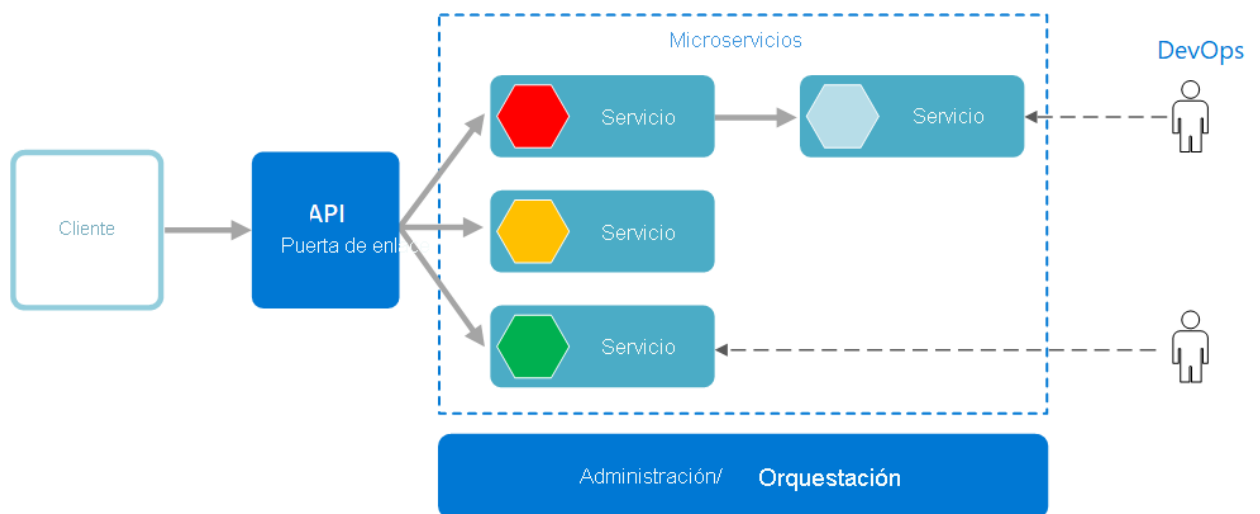
Cuando se habla de dispositivos IoT, se piensa en una serie de dispositivos que se comunican entre sí por protocolos determinados, estos dispositivos transmiten información entre sí, para lo cual es de gran importancia una arquitectura que organice el flujo de datos.

Teniendo esto en cuenta, una arquitectura de microservicios consta de una colección de servicios autónomos y pequeños. Cada uno de servicio es independiente y debe implementar una funcionalidad de negocio individual dentro de un contexto delimitado (Microsoft, 2022). Lo cual

nos facilita el manejo de la información, y al mismo tiempo flexible, ya que los componentes operan con cierto grado de independencia.

Figura 1

Figura sobre una arquitectura de microservicios



Nota. La figura representa el funcionamiento del protocolo MQTT. Tomado de (Microsoft, 2022).

3.7 Protocolos de comunicación

Los dispositivos IoT utilizan diferentes protocolos de comunicación para el intercambio y recopilación de datos que les permite adaptarse flexiblemente al sistema con el que interactúan como pueden ser, el protocolo HTTP por sus siglas en inglés (Hypertext Transfer Protocol) el cual

permite realizar peticiones de datos y recursos, normalmente utilizado para documento HTML (MDN contributors, 2022), el protocolo por sus siglas en inglés AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) el cual permite transportar la información por medio de un intermediario (IONOS, 2019), el proceso de mensajes Kafka el cual es un servicio de mensajería basado en un registro de confirmación distribuido, que permite publicar y suscribir datos en corrientes de registros de datos (mensajes) (IBM Corporation, 2022) y el protocolo MQTT el cual son las siglas de MQ Telemetry Transport, que nos permite la comunicación M2M (machine-to-machine) de tipo message queue (Llamas, 2019).

3.7.1 Protocolo de comunicación MQTT

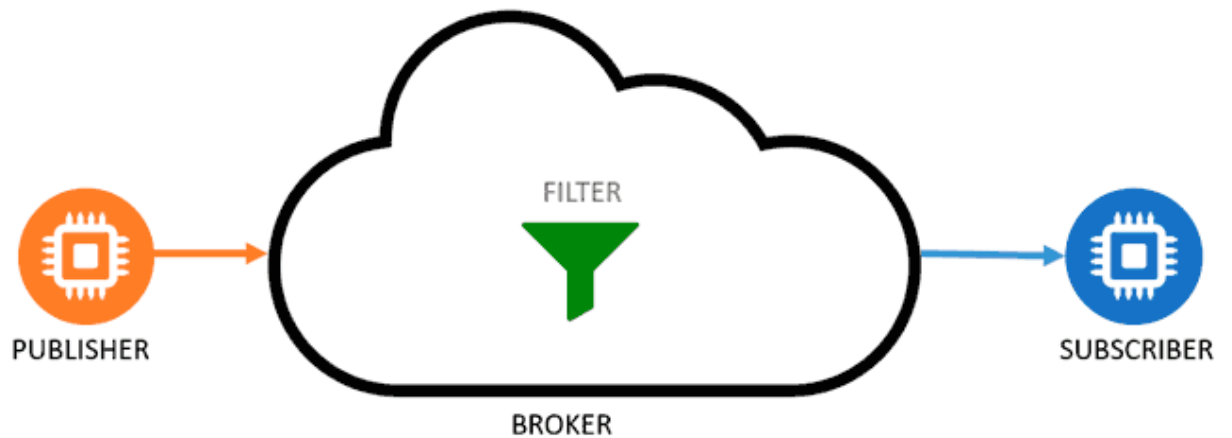
Actualmente uno de los protocolos más utilizados en el campo de IoT, es el protocolo MQTT, debido a su sencillez y ligereza, lo cual es importante dado que los dispositivos utilizados tienden a tener limitaciones de potencia, consumo y ancho de banda.

Como se mencionó anteriormente, este protocolo se basa en la comunicación M2M (machine-to-machine), donde los mensajes se atienden por orden de llegada o de forma FIFO (First in First out), lo cual estaba basado en la pila TCP/IP.

El MQTT funciona en base a un servicio de mensajería push con patrón publicador/suscriptor (pub-sub). Estos mensajes se filtran por medio de topics organizados jerárquicamente, de esta manera un cliente puede publicar un mensaje a un determinado topic y otros clientes puede suscribirse a ese topic, para que posteriormente el bróker envíe los mensajes suscritos.

Figura 2

Figura sobre el funcionamiento del protocolo MQTT



Nota. La figura representa el funcionamiento del protocolo MQTT. Tomado de (Llamas, 2019).

Los clientes inician una conexión TCP/IP con el bróker, manteniéndose abierta hasta que esté la finalice, que por defecto se emplea el puerto 1883 y 8883 cuando funciona sobre TLS. La comunicación se da por medio de mensajes que permiten realizar diferentes acciones como son:

3.7.1.1 Mensaje CONNECT

Permite al cliente iniciar conexión con el bróker, y contiene información necesaria como es nombre de usuario, contraseña, client-id, etc. El bróker responde con un mensaje CONNACK, que contiene el resultado de la conexión.

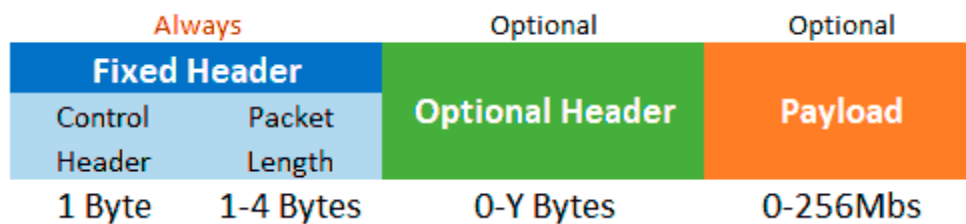
3.7.1.2 Mensaje SUBSCRIBE y UNSUBSCRIBE

Permite al cliente suscribirse y de suscribirse a determinado topic, el bróker responde con un mensaje SUBACK y UNSUBACK respectivamente.

Estos mensajes manejan una estructura específica, que les permite una gran agilidad, siendo esta su gran fortaleza. Cada mensaje consta de tres partes, las cuales son, La cabecera fija que indica el tipo de mensaje enviado, y la longitud del mensaje, cabecera variable la cual contiene información adicional y el contenido.

Figura 3

Figura sobre la estructura de un mensaje MQTT.



Nota. La figura representa la estructura de un mensaje MQTT. Tomado de (Llamas, 2019).

3.7.1.3 Nivel de calidad de los mensajes MQTT

Hay tres niveles de calidad de servicio (QoS) que se pueden utilizar en MQTT, y cada uno proporciona diferentes garantías de entrega de mensajes. Estos son:

3.7.1.3.1 QoS 0:

Este nivel de calidad de servicio es el más simple y no proporciona ninguna garantía de entrega de mensajes. Los mensajes se entregan al menos una vez, pero pueden perderse en la red o duplicarse debido a problemas de red. Este nivel se utiliza en situaciones en las que la pérdida de algunos mensajes no tiene consecuencias graves.

3.7.1.3.1 QoS 1:

Este nivel de calidad de servicio garantiza que los mensajes se entreguen al menos una vez. Si un mensaje se pierde en la red, se reenviará hasta que se confirme la entrega. Sin embargo, es posible que un mensaje se entregue más de una vez, lo que puede generar duplicados. Este nivel se utiliza en situaciones en las que se requiere una entrega confiable de mensajes.

3.7.1.3.1 QoS 2:

Este nivel de calidad de servicio proporciona la entrega exactamente una vez, lo que significa que no se entregan duplicados ni se pierden mensajes. El protocolo asegura que el mensaje se entregue exactamente una vez y se confirme la recepción del mensaje. Este nivel se utiliza en situaciones críticas en las que la pérdida o duplicación de mensajes puede tener consecuencias graves.

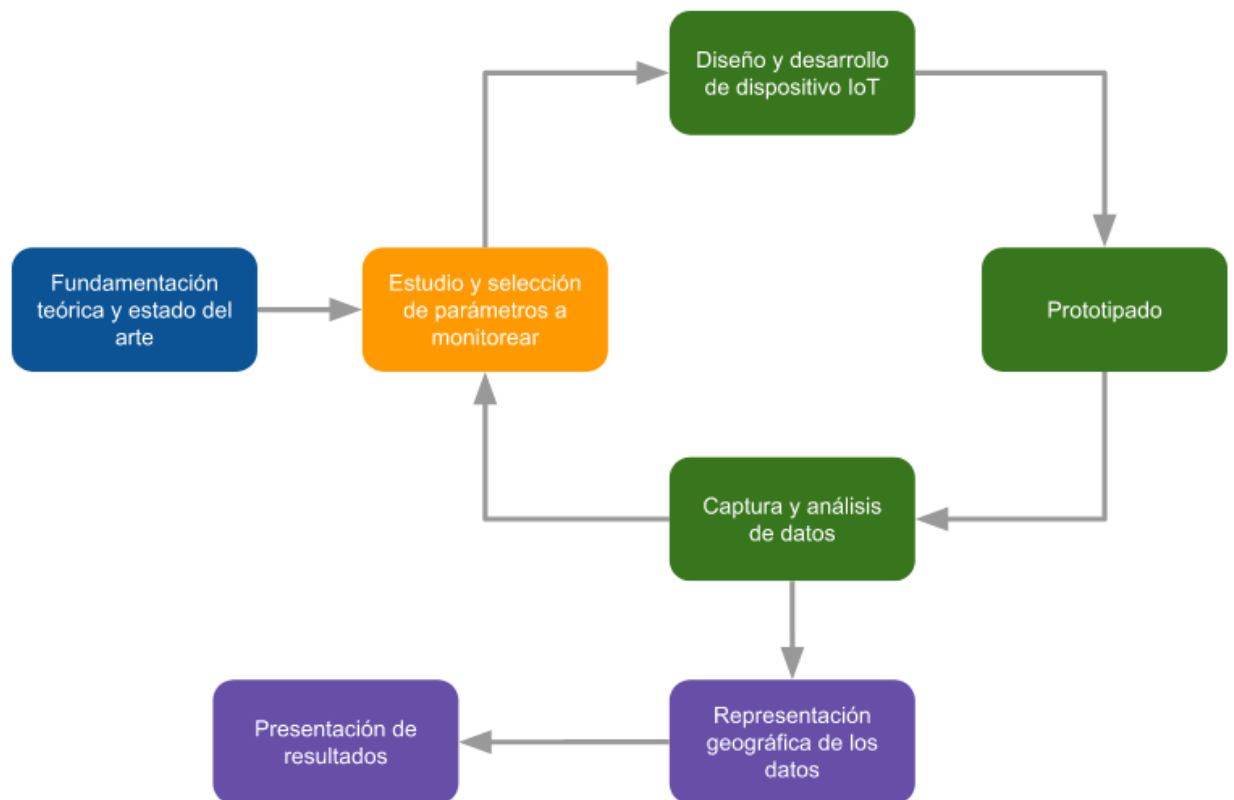
4. Metodología

Este estudio tiene como objetivo medir y analizar la calidad del aire en el área urbana de Bucaramanga. Para ello, se ha desarrollado una metodología mixta que combina enfoques cuantitativos y cualitativos para obtener una comprensión holística del problema y llegar a conclusiones de forma más detallada.

El proyecto se enfoca en la implementación de un sistema IoT que captura información de los parámetros seleccionados en la fase de estudio y selección de parámetros. Además, se ha establecido un ciclo de retroalimentación constante para mejorar la calidad del prototipo final y obtener resultados óptimos. La presente metodología busca brindar una solución efectiva al problema de la calidad del aire en el área urbana de Bucaramanga, permitiendo un análisis detallado de los datos obtenidos y una visualización de la calidad del aire en el área metropolitana.

Figura 4

Figura de la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto.



Nota. La figura representa la estructura seguida para el desarrollo del proyecto.

4.1 Fase 1: Fundamentación teórica y estado del arte.

La Fase 1, se enfoca en revisar y estudiar la documentación relacionada con las tecnologías de IoT aplicadas al monitoreo del aire y sistemas de posicionamiento. Además, se busca comprender las características de la calidad del aire en el área urbana de Bucaramanga.

4.1.1 Actividad:

Revisar y estudiar documentación relacionada a las tecnologías IoT, enfocadas en el monitoreo del aire y de sistemas de posicionamiento, así como también entendimiento de las características de la calidad del aire en el área urbana de Bucaramanga.

4.1.2 Producto resultado:

Conocimiento acerca de la calidad del aire en el área urbana de Bucaramanga, así como el estado del arte sobre los sistemas desarrollados para el modelo de la calidad de este y de posicionamiento geográfico.

4.2 Fase 2: Estudio y selección de parámetros a monitorear.

La Fase 2, se enfoca en estudiar y seleccionar los parámetros que serán medidos para evaluar la calidad del aire en el área urbana de Bucaramanga. Estos parámetros se eligen en base a su impacto en la salud y su viabilidad para ser implementados en el sistema IoT.

4.2.1 Actividad:

Estudiar y seleccionar los parámetros que nos permitirán medir la calidad del aire en el área urbana de Bucaramanga, basados en el efecto de este en la salud y su viabilidad a la hora de ser implementado el sistema IoT.

4.2.2 Producto resultado:

Parámetros a utilizar para la implementación del sistema IoT en área metropolitana de Bucaramanga con el fin de brindar datos reales para su procesamiento y divulgación de la información.

4.3 Fase 3: Diseño y desarrollo del sistema IoT

La Fase 3, se enfoca en el diseño y desarrollo del sistema que capturará la información de los parámetros seleccionados en la Fase 2. Este sistema será implementado en las rutas de

transporte público de Bucaramanga, con el objetivo de obtener lecturas que identifiquen los lugares con niveles más altos de contaminación.

4.3.1 Actividad:

Diseñar el sistema IoT que captura información de los parámetros seleccionados en la fase 2, para su implementación en las rutas de transporte público de Bucaramanga, con el fin de obtener lectura que permitan identificar los lugares que presenten índices más altos de contaminación.

4.3.2 Producto resultado:

Diseño del sistema IoT que nos permitirá tomar decisiones como las tecnologías o elementos a utilizar para su implementación.

4.4 Fase 4: Prototipado

En la Fase 4, se procede al desarrollo del prototipo del sistema IoT basado en los conocimientos adquiridos en las fases anteriores. Durante esta etapa, se lleva a cabo la actividad de desarrollar el prototipo del sistema, el cual consiste en la construcción y montaje de un dispositivo IoT específicamente diseñado para obtener información sobre la calidad del aire, teniendo en cuenta la posición geográfica.

4.4.1 Actividad:

Desarrollar el prototipo del sistema IoT basado en la información obtenida en las fases anteriores.

4.4.2 Producto resultado:

Dispositivo IoT que nos permite obtener información de la calidad del aire teniendo en cuenta la posición geográfica.

4.5 Fase 5: Captura y análisis de datos

En la Fase 5, se lleva a cabo la actividad de obtener información de los parámetros previamente seleccionados, así como la posición geográfica, siguiendo las rutas del transporte público en el área metropolitana de Bucaramanga.

4.5.1 Actividad:

Obtener información de los parámetros seleccionados, así como la posición, siguiendo las rutas del transporte público del área metropolitana de Bucaramanga.

4.5.2 Producto resultado:

Conjunto de datos sobre los parámetros seleccionados contra la ubicación registrada.

4.6 Fase 6: Representación geográfica de los datos.

En la Fase 6, se lleva a cabo la actividad de representar la información obtenida en la fase 5 en forma de un mapa de calor. Este mapa de calor tiene como objetivo visualizar de manera gráfica la concentración de los parámetros que determinan la calidad del aire en las diferentes rutas del transporte público de Bucaramanga. Mediante esta representación geográfica, se puede observar de manera clara y precisa las áreas con mayor y menor calidad del aire, identificando así las zonas donde se concentra la contaminación.

4.6.1 Actividad:

Representar la información obtenida en la fase 5, en forma de mapa de calor con el fin de observar la concentración de los parámetros que determinan la calidad del aire.

4.6.2 Producto resultado:

Representación geográfica que permite la visualización de las rutas del transporte público de Bucaramanga y su calidad del aire en base a los parámetros seleccionados.

4.7 Fase 7: Presentación de resultados.

En la Fase 7, se lleva a cabo la actividad de presentar los resultados y análisis obtenidos a partir del conjunto de datos recopilados y la representación geográfica realizada en las fases anteriores. En esta etapa, se presenta de manera formal y estructurada la información relacionada con la calidad del aire en las rutas del transporte público de Bucaramanga, basándose en los datos obtenidos y su respectivo análisis.

4.7.1 Actividad:

Presentar los resultados y análisis obtenidos del conjunto de datos y representación geográfica.

4.7.2 Producto resultado:

Presentación acerca de la calidad del aire en las rutas del transporte público, basada en los datos obtenidos y su respectivo análisis y discusiones de la relación con el área urbana de Bucaramanga.

5. Diseño de la propuesta

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un prototipo funcional que permita medir y analizar la calidad del aire en el área urbana de Bucaramanga teniendo como muestra la Universidad Industrial de Santander, con la finalidad de comprender a profundidad la problemática y proponer soluciones efectivas. En esta sección, se describirá el proceso de desarrollo del prototipo, desde la selección de tecnologías y parámetros hasta la implementación y pruebas del dispositivo IoT.

5.1 Estudio y selección de parámetros a monitorear.

El proyecto de investigación se enfoca en analizar la calidad del aire en el área urbana de Bucaramanga, específicamente en el campus de la Universidad Industrial de Santander. Para ello, es importante conocer los diferentes gases contaminantes que afectan la calidad del aire en esta región.

Debido a esto se investigó sobre los principales gases contaminantes y los efectos en la salud según su concentración, entre los cuales se encontraron:

- El dióxido de nitrógeno (NO₂), que es producido principalmente por la quema de combustibles fósiles.
- El NO₂ es un gas tóxico que puede afectar la salud humana y la calidad del aire.
- El sulfuro de hidrógeno (H₂S), que se produce por la descomposición de materia orgánica y la actividad industrial. El H₂S tiene un olor desagradable y puede afectar la salud de las personas en concentraciones altas.

- El monóxido de carbono (CO) es otro gas contaminante que se forma por la combustión incompleta de combustibles fósiles. El CO es incoloro e inodoro, pero puede ser mortal en altas concentraciones.
- El dióxido de carbono (CO₂) es un gas de efecto invernadero que se produce naturalmente en la respiración de los seres vivos y la descomposición de la materia orgánica.
- El dióxido de azufre (SO₂) es otro gas contaminante que se forma por la quema de combustibles fósiles y la actividad industrial. El SO₂ puede tener efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente.
- El ozono (O₃) es un contaminante peligroso que se produce cuando la luz solar interactúa con gases contaminantes emitidos por vehículos y fábricas.
- El material particulado (PM) es un término que se refiere a una mezcla de partículas sólidas y líquidas que se encuentran en el aire. Estas partículas pueden ser de diferentes tamaños y orígenes, como el polvo, el hollín y las emisiones de combustión. Las partículas más pequeñas (PM_{2.5}) pueden penetrar profundamente en los pulmones y en el torrente sanguíneo, lo que puede causar una serie de problemas de salud, como enfermedades cardíacas, pulmonares y cáncer. Las partículas más grandes (PM₁₀) pueden causar problemas respiratorios y contribuyen a la formación de la niebla y la reducción de la visibilidad.

Tabla 1

Elementos contaminantes y su efecto en la salud según el volumen de estos en el aire.

Elemento	Unidad	Crítico	Grave	Normal
Oxígeno (O)		16.0%	19.5%	20.9%
Efectos en la salud		Dificultad en la respiración Dolor de cabeza Fatiga	Dificultad en la respiración	Niveles normales
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	PPM	20<	5-10	0.2-1
Efectos en la salud		Irritación en los ojos Dolor de cabeza Tos	Irritación en nariz y garganta	Niveles normales Se distingue su olor amargo
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	PPM	100<	1-100	0.3-1
Efectos en la salud		Pérdida del sentido Pérdida de la respiración	Tos Pérdida del olfato Irritación	Niveles normales Mínima irritación Olor perceptible
Monóxido de carbono (CO)	PPM	400<	25-400	0.1-25

Efectos en la salud		Dolor de cabeza Mareo Colapso y pérdida del conocimiento	Dolor en la frente	Niveles normales Se distingue su olor
Dióxido de carbono (CO ₂)	PPM	>2000	1000-2000	1000-400
Efectos en la salud		Fatiga Falta de aire Ansiedad Sensación de temperatura alta	Dificultad para respirar Dolor de cabeza	Niveles normales
Dióxido de azufre (SO ₂)	PPM	1.4<	0.31-1.4	0.3PPM
Efectos en la salud		Dificultad para respirar Irritación ocular Inflamación de las vías respiratorias.	Se distingue su olor Irritación en la garganta	Niveles normales
Ozono (O ₃)	µg/m ³	180-240	120-180	< 120
Efectos en la salud		Tos Respiración silbante Irritación en los ojos	Efectos leves Mareos Reducción de la respiración	Niveles normales

Material Particulado (PM10)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	> 250	150-250	< 50
Efectos en la salud		Las personas que padecen enfermedades pulmonares o cardíacas pueden experimentar síntomas graves y las personas sanas pueden experimentar irritación de los ojos, la nariz y la garganta, así como tos y dificultad para respirar.	Las personas que padecen enfermedades pulmonares o cardíacas pueden experimentar síntomas más graves, como exacerbación de la tos, sibilancias, opresión en el pecho y falta de aliento.	Niveles normales

Nota. Esta tabla muestra el efecto en la salud de los diferentes gases contaminantes según el nivel de concentración expuesto.

Teniendo en cuenta los gases mencionados, se seleccionaron los mencionados a continuación teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Fuente de emisión: los contaminantes pueden clasificarse según su origen, ya sea natural o generado por la actividad humana.
- Composición química: los contaminantes pueden ser clasificados por su composición química, por ejemplo, gases como el dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, entre otros, o partículas como el polvo, la ceniza y otros materiales sólidos suspendidos en el aire.
- Efectos en la salud: los contaminantes pueden clasificarse en función de sus efectos en la salud humana, como aquellos que causan enfermedades respiratorias, cardiovasculares, cáncer, entre otros.

- **Persistencia:** los contaminantes pueden ser clasificados según su tiempo de permanencia en la atmósfera y su capacidad de ser transportados por el viento a grandes distancias.
- **Concentración:** los contaminantes pueden ser clasificados por su concentración en el aire, lo que puede ayudar a determinar su impacto en la calidad del aire y la salud humana.

5.1.1 Dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas de efecto invernadero producido naturalmente por la respiración de los seres vivos y la descomposición de materia orgánica. Sin embargo, la mayor fuente de emisión de CO₂ es la quema de combustibles fósiles como petróleo, gas natural y carbón en procesos industriales y en la generación de energía eléctrica (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014).

El CO₂ es un compuesto químico formado por un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno. Es incoloro, inodoro y no es tóxico en concentraciones normales (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2019).

Los efectos del CO₂ en la salud humana no son directos, pero su contribución al cambio climático y a la calidad del aire pueden afectar la salud de las personas. El cambio climático puede aumentar la frecuencia y la intensidad de eventos climáticos extremos como olas de calor, sequías e inundaciones, lo que puede tener consecuencias en la salud, como aumento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

El CO₂ es un gas persistente en la atmósfera, lo que significa que puede permanecer en el aire durante décadas o incluso siglos después de ser emitido. Además, el aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera es responsable del cambio climático global, que es uno de los mayores desafíos ambientales a los que se enfrenta la humanidad en la actualidad.

La concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado significativamente en las últimas décadas debido a diferentes factores, pasando de alrededor de 280 partes por millón (ppm) en la época preindustrial a más de 400 ppm en la actualidad. Esto ha llevado a un aumento en la temperatura global, el derretimiento de glaciares y el aumento del nivel del mar (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2022).

Algunos de los factores principales que pueden aumentar los niveles de concentración de dióxido de carbono (CO₂):

- Actividades humanas: las principales fuentes antropogénicas de CO₂ incluyen la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural para la generación de energía, el transporte, la industria y la calefacción. Además, la deforestación y los cambios en el uso del suelo también pueden contribuir a un aumento en los niveles de CO₂ atmosférico.
- Emisiones industriales: las emisiones de las industrias, como la producción de cemento, acero y productos químicos, pueden liberar grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera.
- Quema de biomasa: la quema de biomasa, como la quema de bosques y la agricultura de tala y quema, puede liberar grandes cantidades de CO₂.

- **Procesos naturales:** los procesos naturales, como las erupciones volcánicas y la respiración de los organismos, también pueden liberar CO₂ a la atmósfera, aunque estas fuentes suelen ser equilibradas por los sumideros naturales de carbono, como los océanos y los bosques.
- **Aumento de la población y la actividad económica:** el crecimiento de la población y el aumento de la actividad económica conducen a un mayor consumo de energía y recursos, lo que a su vez se traduce en mayores emisiones de CO₂.

5.2 Análisis y diseño del ambiente web

En esta sección se presentan los resultados del análisis y diseño del ambiente web, dando a conocer sus requerimientos, diagramas de casos de uso, clases, actividades y diagrama de la arquitectura implementada.

5.2.1 Actores

5.2.1.1 Usuarios

Definición: son las personas o entidades que interactúan directamente con la aplicación para utilizar sus funcionalidades y visualizar resultados.

Responsabilidades: visualizar información, graficas, mapas de calor y generar un informe de los datos obtenidos.

5.2.1.2 Administrador

Definición: son responsables de la gestión y supervisión del sistema o la aplicación.

Responsabilidades: pueden realizar copias de seguridad, administrar la configuración del sistema, monitorear el rendimiento.

5.2.1.3 Software

Definición: el sistema principal el cual interactúa con la plataforma IoT Smart Campus para recibir información, visualizarla y generar reportes.

Responsabilidades: proporcionar funcionalidades, servicios y recursos.

5.2.1.4 Desarrolladores

Definición: son los profesionales encargados de diseñar, desarrollar y mantener el sistema o la aplicación.

Responsabilidades: crean el software, implementan las funcionalidades requeridas, solucionan problemas, realizan pruebas, mantienen la calidad del código y aseguran que el sistema cumpla con los requisitos.

5.2.2 *Requerimientos*

5.2.2.1 **Requerimientos funcionales**

A continuación, se detallan los requerimientos funcionales del aplicativo Diot UIS en el cual se pueden visualizar y analizar de forma gráfica los datos obtenidos por el prototipo IoT. Estos se encuentran compuestos por un identificador, nombre, descripción, requisito asociado y actores que aplican.

Tabla 2*Requerimientos funcionales del dispositivo y el software.*

ID	NOMBRE	DESCRIPCION	REQUEIMIENTO ASOCIADO	ACTOR
RFDU001	Consulta de estaciones	El sistema debe permitir a los usuarios consultar las estaciones asociadas a la plataforma de Smart Campus, así como los dispositivos vinculados a la misma.	El sistema debe proporcionar interfaces que le permita al usuario visualizar las estaciones y dispositivos registrados en la base de datos de la plataforma IoT.	Usuario
RFDU002	Monitoreo de la estación y sus dispositivos vinculados	El sistema debe se capaz de consultar los datos obtenidos por los dispositivos o sensores se la estación, así como	El sistema debe establecer una conexión con la base de datos de la plataforma IoT y consultar los datos	Software

		los atributos propios de la estación.	de la estaciones y dispositivos. Debe proporcionar una interfaz de usuario que muestre estos datos.	
RFDU003	Visualización de los datos obtenidos por la estación.	El sistema debe permitir a los usuarios acceder y visualizar datos de los dispositivos vinculados a la estación seleccionada en el aplicativo.	El sistema debe organizar los datos de los dispositivos IoT. Debe proporcionar una interfaz de usuario que permita a los usuarios visualizar los datos correspondientes.	Software Usuario
RFDU004	Construcción de graficas.	El sistema debe permitir a los usuarios visualizar los datos de los dispositivos	El sistema debe organizar los datos de los dispositivos IoT, para la construcción de una	Software Usuario

		<p>vinculados a la estación en formato de grafica de serie, permitiendo al usuario contrarrestar los datos contra el momento en que fueron tomados.</p>	<p>gráfica del dispositivo contra el tiempo.</p>	
RFDU005	<p>Representación geográfica de los datos.</p>	<p>El sistema debe permitir a los usuarios visualizar los datos de los dispositivos vinculados a la estación en un mapa de calor del área metropolitana de Bucaramanga.</p>	<p>El sistema debe organizar los datos de los dispositivos IoT, relacionándolos con la latitud y longitud en donde fueron tomados para la generación de la representación geográfica.</p>	<p>Software Usuario</p>

RFDU006	Generación de informe de los datos obtenidos.	El sistema debe permitir a los usuarios visualizar los datos de los dispositivos vinculados a la estación en una tabla la cual tenga el ID del sensor, el valor registrado, el momento en que fue registrado, así como su ubicación.	El sistema debe permitir visualizar y organizar los datos de los dispositivos IoT, así como la generación de un informe en formato CSV.	Software Usuario
----------------	---	--	---	-------------------------

Nota. La tabla representa los requerimientos funcionales para el desarrollo del aplicativo web.

5.2.2.2 Requerimientos no funcionales

A continuación, se detallan los requerimientos no funcionales del aplicativo Diot UIS. Estos se encuentran compuestos por un identificador, nombre, descripción, requisito asociado y actores que aplican.

Tabla 3

Requerimientos no funcionales del dispositivo y el software.

ID	NOMBRE	DESCRIPCION	REQUEIMIENT O ASOCIADO	ACTOR
RFNU001	Vista amigable	Las vistas del aplicativo Web deben evitar tonos brillantes o agresivos, que puedan incomodar al usuario.	El sistema debe implementar tonos con poca saturación.	Software
RFNU002	Efectividad	Las actividades que los usuarios puedan realizar deben mantener un óptimo funcionamiento.	El sistema debe mantenerse en correcto funcionamiento.	Software
RFNU003	Rendimiento	El sistema debe cargar y mostrar los datos en un tiempo	El sistema debe mantenerse óptimo para no	Software

		máximo de respuesta de 5 segundos.	sobrepasar el tiempo de respuesta de 5 segundos.	
RFNU004	Usabilidad	El sistema debe tener un diseño responsive que le permita adaptarse a los diferentes tamaños de los dispositivos usados por los usuarios.	El sistema debe adaptar el tamaño de sus vistas a los dispositivos de los usuarios	Software
RFNU005	Mantenibilidad	El código fuente de la aplicación debe seguir las convenciones de estilo y estar documentado adecuadamente para facilitar el	Se debe documentar adecuadamente el código fuente.	Software Equipo de desarrollo

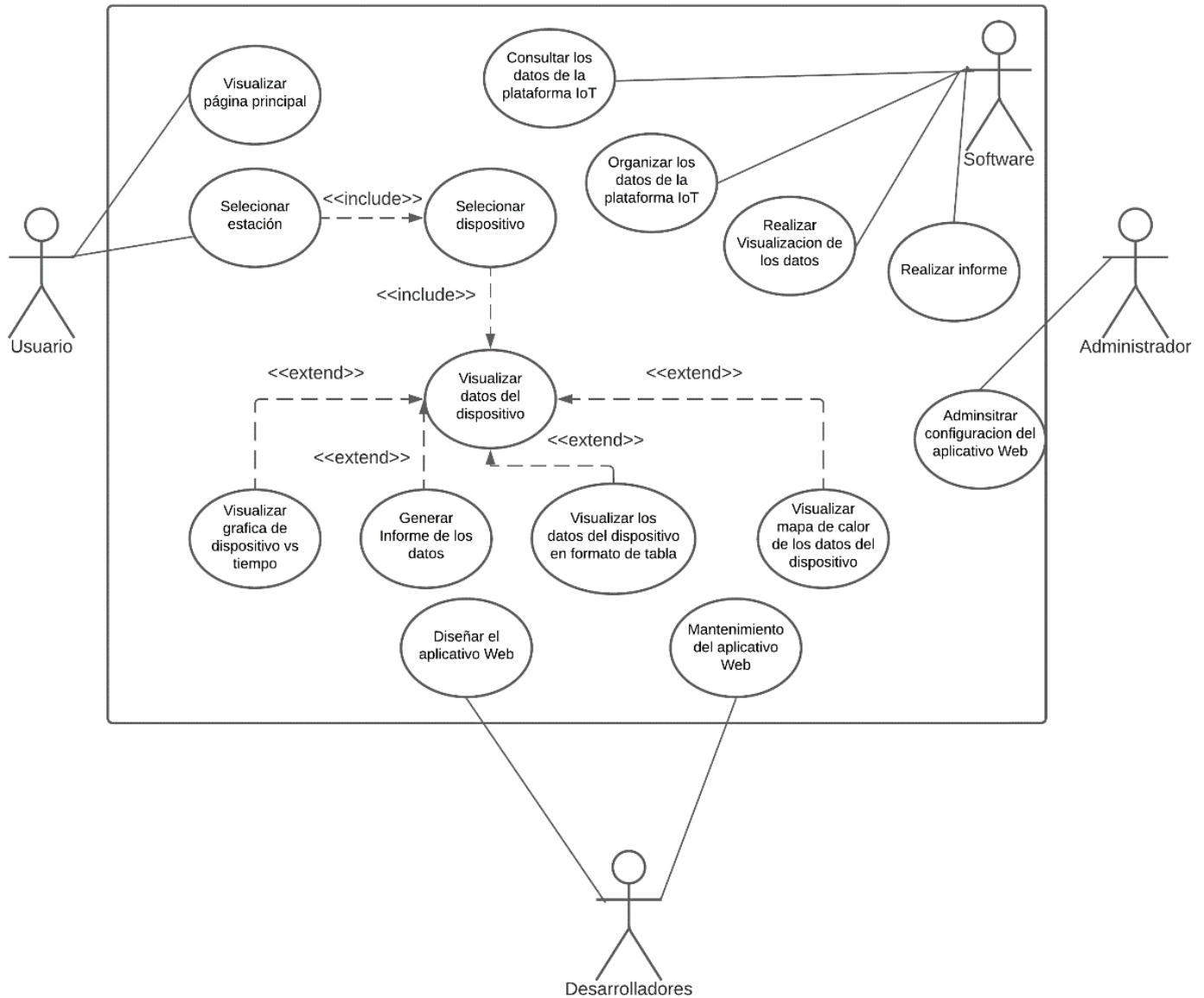
		mantenimiento futuro.		
RFNU006	Escalabilidad	El sistema debe permitir a los usuarios visualizar los datos de los dispositivos vinculados a la estación en una tabla la cual tenga el ID del sensor, el valor registrado, el momento en que fue registrado, así como su ubicación.	El sistema debe permitir visualizar y organizar los datos de los dispositivos IoT, así como la generación de un informe en formato csv.	Software Usuario

Nota. La tabla representa los requerimientos no funcionales para el desarrollo del aplicativo web.

5.2.3 Diagrama de casos de uso

Figura 5

Figura del diagrama de casos de uso.



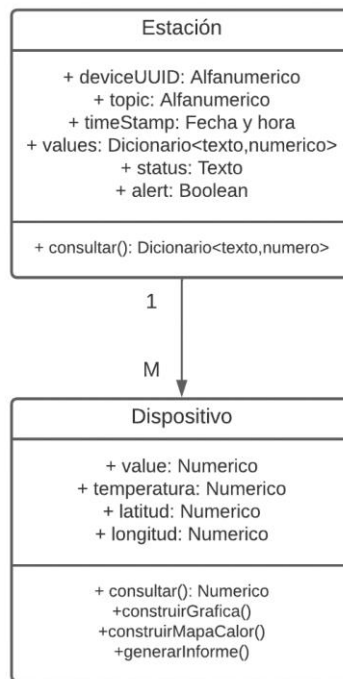
Nota. La figura representa el diagrama de casos de uso para el desarrollo del aplicativo web.

5.2.4 Diagrama de clases

Debido a que la base de datos es no SQL las clases mostradas, son representaciones abstractas de los diferentes elementos que interactúan en el sistema.

Figura 6

Figura del diagrama de clases.



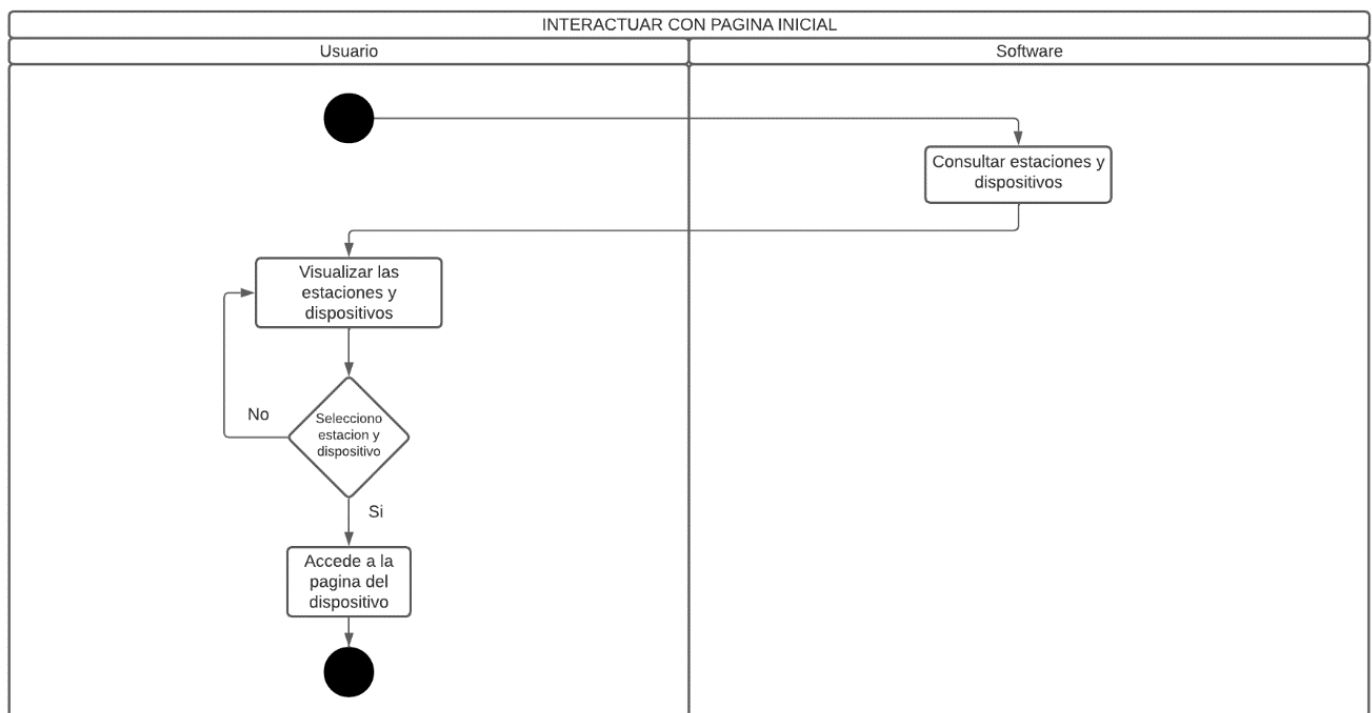
Nota. La figura representa el diagrama de clases para el desarrollo del aplicativo web.

5.2.5 Diagrama de actividades

5.2.5.1 Diagrama de actividades de interacción del usuario

Figura 7

Figura del diagrama de interacción del usuario.



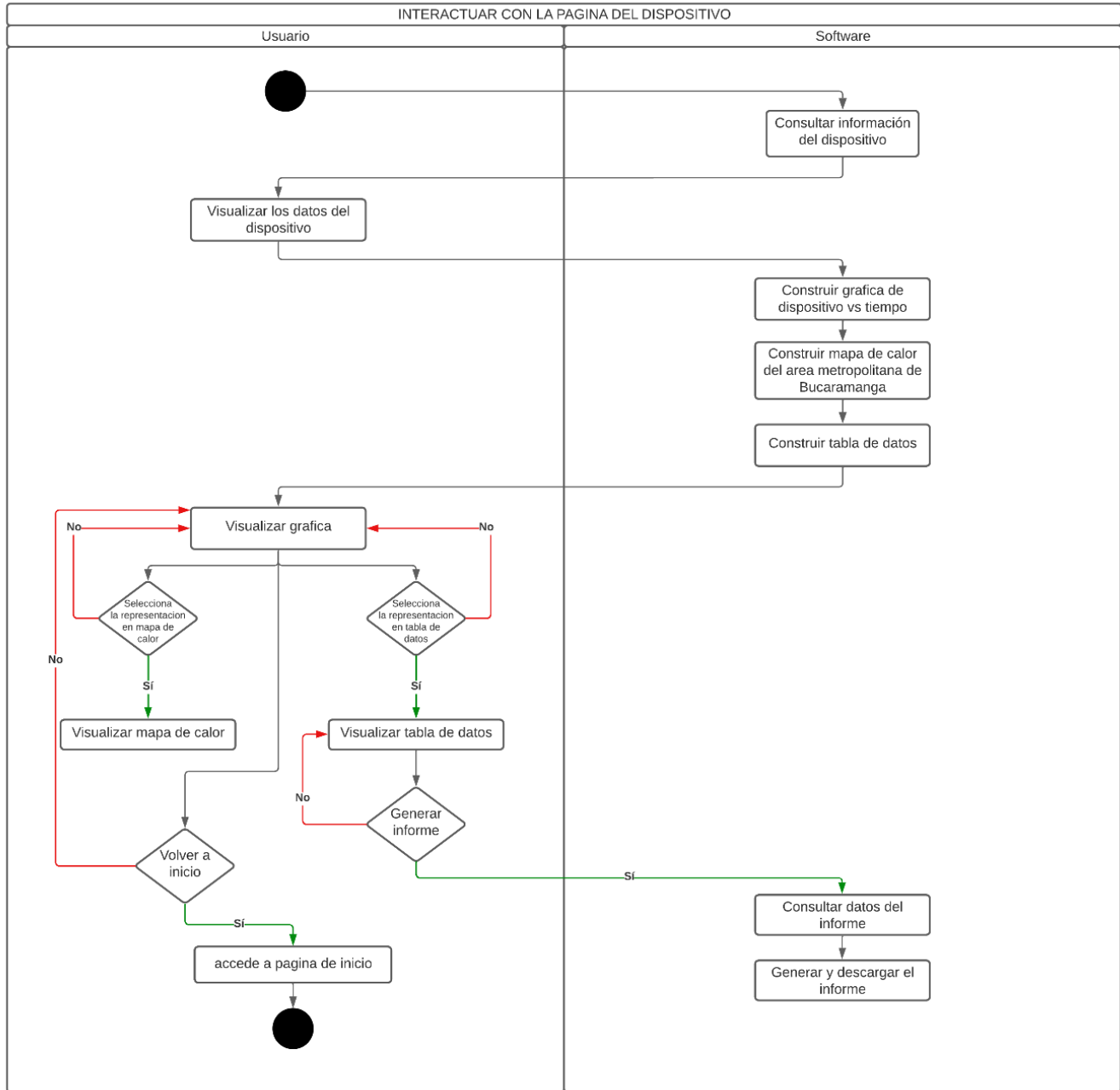
Nota. La figura representa el diagrama de actividades en la pantalla inicial del aplicativo web desde el rol de usuario.

Representación del diagrama de actividades para el correcto flujo en la pantalla principal. Una vez el usuario ingresa a la pantalla principal, el sistema consulta en la base de datos de la plataforma UIS las estaciones vinculadas y sus respectivos dispositivos, posteriormente en el menú lateral

5.2.5.2 Diagrama de actividades de interacción del dispositivo

Figura 8

Figura del diagrama de interacción del dispositivo.



Nota. La figura representa el diagrama de actividades en la pantalla de detalle del dispositivo seleccionado en el aplicativo web desde el rol de usuario.

Representación del diagrama de actividades para el correcto flujo en la pantalla del dispositivo. Una vez el usuario ingresa en la vista, el sistema consulta toda la información del dispositivo para posteriormente organizarla y construir las diferentes funcionalidades y gráficas, las cuales le permitirá al usuario visualizar los datos en diferentes formatos, como son grafica de serie, mapa de calor del área metropolitana de Bucaramanga y tabla de datos, donde esta última tiene la opción de generar un informe en formato CSV en el cual se muestran los datos.

6. Implementación del prototipo

6.1 Capacitación

En la realización del prototipo se realizó una introspección de cada uno de los conceptos comprendidos a lo largo del libro, presentando a fondo cada concepto estudiado a través de los diferentes medios gratuitos de información, recopilando información sobre los medios de comunicación, transferencia de datos y conexión de los diferentes medios IoT a implementar, afianzando los conocimientos sobre Docker y su función, además de la capacitación de cada uno de los implementos a usar, estudio del comportamiento de los gases y las dificultades que se puedan presentar en la creación de una estación urbana de medición de gases en cada uno de los medios de transporte público.

6.2 Análisis y definición de la arquitectura

La arquitectura propuesta para el prototipo se centra en establecer una comunicación eficiente entre los dispositivos y el servidor, garantizando una transmisión de datos fluida y confiable. Esta arquitectura se divide en dos componentes principales: el dispositivo de recolección de datos y el sistema de información en la página web.

En cuanto al dispositivo de recolección de datos, se implementarán los sensores necesarios en los medios de transporte para recopilar la información relevante. Estos dispositivos estarán encargados de capturar y enviar los datos al servidor de manera periódica. Se establecerá una comunicación estable utilizando tecnologías como Wi-Fi o Bluetooth, y se empleará el protocolo MQTT para enviar los datos al servidor de forma eficiente.

Por otro lado, el sistema de información en la página web permitirá la visualización y gestión de los datos recolectados. Los datos recibidos por el servidor serán almacenados en una

base de datos para su posterior consulta y análisis. La página web proporcionará una interfaz intuitiva que permitirá al usuario acceder a la información de manera clara y organizada. Se implementarán gráficos, tablas y otras herramientas visuales para presentar los datos de forma comprensible y fácil de interpretar.

En resumen, la arquitectura propuesta busca establecer una comunicación efectiva entre los dispositivos de recolección de datos y el sistema de información en la página web, permitiendo una recopilación de datos eficiente y una presentación clara de la información al usuario final.

6.2.1 Comparación módulos Wifi/Bluetooth

Se realiza una comparación entre diferentes módulos de Arduino con comunicación Wifi para la creación de este prototipo, encontrando una simplificación de cada una de sus características de las cuales se decidió elegir el ESP32 como nuestro modulo Wifi siendo el cerebro que coordina el envío de información de cada uno de los dispositivos presentes en el prototipo.

Tabla 4

Comparación de los módulos de Arduino.

	ESP8266	ESP32	ESP32-S2	ESP32-S3	ESP32-C3	ESP32-C6
Fecha creación	2014, Agosto	2016, Septiembre	2019, Septiembre	2020, Diciembre	2020, Noviembre	2021, Abril
Procesador	Tensilica L106 32-bit (up to 160MHz)	Tensilica Xtensa 32-bit LX6 (up to 240MHz) (optionally dual core)	Xtensa 32-bit LX7 (up to 240MHz)	Tensilica Xtensa 32-bit LX7 dual core (up to 240MHz)	RISC-V 32-bit (up to 160MHz)	RISC-V 32-bit (up to 160MHz)

				to 240MHz)		
SRAM	160KB	520KB	320KB	512KB	400KB	400KB
ROM	0	448KB	128KB	384KB	384KB	384KB
JTAG	NO	SI	SI	?	SI	SI
Cache	32KB	64KB	8/16KB	?	16KB	?
Wifi	Wi-Fi 4 (only up to 72.2Mbps)	Wi-Fi 4	Wi-Fi 4	Wi-Fi 4	Wi-Fi 4	Wi-Fi 6
Bluetooth	NO	BLE 4.2 (upgrade to 5.0, with limitations)	NO	BLE 5.0	BLE 5.0	BLE 5.0
Ethernet	NO	SI	NO	?	NO	?
RTC memory	768B	16KB	16KB	16KB	8KB	?
PMU	SI	SI	SI	?	SI	?
ULP coprocesador	NO	SI	ULP-RISC-V	?	NO	?
Acelearador criptografico	NO	SHA, RSA, AES, RNG	SHA, RSA, AES, RNG, HMAC, Digital Signature	SHA, RSA, AES, RNG, HMAC, Digital Signature	SHA, RSA, AES, RNG, HMAC, Digital Signature	SHA, RSA, AES, RNG, HMAC, Digital Signature
Arranque seguro	NO	SI	SI	SI	SI	SI
Cifrado Flash	NO	SI	XTS-AES-128/256	SI	XTS-AES-128	TS-AES-128
SPI	2	4	4	?	3	?
I2C	1	2	2	?	1	?
I2S	1	2	1	?	1	?
UART	2 (one TX only)	3	2	?	2	?
Host SDIO	0	1	0	2	0	0

SDIO esclavo	0	1	0	0	0	0
GPIO	17	34	43	44	22	22
PWM led	5	16	8	?	6	?
MCPWM	0	6	0	2	0	0
Contador de pulso	0	8	4	?	0	NO
GDMA	0	0	0	?	6	?
USB	NO	NO	USB OTG 1.1	?	Serial/JTAG	?
TWAI	0	1	1	?	1	?
ADC	1x 10-bit SAR	2x 12-bit SAR, up to 18 channels	2x 13-bit SAR, up to 20 channels	?	2x 12-bit SAR, up to 6 channels	?
DAC	NO	2x 8-bit	2x 8-bit	?	NO	NO
RMT	1x transmission + 1x reception	8x transmission/reception	4x transmission/reception	?	2x transmission + 2x reception	?
Temporizador	2x 23-bit	4x 64-bit	4x 64-bit	?	2x 54-bit + 1x 52-bit	?
Sensor de temperatura	SI	SI	SI	?	SI	?
Hall sensor	NO	SI	NO	?	NO	?
Touch sensor	0	10	14	?	NO	?

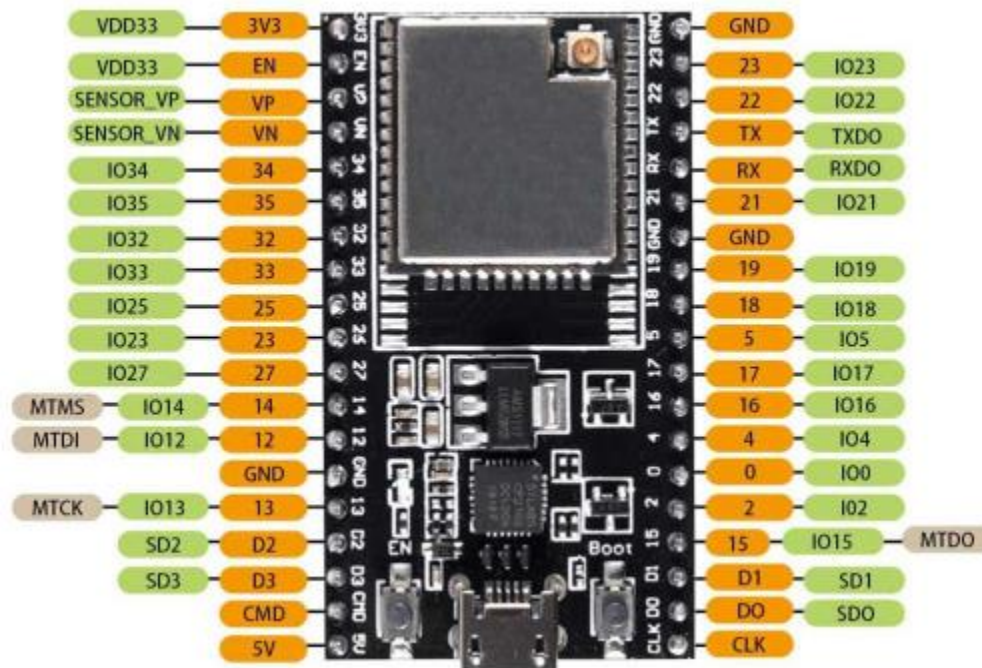
Nota. La tabla representa la comparación de características de diferentes módulos de Arduino.

El cual cuenta con diferentes pines digitales y tres pares de análogos, permitiendo convertir las señales análogas de los sensores conectados a este e interpretarlos a digital, con las especificaciones.

- Procesador Tensilica Xtensa 32bits LX6 hasta 240MHz.
- Wi-Fi: 802.11b/g/n/e/i (802.11n @ 2.4 Ghz hasta 150 Mbit/s).
- Bluetooth: v4.2 BR/EDR y bluetooth Low Energy (BLE).
- Rom:448 KiB.
- SRAM: 520 KiB.
- RTC slow SRAM: 8 KiB.
- RTC fast SRAM: 8 KiB.
- eFuse: 1 Kbit.
- Flash embebida: 0 MiB (ESP32-D0WDQ6, ESP32-D0WD, and ESP32-S0WD chips); 2 MiB (ESP32-D2WD chip); 4 MiB (ESP32-PICO-D4 SIP module).
- Periféricos compatibles: ADC, DAC, I2C, UART, Interfaz CAN 2.0, SPI, I2S, RMII y PWM entre otros.
- Seguridad tipo IEEE 802.11, WFA, WPA/WPA2 y WAPI.
- Encriptación de memoria Flash.
- Criptografía soportada por acelerador de hardware: AES, SHA-2, RSA, ECC, RNG.
- Voltaje de trabajo 3.3VDC.
- Energía y datos via conector microUSB 5VDC.

Figura 9

Figura del diagrama de un ESP32.



Nota. La figura representa el esquema del módulo ESP32 y sus diferentes conexiones.

Recuperado: (Ja-Bots, 2023)

6.2.2 Comparación de sensores

Para la medición de gases, se realiza una selección basada en la practicidad y economía, optando por un único sensor para obtener los datos en cada ruta de transporte. En este caso, se elige medir uno de los gases más comunes en el ambiente: el dióxido de carbono (CO₂). La selección del sensor se realiza de manera conveniente, ya que se busca un sensor de CO₂ que permita obtener datos precisos del ambiente. El modelo elegido es el MZ-H19B, el cual proporciona una lectura digital en partes por millón (ppm) de CO₂ presente en el aire.

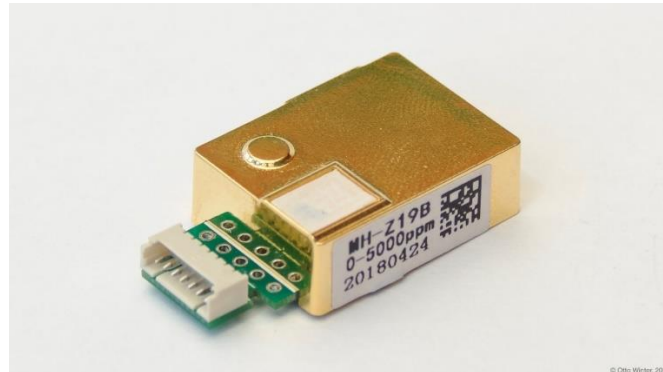
Este sensor utiliza el principio de medición por infrarrojo u óptica, que es más preciso que la medición por sensores electroquímicos. El proceso de medición se basa en el uso de un pulso

de luz de banda ancha, y a través de la intensidad relativa de la onda, el sensor determina la presencia y concentración del gas, en este caso, el CO₂, en el ambiente.

El uso de este sensor permite obtener mediciones confiables y precisas de la concentración de CO₂ en el aire.

Figura 10

Figura de un sensor MZ-H19B.



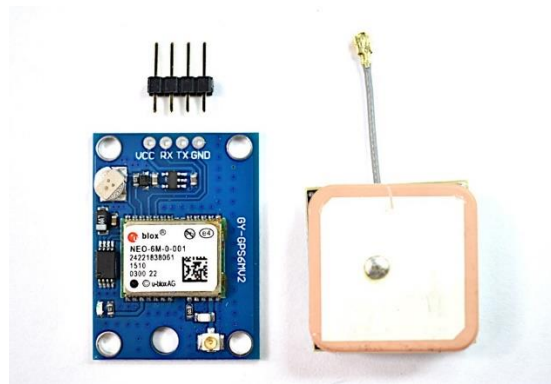
Nota. La figura representa el sensor MZ-H19B. *Recuperado:* (Esphome, 2020)

Para la ubicación geográfica, se decide utilizar el módulo NEO-6M, el cual permite obtener la ubicación del dispositivo a través de señales satelitales. Este módulo se selecciona debido a su practicidad y economía en la implementación. Tiene un tamaño reducido y es fácil de utilizar. El margen de error de este módulo es de aproximadamente 3 metros. Cuenta con una antena que, al conectarse con el satélite más cercano, emite pulsos digitales para determinar la ubicación del dispositivo de manera precisa. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este sensor puede

verse afectado por condiciones climáticas nubladas o por obstáculos físicos como el hormigón o la presencia de otras antenas, los cuales pueden interferir en sus lecturas.

Figura 11

Figura de un sensor NEO-6M.

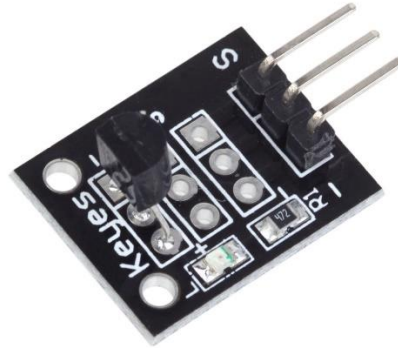


Nota. La figura representa el sensor NEO-6M. *Recuperado:* (Shopee, 2023)

Por último, se decide implementar el sensor DS18B20 para medir la temperatura ambiente y analizar su influencia en el comportamiento del gas. Este sensor es pequeño, económico y ampliamente utilizado debido a su sencilla implementación. Cuenta con un rango de medición de -55°C a 125°C , un solo bus de salida, un LED y una resistencia.

Figura 12

Figura de un sensor DS18B20.



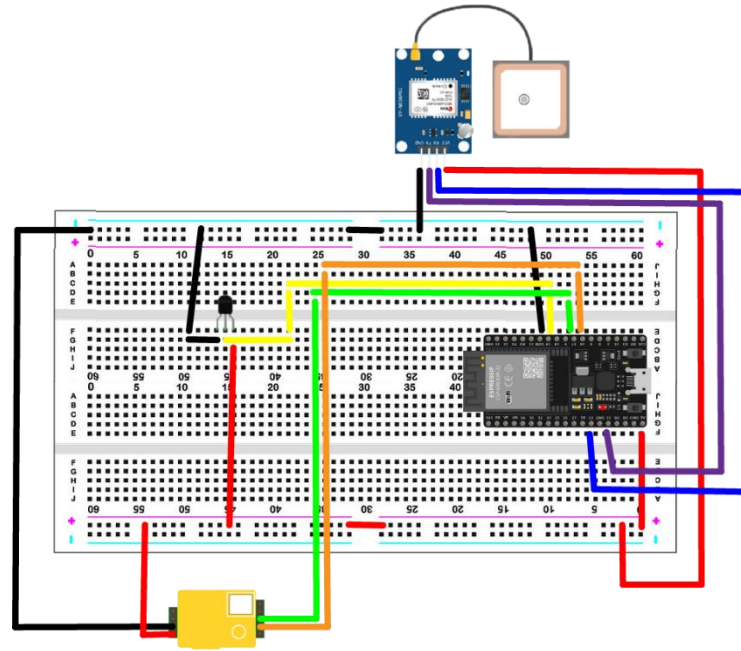
Nota. La figura representa el sensor DS18B20. *Recuperado* (Mactronica, 2023)

6.3 Montaje del prototipo

Teniendo en cuenta los manuales de los fabricantes y la información adquirida de diferentes fuentes, se realiza el montaje del prototipo con precaución, cuidando los niveles de voltaje recomendados para cada dispositivo. Se construye una estructura física que permite la obtención de datos de medición del aire y la ubicación de los medios de transporte público en Bucaramanga. El sistema de medición de calidad del aire se presenta de forma práctica y compacta.

Figura 13

Figura de la construcción del prototipo.



Nota. La figura representa el esquema diseñado para el desarrollo del prototipo.

A la hora de realizar la programación de los dispositivos se implementó con ayuda del IDE Arduino, consultando los manuales para la configuración que permitirían el control de cada uno de los sensores presentes en el modelo, para así obtener su mayor potencial, usando C++ como lenguaje principal en su programación se obtiene el código presente en el GitHub (https://github.com/srparks19/prototipo_IoT_Uis.git).

6.4 Funcionamiento

El programa implementa las bibliotecas adecuadas para cada sensor y se encarga de establecer la conexión con el bróker MQTT para enviar la información recopilada. Se definen los pines de entrada de datos y se establece el tiempo de refresco necesario para la correcta recolección de datos de cada sensor. Además, se realiza la conexión a la red WiFi y se ejecutan las funciones necesarias para el funcionamiento de cada sensor.

Figura 14

Figura del fragmento de código de la programación del ESP32.

```
int co2 = 0;
char datoCmd = 0;
long lastMsg = 0;
char msg[50];
int value = 0;
float temperatura = 0.0;
float latitude = 0.0;
float longitude = 0.0;

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS); // Baudios de inicialización
DallasTemperature sensors(&oneWire); // Inicio de sensor de temperatura

// Conexion del mqtt
const char* mqtt_server = "127.0.0.1";
const char* mqtt_server1 = "0.0.0.0";
const char* mqtt_server2 = "172.17.0.2";
const char* mqtt_server3 = "192.168.1.8";
const char* mqtt_server4 = "192.168.1.16";
const char* mqtt_server5 = "192.168.43.99";

WiFiClient espClient;
ESP32Time rtc;
PubSubClient client(espClient);

void setup() {
  Serial.begin(9600); //inicializamos la comunicación
  mySerial.begin(MH219B_BAUDRATE, SERIAL_8N1, 16, 17); // Inicializa el puerto serie para el sensor de CO2
  gpsSerial.begin(GPS_BAUDRATE, SERIAL_8N1, 13, 12); // Inicializa el puerto serie para el módulo GPS NEO-M6 (pines GPIO13 y GPIO12)
  sensors.begin(); //Inicio del sensor de temperatura
  rtc.setTime(0, 0, 0, 27, 5, 2023); //Inicio del tiempo del esp32
  setup_wifi();
  client.setServer(mqtt_server5, 1883);
  client.setCallback(callback);
}

void setup_wifi() {
  delay(10);
  // We start by connecting to a WiFi network
  Serial.println();
  Serial.print("Connecting to ");
  Serial.println(ssid3);

  WiFi.begin(ssid3, password3);
```

Nota. La figura representa un fragmento de código utilizado para el desarrollo del prototipo.

6.5 Descripción del formato de envío de datos.

Se implementó el formato JSON como envío de información a la base de datos dadas las características de este, siendo un formato ligero a la hora de conducir la información hasta su destino.

Figura 15

Figura de la estructura JSON.

```
1  {
2    "deviceUUID": "1",
3    "topic": "estacion1",
4    "timeStamp": "28-5-2023 16:32:21",
5    "values": {
6      "CO2": 1335,
7      "temperatura": 25.1875,
8      "latitude": 7.130603313,
9      "longitudo": -73.11505127
10   },
11   "status": "OK",
12   "alert": false
13 }
```

Nota. La figura representa la salida del servicio utilizado para consultar los datos obtenidos en formato JSON.

Este formato presenta algunos atributos que son necesarios para el correcto funcionamiento del aplicativo el cual será expuesto en secciones posteriores, esto con el fin de obtener de forma correcta los datos y así realizar su correcta interpretación.

deviceUUID: permite identificar de forma única el dispositivo que obtuvo la lectura

topic: identifica la estación en la que se encuentra el dispositivo, esto con el fin de filtrar la información de forma sencilla.

timeStamp: representa el tiempo en el que ocurre la medición dando de forma detallada en formato dd-mm-yyyy hh:MM:ss.

values: contiene la información que se desea almacenar en este topic, es el encargado de encapsular la lista de valores registrados por cada uno de los sensores presentes en el dispositivo, en esta ocasión serían las lecturas de CO₂, temperatura, latitud y longitud.

status: especifica el estatus en el que se encuentra el dispositivo, donde si todo funciona correctamente este lanzará un mensaje de OK

Alert: representado por un valor booleano que permite identificar cuando recurrir a lanzar una advertencia sobre la contaminación del aire, esto teniendo en cuenta los valores mencionados en secciones anteriores.

6.6 Creación del aplicativo

Se decidió desarrollar una página web como medio de visualización de los datos recopilados por el prototipo. Esta página web ofrece a los usuarios diversas formas de presentación y lectura de la información, lo que facilita su comprensión y clasificación.

6.6.1 Arquitectura del aplicativo

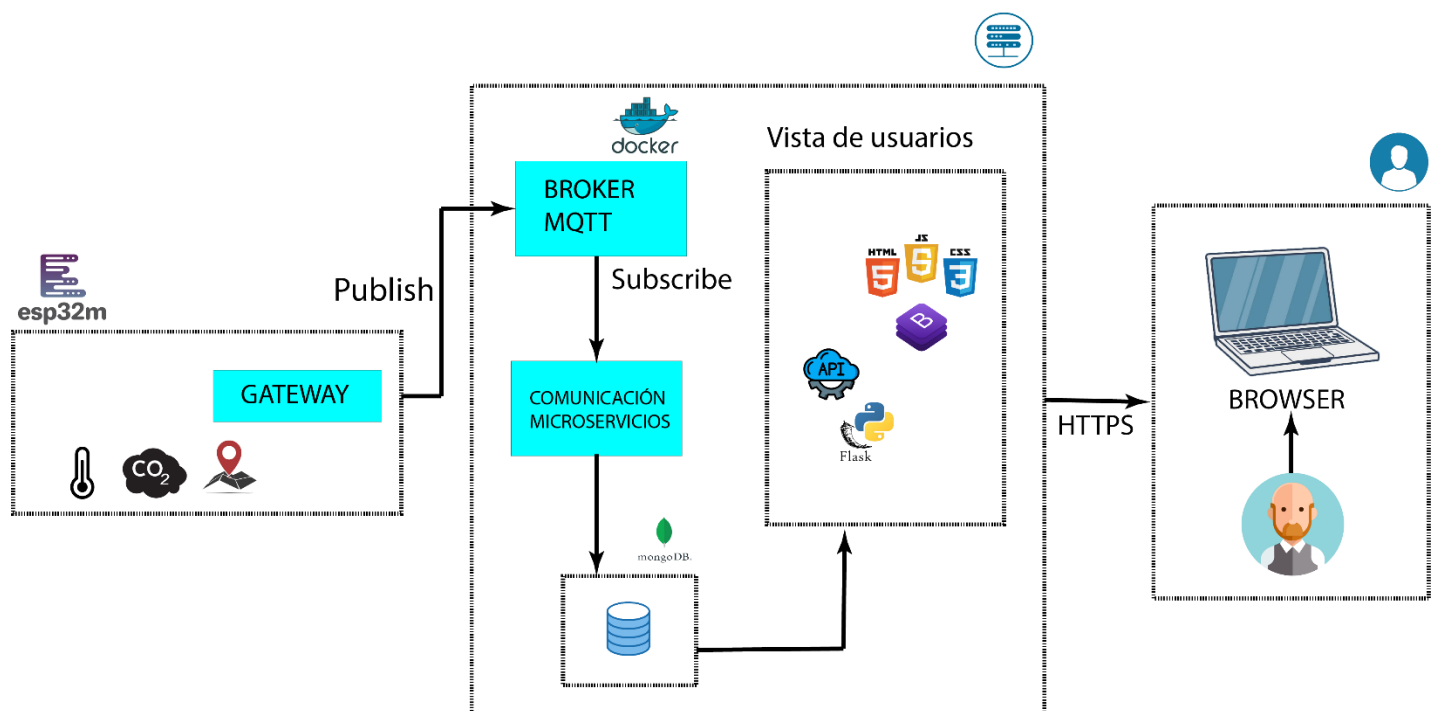
En el diseño del prototipo se construyó una arquitectura de software capaz de alcanzar los objetivos planteados en secciones anteriores, este proceso se fue modificando y complementando a medida que la construcción del aplicativo avanzaba obteniendo la versión del prototipo actual que cubre las necesidades planteadas. La arquitectura cuenta de dos componentes principales.

El Hardware: ubicación de cada uno de los sensores y el Gateway (ESP32).

El software: donde se almacena, recopila y visualiza la información. El código fuente se puede encontrar en el GitHub: https://github.com/srparks19/dashboard_iot_uis.git

Figura 16

Figura de la arquitectura del aplicativo.



Nota. La figura representa el esquema completo de la arquitectura implementada para el desarrollo del proyecto.

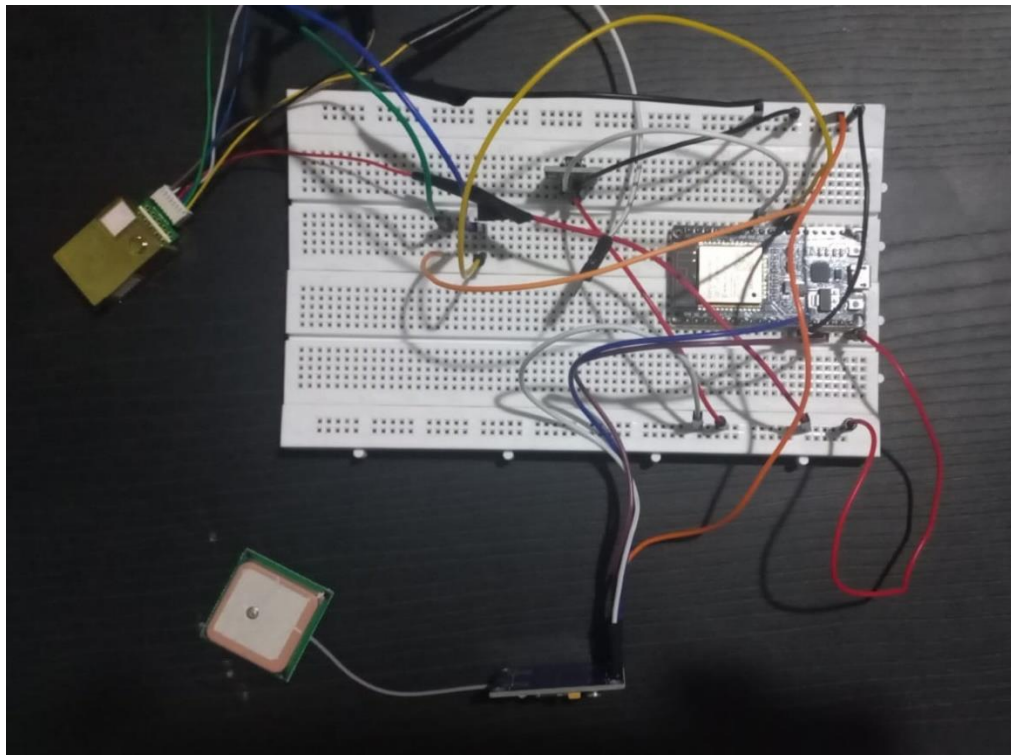
6.6.1.1 Hardware

El hardware utilizado en el proyecto consta de dos componentes principales para la recopilación y envío de datos a la base de datos a través del Broker MQTT. El primero es el

Gateway, que consiste en el dispositivo ESP32. Este dispositivo se encarga de recopilar los datos de los sensores presentes en cada estación, formatear la información y enviarla a la base de datos a través de la comunicación MQTT, utilizando la conexión WiFi. Los sensores incluidos en el prototipo son el sensor de temperatura, el dispositivo GPS y medidor de CO2. Estos sensores proporcionan los datos para su evaluación y análisis.

Figura 17

Figura de la conexión del prototipo real.



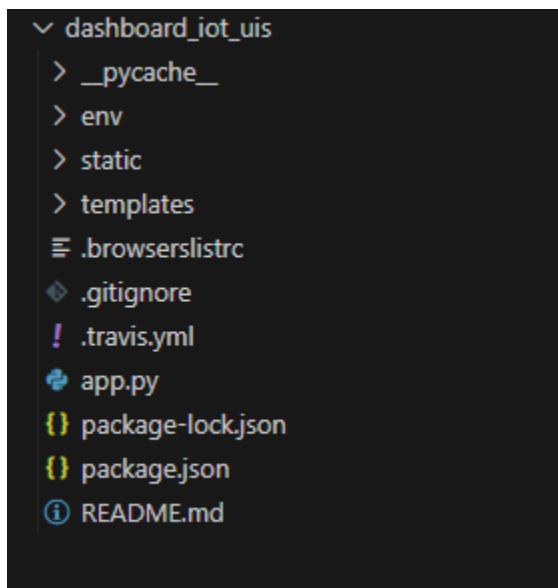
Nota. La figura representa una foto real del prototipo desarrollado.

6.6.1.2 Software

El software desarrollado para el estudio y transformación de datos se divide en dos componentes principales. El primero es responsable del renderizado y la comunicación con la base de datos MongoDB, mientras que el segundo se encarga de la parte visual del sistema. Para lograr un funcionamiento adecuado, se utiliza la distribución de trabajo proporcionada por el Framework Flask. Esto permite una adecuada organización y estructura del software, facilitando su mantenimiento y escalabilidad.

Figura 18

Figura de la estructura de archivos del proyecto.



Nota. La figura representa la estructura de archivos del aplicativo web.

6.6.2 Framework para la gestión de datos y renderizado del aplicativo

Para la comunicación con la base de datos y el renderizado del componente visual, se implementó Flask, un framework de Python, que proporciona un entorno virtual para la gestión de la página web. Esto permite crear puntos de comunicación que obtienen los datos almacenados en la base de datos MongoDB y manipulan las diferentes rutas del aplicativo para facilitar la navegación del usuario entre páginas.

Figura 19

Figura de un fragmento de código del componente encargado de la gestión de datos y el renderizado.

```
from flask import Flask, render_template, Response
import csv
import io
from pymongo import MongoClient

app = Flask(__name__)

client = MongoClient('mongodb://localhost:27017/')
db = client['lot']
collection = db['messages']
# Realiza la consulta a la base de datos
pipeline = [
    {"$group": {"_id": "$topic", "values": {"$push": {"$objectToArray": "$values"}}}}
]
result = list(collection.aggregate(pipeline))
topics_values = [{"topic['_id']: [value['k'] for value in topic['values']] for topic in result}

@app.route('/')
def index():
    return render_template("index.html", topics_values=topics_values)

@app.route('/sensor/<estacion/><dispositivo>')
def sensor(estacion,dispositivo):
    # Realizar la consulta a la base de datos para obtener los documentos del tema (topic) específico
    documentos = collection.find({'topic': estacion})

    # Crear una lista para almacenar los pares de timeStamp y values
    lista_time = []
    lista_value = []
    lista_resultados = []
    data_mapa = []

    # Iterar sobre los documentos y extraer los pares de timeStamp y values
    for documento in documentos:
        timeStamp = documento['timeStamp']
        values = documento['values'][dispositivo]
        temperatura = documento['values']['temperatura']
        deviceUUID = documento['deviceUUID']
        latitud = documento['values']['latitude']
        longitud = documento['values']['longitude']
        lista_time.append(timeStamp)
        lista_value.append(values)
        lista_resultados.append({'timeStamp': timeStamp, 'values': values, 'deviceUUID':deviceUUID, 'latitude':latitud, 'longitude':longitud, 'temperatura':temperatura})
        data_mapa.append({'lon': longitud, 'lat': latitud, 'value':values})
```

Nota. La figura representa un fragmento del código del componente de comunicación entre la base de datos y la interfaz de usuario del aplicativo web.

6.6.3 Componente visual del aplicativo

La estructura de la página web se implementó utilizando HTML, CSS y JavaScript, lo que proporciona un modelo inicial para el aplicativo. Además, se utilizó el framework Bootstrap para mejorar el diseño y la funcionalidad, haciendo la interfaz más atractiva para los usuarios.

Para la creación del mapa que muestra las ubicaciones obtenidas por el módulo de GPS, se utilizó la biblioteca de código abierto OpenLayers. Esta herramienta gratuita y versátil permite la creación de mapas de manera eficiente y personalizable.

Figura 20

Figura de un fragmento de código del componente visual.

```
{% extends 'index.html' %}
{% block content %}
{{ super() }}
<!-- Page Heading -->
<div class="d-sm-flex align-items-center justify-content-between mb-4">
  <h1 class="h3 mb-0 text-gray-600">Dashboard</h1><br>
</div>

<!-- Content Row -->
<div class="row">

  <!-- CARD OXIGENO -->
  <div class="col-xl-3 col-md-6 mb-4">
    <div class="card border-left-info shadow h-100 py-2 bg-dark">
      <div class="card-body bg-dark">
        <div class="row no-gutters align-items-center">
          <div class="col m-2">
            <div class="row no-gutters align-items-center">
              <div class="col m-2">
                <div class="text-xs font-weight-bold text-white text-uppercase mb-1">Estación: - {{ estacion }}</div>
              </div>
              <div class="col m-2">
                <div class="text-xs font-weight-bold text-white text-uppercase mb-1">Dispositivo: - {{ dispositivo }}</div>
              </div>
            </div>
          </div>
          <div class="col-auto">
            <i class="fas fa-solid fa-wind fa-2x text-white"></i>
          </div>
        </div>
      </div>
    </div>

  <!-- CARD GAS -->
  <div class="col-xl-3 col-md-6 mb-4">
    <div class="card border-left-danger shadow h-100 py-2 bg-dark">
      <div class="card-body bg-dark">
        <div class="row no-gutters align-items-center">
          <div class="col m-2">
            <div class="text-xs font-weight-bold text-white text-uppercase mb-1">{{ dispositivo }}</div>
          </div>
          <div class="row no-gutters align-items-center">
            <div class="col-auto">
              <div class="h5 mb-0 m-3 font-weight-bold text-white">{{ maximoNivel }} ppm</div>
            </div>
          </div>
        </div>
      </div>
    </div>
  </div>
</div>
```

Nota. La figura representa un fragmento de código del componente visual del aplicativo web.

6.7 Vista del aplicativo

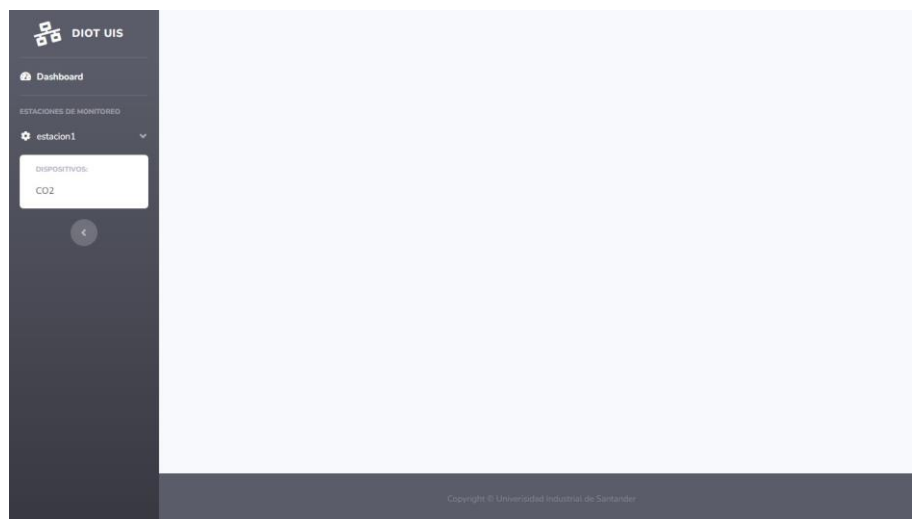
Luego de diseñar, definir y estructurar los requerimientos del sistema se realizó el prototipo el cual se exhibirá a todo público del sistema de información, a continuación, se visualizará cada módulo que compone el prototipo.

6.7.1 Dashboard

La pantalla inicial del aplicativo muestra una vista de todas las estaciones disponibles. Desde esta pantalla, se puede seleccionar la estación deseada y acceder a una vista que muestra los dispositivos asociados a dicha estación.

Figura 21

Figura del dashboard del aplicativo.



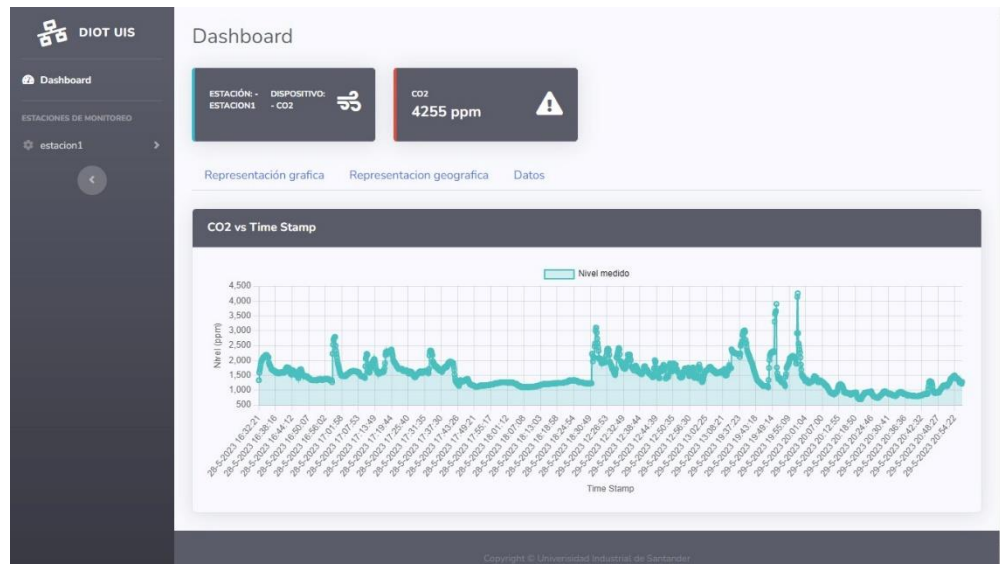
Nota. La figura representa la vista de la pantalla inicial del aplicativo web.

6.7.2 Estaciones y dispositivos

Al desglosar cada estación, se muestran los dispositivos asociados a ella. Al seleccionar uno de estos dispositivos, se accede a una vista que presenta información relevante obtenida por el sensor. Esta información incluye datos de interés relacionados con la toma de muestras del sensor, como valores de temperatura, humedad, presión o cualquier otro parámetro medido por el dispositivo.

Figura 22

Figura del sistema de estaciones y dispositivos.



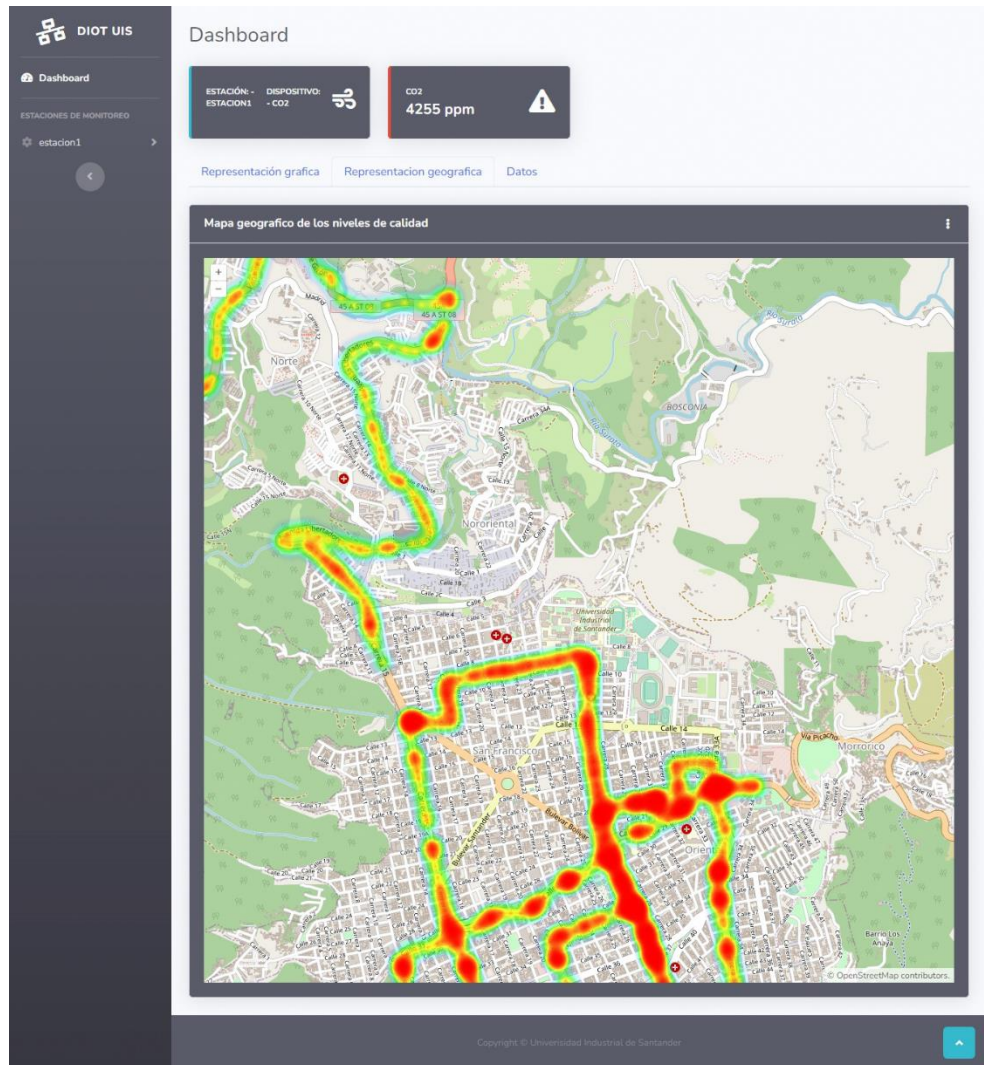
Nota. La figura representa la vista de la pantalla de representación gráfica del aplicativo web.

6.7.3 Visión geosatelital

Cada uno de los dispositivos cuenta con una lectura geolocalizada de los datos, el momento en el cual fueron captados por el sensor y plasmados en un mapa de densidad, el cual permite obtener un detalle cualitativo de cada lectura.

Figura 23

Figura del sistema de geolocalización generado.



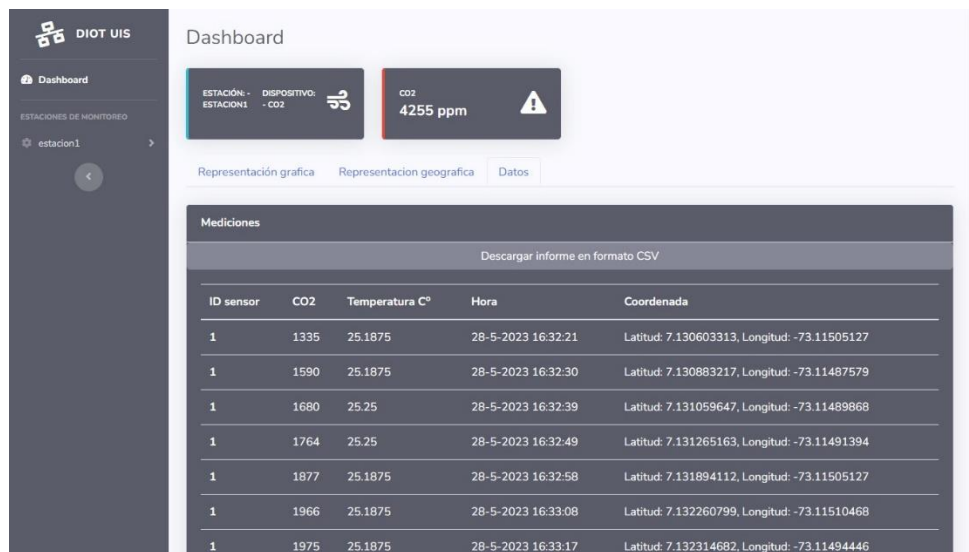
Nota. La figura representa la vista de la pantalla de representación geográfica del aplicativo web.

6.7.4 Tabulación de datos

En este apartado el usuario podrá obtener la información de cada una de las lecturas obtenidas por la estación donde se otorga la libertad de obtener una lectura de ellos y descarga del banco de datos en formato CSV.

Figura 24

Figura del sistema de tabulación y descarga de datos.



The screenshot shows a web dashboard for 'DIOT UIS'. The main content area is titled 'Dashboard' and displays a CO2 reading of 4255 ppm with a warning icon. Below this, there are tabs for 'Representación grafica', 'Representación geografica', and 'Datos'. The 'Datos' tab is active, showing a table of measurements. The table has columns for 'ID sensor', 'CO2', 'Temperatura C°', 'Hora', and 'Coordenada'. A link to 'Descargar informe en formato CSV' is located above the table.

ID sensor	CO2	Temperatura C°	Hora	Coordenada
1	1335	25.1875	28-5-2023 16:32:21	Latitud: 7.130603313, Longitud: -73.11505127
1	1590	25.1875	28-5-2023 16:32:30	Latitud: 7.130883217, Longitud: -73.11487579
1	1680	25.25	28-5-2023 16:32:39	Latitud: 7.131059647, Longitud: -73.11489868
1	1764	25.25	28-5-2023 16:32:49	Latitud: 7.131265163, Longitud: -73.11491394
1	1877	25.1875	28-5-2023 16:32:58	Latitud: 7.131894112, Longitud: -73.11505127
1	1966	25.1875	28-5-2023 16:33:08	Latitud: 7.132260799, Longitud: -73.11510468
1	1975	25.1875	28-5-2023 16:33:17	Latitud: 7.132314682, Longitud: -73.11494446

Nota. La figura representa la vista de la pantalla de representación en tabla de datos del aplicativo web.

6.8 Pruebas unitarias

A continuación, se presenta tablas, con las pruebas unitarias realizadas en el sistema Web, con el fin de validar el correcto funcionamiento del mismo.

Tabla 5*Pruebas de funcionalidad de la página inicial.*

ID	USUARIO	SOFTWARE	DATOS	REVISAR
PU001	-	Mostrar las estaciones vinculadas a la plataforma IoT	Lista de nombres de las estaciones	Las estaciones mostradas, corresponden a las vinculadas a la plataforma
PU002	-	Mostrar los dispositivos vinculados a las estaciones presentadas anteriormente	Lista de nombres de los dispositivos	Los dispositivos mostrados, corresponden a los vinculados a las estaciones
PU003	Seleccionar la estación y el dispositivo	Redirigir a la página del dispositivo	Nombre de la estación y del dispositivo	Debe enviar correctamente los nombres de la estación el

				dispositivo seleccionado
--	--	--	--	-----------------------------

Tabla 6

Pruebas de funcionalidad de la página del dispositivo.

ID	USUARIO	SOFTWARE	DATOS	REVISAR
PU004	-	Mostrar los datos de la estación y el dispositivo seleccionado	Lista de datos tomados por el sensor, así como también la temperatura, el timeStamp, la latitud, la longitud, el id del dispositivo, el nombre del dispositivo y el de la estación.	Se deben visualizar correctamente los datos

PU005	<p>Seleccionar el formato de visualización de los datos</p>	<p>Mostrar en pestañas las diferentes opciones de visualización, así como el formato de grafica de serie por defecto.</p>	<p>Lista de datos tomados por el sensor, así como también la temperatura, el timeStamp, la latitud, la longitud, el id del dispositivo, el nombre del dispositivo y el de la estación.</p>	<p>Se deben visualizar correctamente las opciones de visualización, así como también, se debe mostrar por defecto la gráfica de serie que contrarresta los datos del sensor contra el tiempo.</p>
PU006	<p>Seleccionar la visualización en mapa de calor</p>	<p>Mostrar el mapa de calor del área metropolitana de Bucaramanga</p>	<p>Datos del dispositivo, así como la coordenada donde fue</p>	<p>Debe mostrar correctamente el mapa de calor del área</p>

		construido en base a los datos obtenidos por los dispositivos.	tomado expresada en latitud y longitud.	metropolitana de Bucaramanga.
PU007	Seleccionar la visualización en tabla de los datos	Mostrar en formato tabla los datos de ID del sensor, datos del sensor, timeStamp, latitud, longitud y temperatura.	ID del sensor, datos del sensor, timeStamp, latitud, longitud y temperatura.	Debe mostrar correctamente los datos ordenados en formato tabla.
PU008	Generar Informe	Generar informe con los datos mostrados en la tabla	Archivo en formato csv, con los datos de ID del sensor, datos del sensor, timeStamp, latitud,	Debe generar correctamente el archivo, este debe contener un encabezado que identifique al dato, así como en cada

			longitud y temperatura.	fila el ID del sensor, datos del sensor, timeStamp, latitud, longitud y temperatura. Además, el archivo debe estar en formato csv y debe permitir correctamente su lectura y edición una vez haya sido descargado.
--	--	--	-------------------------	--

Nota. La tabla representa las pruebas unitarias realizadas en el aplicativo web.

7. Validación

En esta sección, se presenta la configuración del entorno de pruebas desarrollado para el proyecto, así como los resultados obtenidos en el prototipo. El objetivo principal es proporcionar una herramienta que permita medir la calidad del aire en el área de Bucaramanga y sus alrededores. Además, se muestran los resultados obtenidos a través del sistema DIOT UIS, una aplicación web que brinda a los usuarios información sobre el estado del aire en diferentes tramos del transporte público.

7.1 Configuración experimental

7.1.1 Configuración experimental del prototipo.

Para la recopilación de datos, el prototipo se configuró según se muestra en la figura 17, utilizando una placa de madera como soporte. Esta placa se colocó en la parte delantera del vehículo para garantizar un mejor acceso a los sensores y asegurar un monitoreo adecuado. Es importante destacar que el prototipo no estaba contenido en un recipiente debido a la sensibilidad del sensor GPS a los obstáculos que pudieran interferir con la comunicación entre este y los satélites. Por lo tanto, se optó por no utilizar un contenedor que pudiera bloquear o afectar la recepción de la señal.

Para alimentar los sensores, se requería una fuente de 5V con corriente continua, con esto en mente, se optó por utilizar una laptop, ya que, además de proporcionar energía a los dispositivos, permitía monitorear los datos capturados por el sensor. La conexión entre la laptop y el ESP32 se realizó mediante un cable USB de transferencia de datos, que se conectó al puerto serial del ordenador. La comunicación se estableció a una frecuencia de 9600 baudios.

7.1.2 Configuración experimental del vehículo.

La elección de utilizar un vehículo particular en lugar de uno de transporte público se basó en diversos factores. En primer lugar, la situación social del país implicaba que el control de variables externas en un vehículo de transporte público pudiera ser más complicado. Al utilizar un vehículo particular, se tenía un mayor grado de control sobre el entorno y las condiciones en las que se tomarían las mediciones.

Para llevar a cabo el estudio, se seleccionó un Renault Logan modelo 2008 el cual cuenta con un volumen total de 510 litros, proporcionando suficiente espacio para instalar los equipos necesarios y registrar los datos de manera adecuada.

El Renault Logan utilizado estaba equipado con un sistema de ventilación que permitía tomar aire del exterior y distribuirlo por la cabina. Esto era especialmente importante para asegurar que los niveles de gases no variaran de forma abrupta y se mantuvieran dentro de un rango aceptable durante la toma de datos. Para lograrlo, se mantuvieron las ventanas cerradas durante el recorrido, evitando así la entrada de aire adicional.

La velocidad a la que se tomaban las mediciones fue un promedio de 25 km/h. Esta velocidad proporcionaba una adecuada precisión y un intervalo de tiempo reducido entre las mediciones, lo que permitía obtener una visión más detallada de la calidad del aire en diferentes puntos del recorrido.

Además, se seleccionaron rutas con alto y bajo flujo vehicular para asegurar una representación más completa de las condiciones del aire en la zona de estudio. Esto permitía tener una visión más amplia y comprensiva de la calidad del aire en diferentes contextos de tráfico y densidad vehicular.

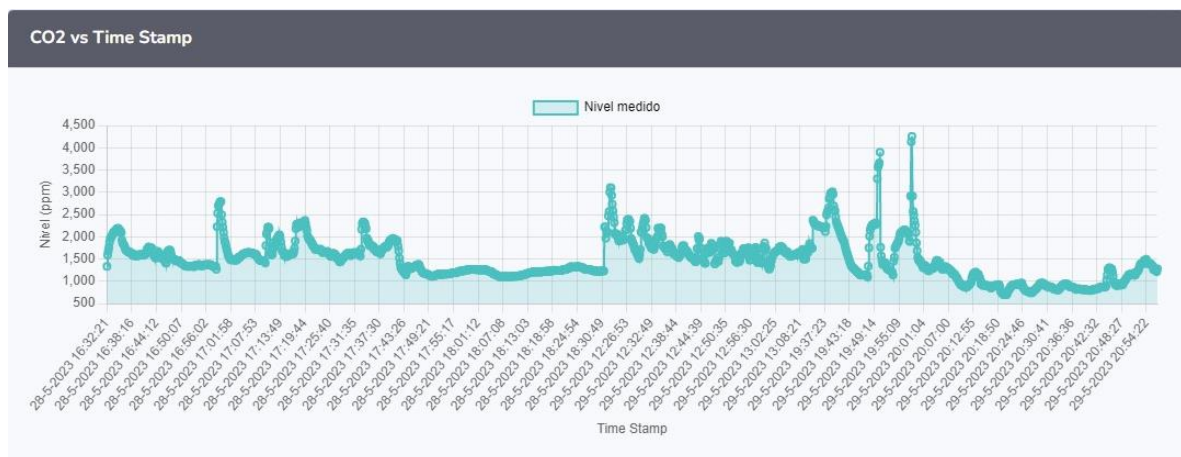
7.2 Presentación de resultados

7.2.1 Representación gráfica CO2 vs tiempo

Se muestra un registro histórico del CO2 en la ruta trazada, que refleja el comportamiento y variación de este gas a lo largo del tiempo. Estos datos son recopilados por el dispositivo y procesados para obtener las mediciones presentes en la aplicación. El histórico brinda información sobre la evolución del CO2 en la ruta, permitiendo analizar tendencias, identificar picos y tener una visión general del nivel de contaminación en diferentes momentos.

Figura 25

Figura de CO2 vs tiempo.



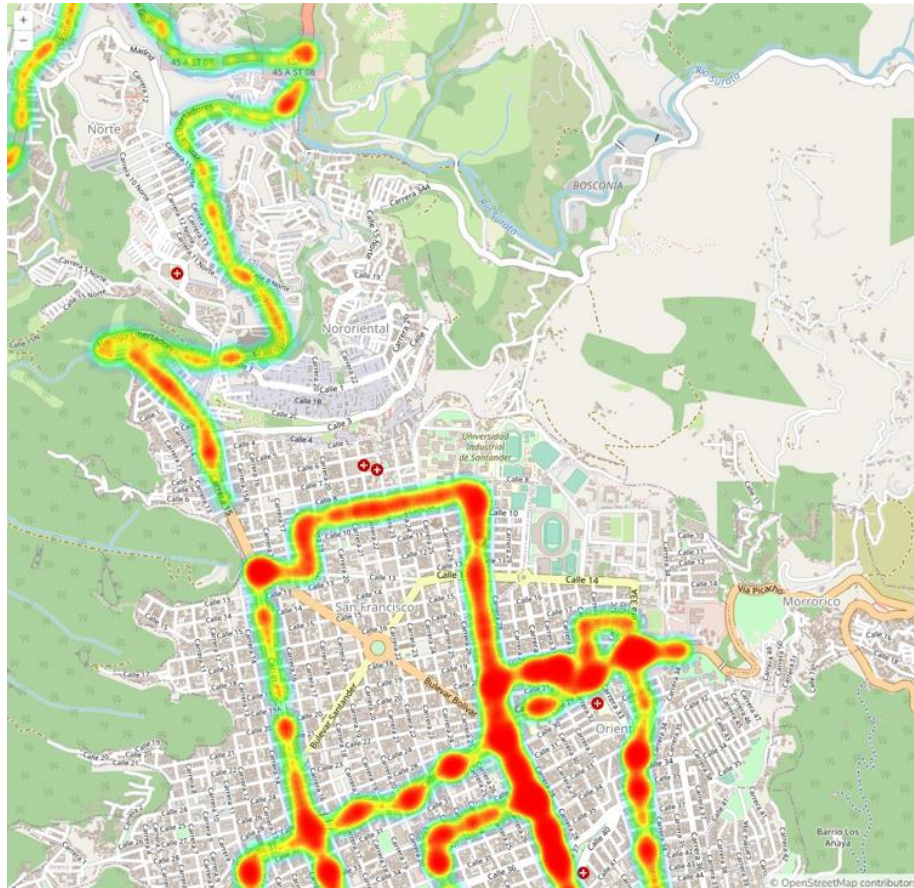
Nota. La figura representa la gráfica de serie de tiempo de los niveles de CO2.

7.2.2 Representación geográfica de resultados

El mapa muestra la información del sensor de CO₂ y el punto donde fue tomado permitiendo visualizar las áreas con altos niveles de este gas. Se utiliza una representación de colores intensos para resaltar las zonas con mayor concentración de CO₂ en el transporte público. Esto permite identificar claramente donde se presenta una cantidad significativa de este gas y brinda una visualización efectiva de los lugares con mayor impacto en términos de calidad del aire en el transporte público.

Figura 26

Figura de la representación geográfica de los resultados.



Nota. La figura representa el mapa de calor generado por en las rutas de transporte publico cubiertas.

7.2.3 Tabulación y descarga de datos

La tabulación y descarga de los datos obtenidos facilita la presentación de la información de manera accesible para los usuarios. Estos datos pueden ser utilizados para llevar a cabo estudios y análisis que respalden la implementación de iniciativas para garantizar la seguridad de las personas y mejorar la calidad del aire. Esta funcionalidad permite que los usuarios puedan acceder y utilizar los datos de manera efectiva en la toma de decisiones y la implementación de medidas adecuadas.

Figura 27

Figura de la tabulación y descarga de datos.

Mediciones				
Descargar informe en formato CSV				
ID sensor	CO2	Temperatura C°	Hora	Coordenada
1	1335	25.1875	28-5-2023 16:32:21	Latitud: 7.130603313, Longitud: -73.11505127
1	1590	25.1875	28-5-2023 16:32:30	Latitud: 7.130883217, Longitud: -73.11487579
1	1680	25.25	28-5-2023 16:32:39	Latitud: 7.131059647, Longitud: -73.11489868
1	1764	25.25	28-5-2023 16:32:49	Latitud: 7.131265163, Longitud: -73.11491394
1	1877	25.1875	28-5-2023 16:32:58	Latitud: 7.131894112, Longitud: -73.11505127
1	1966	25.1875	28-5-2023 16:33:08	Latitud: 7.132260799, Longitud: -73.11510468
1	1975	25.1875	28-5-2023 16:33:17	Latitud: 7.132314682, Longitud: -73.11494446

Nota. La figura representa la tabla de datos obtenidos en las pruebas realizadas.

Figura 28

Figura del CSV generado.

timeStamp	values	deviceUUID	latitude	longitude	temperatura
28-5-2023 16:32:21	1335	1	7.130603313	-73.11505127	25.1875
28-5-2023 16:32:30	1590	1	7.130883217	-73.11487579	25.1875
28-5-2023 16:32:39	1680	1	7.131059647	-73.11489868	25.25
28-5-2023 16:32:49	1764	1	7.131265163	-73.11491394	25.25
28-5-2023 16:32:58	1877	1	7.131894112	-73.11505127	25.1875
28-5-2023 16:33:08	1966	1	7.132260799	-73.11510468	25.1875
28-5-2023 16:33:17	1975	1	7.132314682	-73.11494446	25.1875
28-5-2023 16:33:26	2002	1	7.132445812	-73.11437988	25.1875
28-5-2023 16:33:36	2038	1	7.132457256	-73.11398315	25.1875
28-5-2023 16:33:45	2063	1	7.13244915	-73.11348724	25.125
28-5-2023 16:33:54	2103	1	7.132412434	-73.11304474	25.0625
28-5-2023 16:34:04	2118	1	7.132352829	-73.11283112	25
28-5-2023 16:34:13	2127	1	7.13163662	-73.11286163	25
28-5-2023 16:34:22	2109	1	7.131352901	-73.11284637	24.9375
28-5-2023 16:34:32	2117	1	7.130890846	-73.11292267	24.875
28-5-2023 16:34:41	2179	1	7.130365849	-73.11277771	24.875
28-5-2023 16:34:50	2181	1	7.129959583	-73.11263275	24.8125
28-5-2023 16:35:00	2193	1	7.12956953	-73.11251831	24.6875
28-5-2023 16:35:09	2181	1	7.129040718	-73.11231995	24.6875

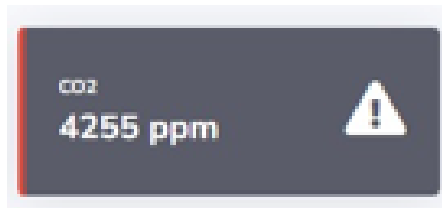
Nota. La figura representa el reporte de los datos obtenidos en las pruebas realizadas.

7.2.4 Resultado máximo alcanzado

La figura muestra el valor máximo alcanzado por el sensor en la estación de monitoreo seleccionada a lo largo del histórico de lecturas. Esta información proporciona una referencia del pico más alto registrado y ayuda a identificar situaciones de mayor concentración o niveles críticos del parámetro medido.

Figura 29

Figura del dato máximo alcanzado en la medición.



Nota. La figura representa el nivel máximo obtenido en las pruebas realizadas.

7.3 Análisis de resultados

A continuación, se mostrarán gráficas que representan el comportamiento de los dispositivos durante las pruebas realizadas. Cabe resaltar que para estas pruebas se abarcaron diversas rutas y se llevaron a cabo en distintos horarios para obtener una visión amplia de su desempeño.

7.3.1 Datos del sensor contra el tiempo

Figura 30

Figura de los datos tomados el día 28 de mayo del 2023 (CO2 vs Tiempo).



Nota. La figura representa la gráfica de serie de tiempo de los niveles de CO2 del día 28 de mayo del 2023.

En la figura se puede apreciar varias lecturas elevadas de dióxido de carbono, los cuales indican que en ciertos momentos del trayecto se presentaron momentáneamente una alta concentración de CO2.

Figura 31

Figura de los datos tomados el día 29 de mayo del 2023 (CO2 vs Tiempo).



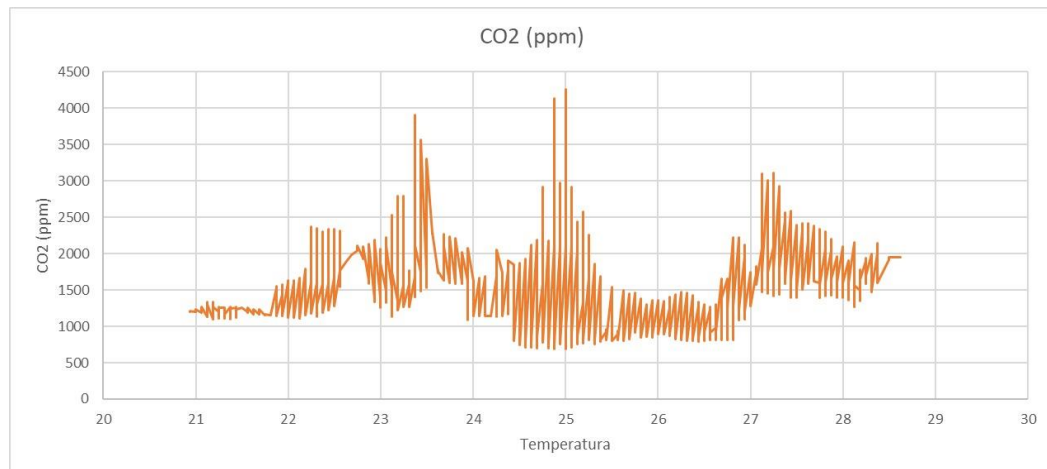
Nota. La figura representa la gráfica de serie de tiempo de los niveles de CO2 del día 29 de mayo del 2023.

Al igual que en la Figura 30, se observan múltiples lecturas elevadas de dióxido de carbono en el gráfico. Sin embargo, en general, la tendencia de la gráfica muestra una disminución gradual y menos variabilidad, a excepción de los datos en el centro que representan los picos más altos de concentración de dióxido de carbono registrados durante las pruebas realizadas.

7.3.2 Datos del sensor contra la temperatura

Figura 32

Figura de los datos tomados el día 28 de mayo del 2023 y el día 29 de mayo del 2023 (CO2 vs Temperatura).



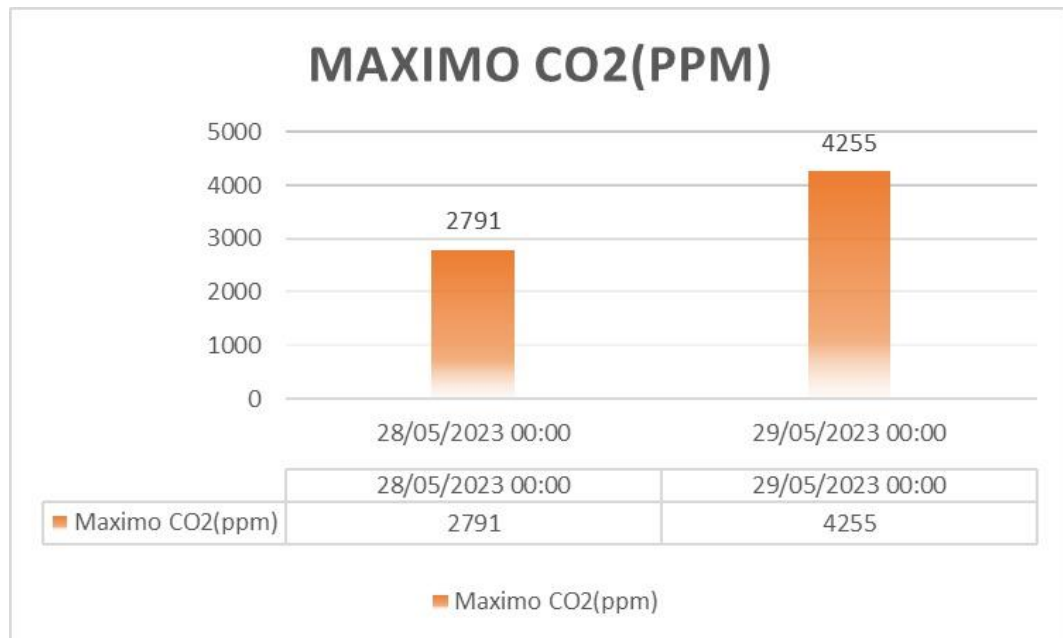
Nota. La figura representa la gráfica de temperatura vs los niveles de CO2.

Se observa una relación entre los niveles de dióxido de carbono y el aumento de la temperatura, donde se aprecia un incremento gradual pero no significativo. Esto indica que la temperatura es una variable que puede influir en las lecturas registradas por el sensor de CO2.

7.3.3 Datos máximos tomados por el sensor CO2(PPM)

Figura 33

Figura de los datos máximos tomados el día 28 de mayo del 2023 y el día 29 de mayo del 2023 (CO2).



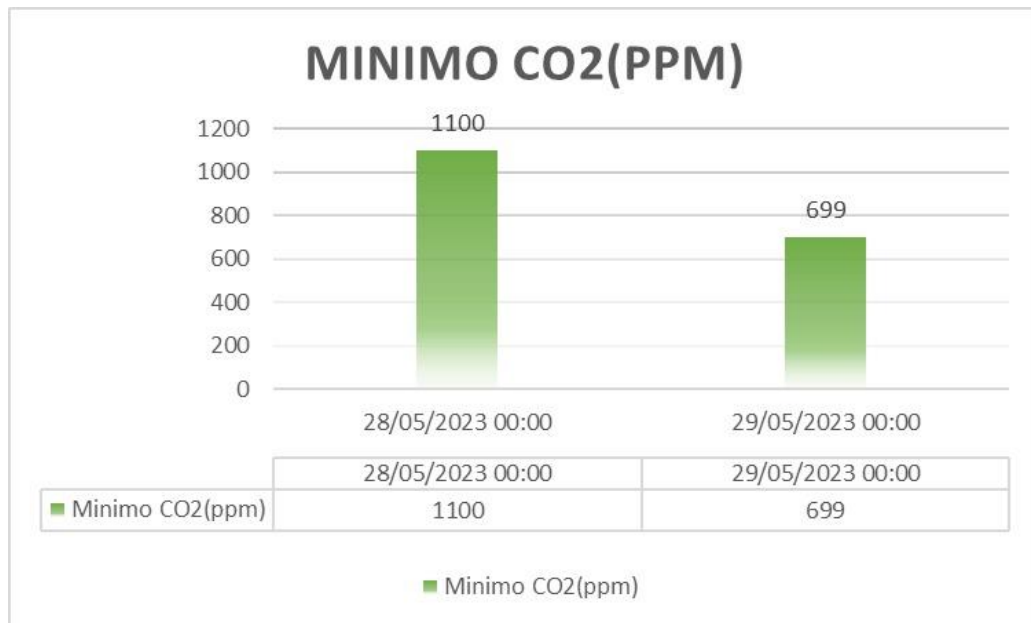
Nota. La figura representa la gráfica que compara el mayor nivel de CO₂ obtenidos entre los días de 28 y 29 de mayo del 2023.

Como se puede apreciar en la figura, el día 29 de mayo de 2023 se registró la lectura más alta de CO₂, según los datos obtenidos en las pruebas realizadas. Esto podría atribuirse al hecho de que el día anterior, el 28 de mayo de 2023, era un domingo, en el cual se suele tener un menor flujo vehicular en las rutas del transporte público en comparación con el día posterior.

7.3.4 Datos mínimos tomados por el sensor CO₂(PPM)

Figura 34

Figura de los datos mínimos tomados el día 28 de mayo del 2023 y el día 29 de mayo del 2023 (CO₂).



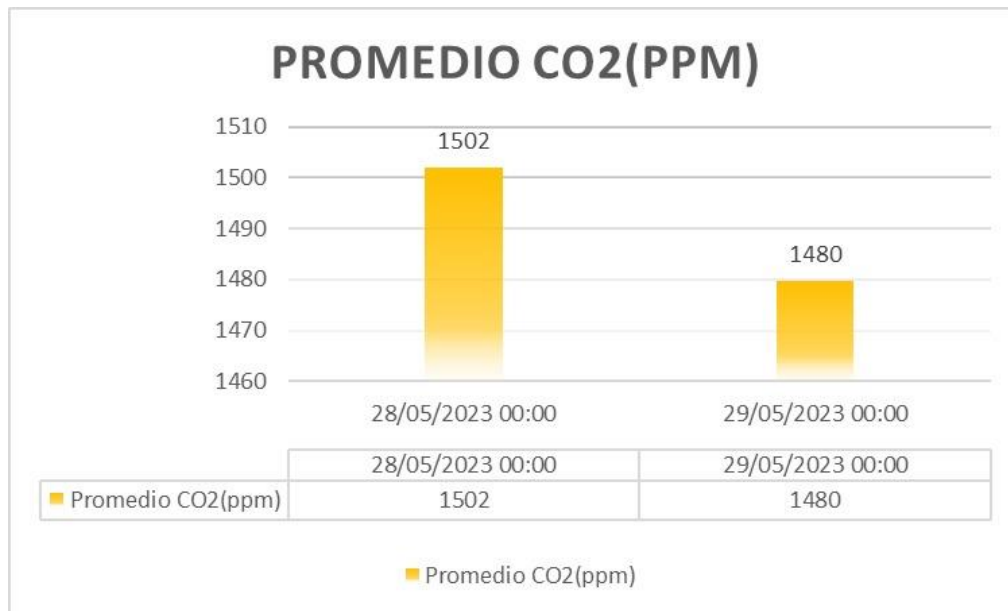
Nota. La figura representa la gráfica que compara el menor nivel de CO₂ obtenidos entre los días de 28 y 29 de mayo del 2023.

Como se puede observar en la figura, el día 29 de mayo de 2023 se registró la lectura más baja de CO₂, de acuerdo con los datos obtenidos en las pruebas realizadas. Esta disminución en los niveles de CO₂ puede atribuirse a la presencia de un bajo flujo vehicular en ciertos puntos de la ruta seguida durante ese día.

7.3.5 Datos promedio tomados por el sensor CO₂(PPM)

Figura 35

Figura de los datos promedios tomados el día 28 de mayo del 2023 y el día 29 de mayo del 2023 (CO₂).



Nota. La figura representa la gráfica que compara el nivel promedio de CO2 obtenidos entre los días de 28 y 29 de mayo del 2023.

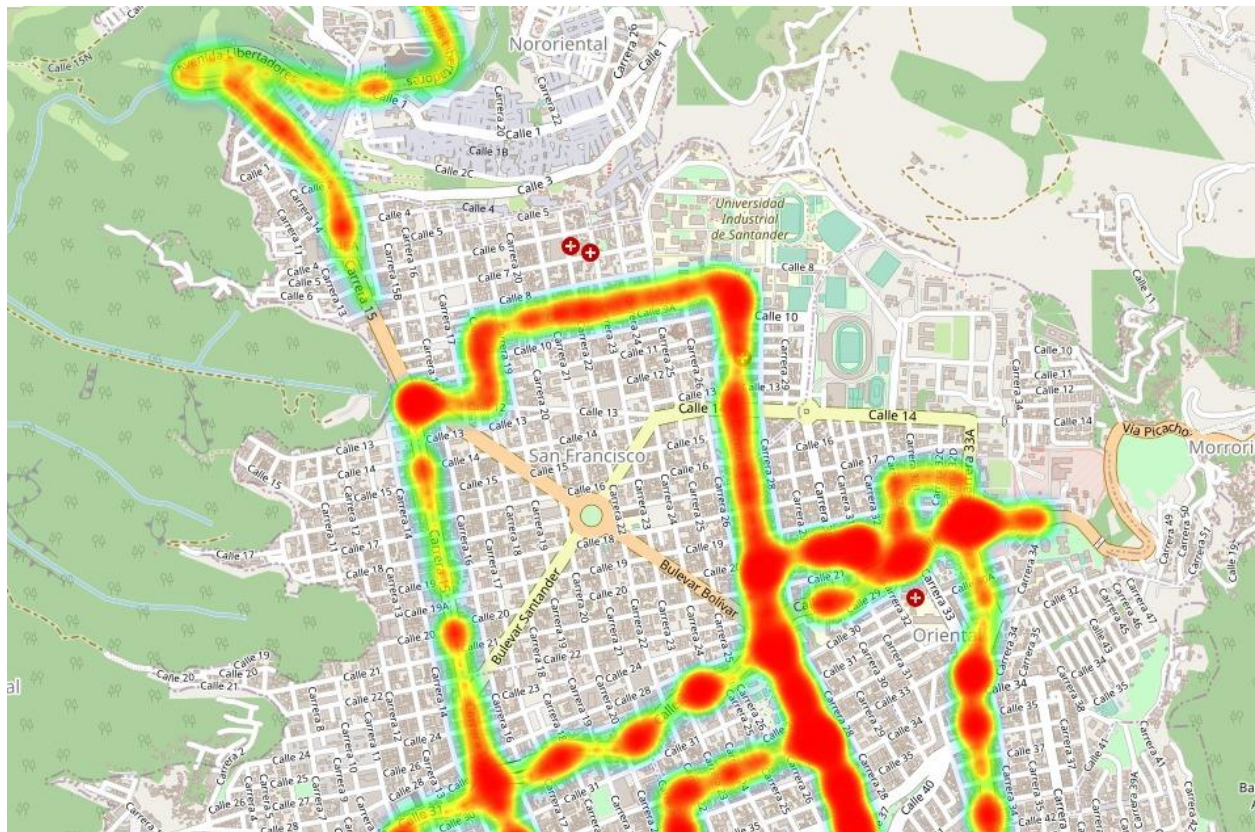
Como se puede apreciar en la figura, el día 28 de mayo de 2023 se registró una lectura promedio mayor en comparación con el día posterior, de acuerdo con los datos obtenidos en las pruebas realizadas. Este resultado puede atribuirse a las diferentes rutas seguidas en ambos días. Aunque el día 28 muestra un promedio más alto, el día 29 presenta una mayor variación y también registra las lecturas más altas.

7.3.6 Mapa de calor de las ubicaciones en donde los datos de CO2(PPM) fueron tomados.

Figura 36

Mapa de calor de los datos tomados el día 28 de mayo del 2023 y el día 29 de mayo del 2023

(CO2), zona norte de Bucaramanga.



Nota. La figura representa el mapa de calor de las rutas seguidas los días de 28 y 29 de mayo del 2023 en la zona norte de Bucaramanga.

Figura 37

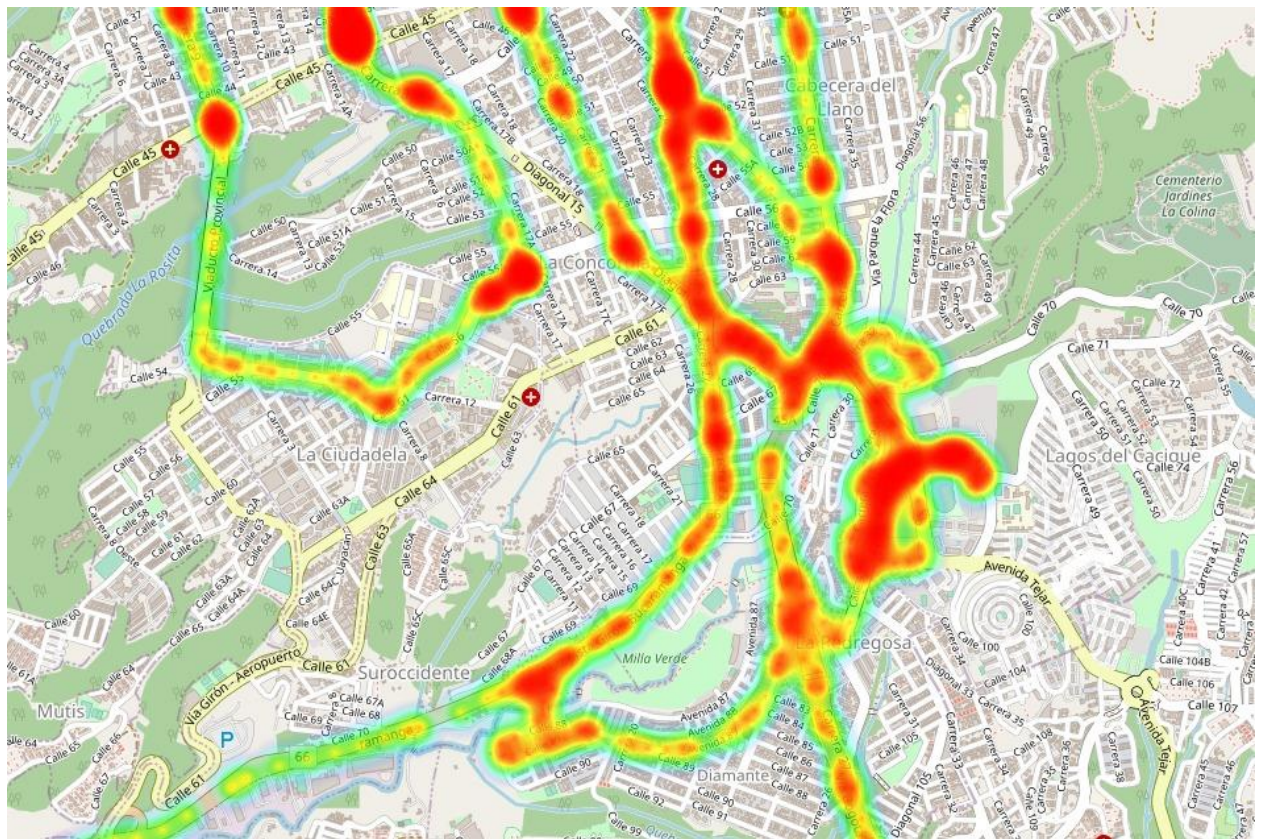
Mapa de calor de los datos tomados el día 28 de mayo del 2023 y el día 29 de mayo del 2023 (CO₂), zona central de Bucaramanga.



Nota. La figura representa el mapa de calor de las rutas seguidas los días de 28 y 29 de mayo del 2023 en la zona central de Bucaramanga.

Figura 38

Mapa de calor de los datos tomados el día 28 de mayo del 2023 y el día 29 de mayo del 2023 (CO₂), zona sur de Bucaramanga y parte de Floridablanca.



Nota. La figura representa el mapa de calor de las rutas seguidas los días de 28 y 29 de mayo del 2023 en la zona sur de Bucaramanga.

En las imágenes presentadas, se puede apreciar que ciertas regiones del mapa muestran una tonalidad más intensa, lo cual indica una alta concentración de dióxido de carbono. Estas zonas corresponden a áreas de Bucaramanga con un alto flujo vehicular, donde las emisiones tienen un fuerte impacto en la calidad del aire. Por otro lado, se pueden observar tonalidades azuladas, que representan las rutas con un bajo flujo vehicular, lo que nos da una idea de bajas concentraciones de dióxido de carbono en esas áreas.

8. Conclusiones

El sistema de información fue diseñado con el propósito de medir y controlar la calidad del aire en la ciudad de Bucaramanga, con el objetivo de identificar áreas con altos niveles de contaminación. Esto permitirá tomar medidas para reducir las emisiones de gases en esas zonas específicas, mejorando así la calidad de vida de los residentes y contribuyendo a un entorno más saludable.

Los objetivos establecidos al inicio del proyecto se lograron satisfactoriamente, culminando con la formalización de una propuesta en forma de un prototipo funcional. Mediante la implementación de tecnología IoT, obteniendo información relevante sobre los parámetros seleccionados en el estudio inicial. Además, se implementó un medio de seguimiento por medio de GPS, brindando un mayor control sobre las rutas y el seguimiento en tiempo real.

En la creación del prototipo, se seleccionaron cuidadosamente los dispositivos IoT los cuales permiten una recolección eficiente de datos para cada recorrido realizado. Se realizó un análisis exhaustivo de las ventajas y desventajas de estos dispositivos, y se implementó un ciclo de análisis para garantizar su correcto funcionamiento y sincronización de los datos.

El recorrido y la recolección de datos reales en cada una de las rutas trazadas fue fundamental para verificar la funcionalidad del sistema. Durante este proceso, se registró la ubicación, el cambio de temperatura y las mediciones del sensor de dióxido de carbono. Estos datos fueron procesados y visualizados a través de la aplicación web.

Finalmente, el desarrollo del proyecto permitió aplicar y consolidar los conocimientos adquiridos durante el programa de Ingeniería de Sistemas e Informática. Además, esta experiencia facilitó la adquisición de nuevas habilidades en el ámbito del desarrollo de proyectos, la

planificación, el trabajo en equipo, los protocolos de comunicación, el conocimiento en IoT, el desarrollo web y el procesamiento de datos en un entorno de investigación real.

9. Recomendaciones y trabajo futuro

Se sugiere mejorar la comunicación entre los dispositivos mediante la implementación de un sistema intermediario. Este sistema actuaría como un almacenamiento temporal en caso de que la conexión Wifi del ESP32 falle, permitiendo que la información se guarde en una cola de mensajes. Una vez que la conexión se establezca, los datos podrán ser cargados sin riesgo de sobrescritura, evitando la pérdida de información.

Es importante destacar que las mediciones obtenidas durante el proceso de recolección de datos son reales y corresponden a las rutas marcadas en el mapa de la aplicación. Sin embargo, es posible que exista un margen de error significativo que puede ser reducido mediante la sustitución de algunos componentes por otros más sensibles y precisos. Esto permitirá obtener información más exacta y confiable.

Se recomienda crear y agregar más módulos de lectura para gases contaminantes. Debido a restricciones presupuestarias, no fue posible adquirir otro módulo que proporcione información relevante sobre la calidad del aire en las rutas transporte público.

Referencias

- Agencia europea de medio ambiente. (22 de 04 de 2013). Cada vez que respiramos. *Cada vez que respiramos.*, 1. Obtenido de <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2013/articulos/cada-vez-que-respiramos>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2012). Toxicological profile for carbon monoxide. *Toxicological profile for carbon monoxide.*
- altronics. (08 de 07 de 2023). *altronics*. Obtenido de altronics: <https://altronics.cl/esp32-wroom-32u-devkit1>
- Esphome. (2020). *Esphome.io*. Obtenido de https://esphome.io/_images/mhz19-full.jpg
- Faiazuddin, S., Lakshmaiah, M., Alam, K. T., & Ravikiran, M. (2020). IoT based Indoor Air Quality Monitoring system using Raspberry Pi4. *IoT based Indoor Air Quality Monitoring system using Raspberry Pi4.*, 1. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/9297442>
- IBM Corporation. (2022). Proceso de mensajes Kafka. *Proceso de mensajes Kafka*, 1. Obtenido de <https://www.ibm.com/docs/es/integration-bus/10.0?topic=applications-processing-kafka-messages>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. *Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- IONOS. (2019). AMQP: conoce el Advanced Message Queuing Protocol. *AMQP: conoce el Advanced Message Queuing Protocol*, 1. Obtenido de <https://www.ionos.es/digitalguide/paginas-web/desarrollo-web/advanced-message-queuing-protocol-amqp/>

- Ja-Bots. (2023). *Ja-Bots.com*. Obtenido de <https://ja-bots.com/wp-content/uploads/2020/12/ESP32-WROOM-32U-1.jpg>
- Llamas, L. (2019). ¿Qué es MQTT? Su importancia como protocolo IoT. *¿Qué es MQTT? Su importancia como protocolo IoT*, 1. Obtenido de <https://www.luisllamas.es/que-es-mqtt-su-importancia-como-protocolo-iot/>
- Macronica. (2023). *Macronica*. Obtenido de macronica.com.co/modulo-sensor-de-temperatura-ds18b20-v2
- MDN contributors. (2022). Generalidades del protocolo HTTP. *Generalidades del protocolo HTTP*, 1. Obtenido de https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/HTTP/Overview#arquitectura_de_los_sistemas_basados_en_http
- Microsoft. (2022). Estilo de arquitectura de microservicios. *Estilo de arquitectura de microservicios*, 1. Obtenido de <https://learn.microsoft.com/es-es/azure/architecture/guide/architecture-styles/microservices>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2022). Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide.*, 1. Obtenido de <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- Oracle. (2022). ¿Qué es el IoT? *¿Qué es el IoT?*, 1. Obtenido de <https://www.oracle.com/co/internet-of-things/what-is-iot/>
- Organización mundial de la salud. (2022). Contaminación del aire doméstico y salud. *Contaminación del aire doméstico y salud.*, 1. Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and->

health#: %7E:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20del%20aire%20dom%C3%A9stico,
cr%C3%B3nica%20y%20c%C3%A1ncer%20de%20pulm%C3%B3n.

Pérez, P. (. (2022). Cardiopatía isquémica. *Cardiopatía isquémica.*, 1. Obtenido de <https://fundaciondelcorazon.com/informacion-para-pacientes/enfermedades-cardiovasculares/cardiopatia-isquemica.html>

Shopee. (2023). *Shopee.* Obtenido de <https://cf.shopee.com.co/file/720cb0dc5bb34bbe12bc94dcae7a1462>

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2019). Carbon Dioxide (CO₂) Pollution. *Carbon Dioxide (CO₂) Pollution.*, 1. Obtenido de <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions#carbon-dioxide-co2-pollution>

United States Environmental Protection Agency. (2021). Particulate Matter (PM) Basics. *Particulate Matter (PM) Basics.*, 1. Obtenido de <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>