

Universidad Autónoma del Caribe

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones



Desarrollo de sistema tecnológico para la realización de estudio sobre calidad del aire en la intersección de la cra 38 con 76 de la ciudad de Barranquilla

Angie Paola Camargo De La Cruz

Andrés Eduardo Monsalve Caballero

Colombia, Barranquilla

2021

Desarrollo de sistema tecnológico para la realización de estudio sobre calidad del aire en la
intersección de la cra 38 con 76 de la ciudad de Barranquilla

Angie Paola Camargo De La Cruz

Andrés Eduardo Monsalve Caballero

Trabajo de grado presentado para optar el título de Ingeniero Electrónico y en
Telecomunicaciones

Director

Meglys Heriana Pérez Bernal

Co-Director

José Rafael Escorcia Gutiérrez

Universidad Autónoma del Caribe

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Colombia, Barranquilla

2021

Resumen

El aire es una sustancia gaseosa e incolora de vital importancia para los seres vivos. Dicha sustancia, se ve altamente contaminada por medios naturales como erupciones volcánicas, y antropogénicas como la quema de combustibles fósiles. La calidad del aire se mide con el índice de calidad del aire o ICA, el cuál censa diferentes sustancias contaminantes encontradas en el aire y determina, dependiendo de la concentración de cada sustancia, si la calidad es buena, aceptable, dañina a la salud de grupos sensibles, dañina a la salud, muy dañina a la salud o peligrosa, todo lo anterior de acuerdo a la resolución 2254 del 2017.

En el proyecto se desarrolla un dispositivo portátil que, por medio de una aplicación móvil, permite al usuario visualizar en tiempo real la cantidad de partículas contaminantes principales tales como el monóxido de carbono, material particulado, óxidos de nitrógeno y ozono troposférico, y las variables meteorológicas de temperatura y humedad, dejando de lado los equipos que pueden llegar a ser altamente costosos y para nada portátiles. Se realiza en conjunto un trabajo de campo donde se tomaron mediciones durante un tiempo determinado de 28 días calendario, tomando como lugar de estudio la intersección de la carrera 38 con calle 76 de la ciudad de Barranquilla, siendo esta una vía principal con un alto afluente de vehículos y peatones.

Finalmente, se tomaron los resultados del trabajo de campo, se realizó una tabulación y, posteriormente, un análisis de los datos obtenidos que, con base en ellos, se estima el índice de calidad del aire (ICA) de la intersección de la carrera 38 con 76 de la ciudad de Barranquilla.

Abstract

Air is a gaseous, colorless substance of vital importance to living things. This substance is highly contaminated by natural means such as volcanic eruptions, and anthropogenic such as burning fossil fuels. Air quality is measured with the air quality index or ICA, which tightens different pollutants found in the air and determines, depending on the concentration of each substance, whether the quality is good, acceptable, harmful to the health of sensitive groups, harmful to health, very harmful to health or dangerous, all of the above according to resolution 2254 of 2017.

The project develops a portable device that, through a mobile application, allows the user to visualize in real time the amount of main polluting particles such as carbon monoxide, particulate matter, nitrogen oxides and tropospheric ozone, and temperature and humidity weather variables, leaving aside equipment that can become highly expensive and not at all portable. Together a field work is carried out where measurements were taken during a certain time of 28 calendar days, taking as a place of study the intersection of race 38 with 76th Street of the city of Barranquilla, this being a main road with a high tributary of vehicles and pedestrians.

Finally, the results of the field work were then taken, a tabulation was made and then an analysis of the data obtained that, based on them, is estimated the air quality index (ICA) of the intersection of race 38 with 76 of the city of Barranquilla.

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Barranquilla, xxxxx de xxxxx de 202x

Dedicatoria

Dedicamos con todo nuestro corazón este trabajo a Dios que nos guía de su mano en nuestro camino, a nuestros padres que siempre han estado presente apoyándonos y guiándonos por el mejor camino.

Agradecimientos

Agradecemos primero que todo a Dios por forjar nuestro camino y estar con nosotros, a nuestros padres por el apoyo y la confianza, a nuestros profesores que, a lo largo de nuestra carrera, han dejado mucho conocimiento no sólo sobre nuestra carrera sino de la vida, con la mención especial Meglys Pérez, Valmiro Maldonado, Salling Pallares, José Ledesma y Henry Camargo quienes han estado presentes acompañándonos desde el inicio de nuestra vida universitaria.

Contenido

Resumen.....	III
Abstract.....	IV
Introducción	1
Capítulo 1 Descripción del Proyecto	2
Planteamiento del Problema	2
Formulación del Problema.....	3
Impacto Esperado.....	3
Usuarios Directos e Indirectos	3
Objetivos.....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos.....	4
Metodología	4
Caracterización de variables	4
Desarrollo de dispositivo	5
Diseño de aplicación.....	10
Pruebas de funcionamiento.....	13
Capítulo 2 Marco Teórico y Estado del Arte	15
Capítulo 3 Análisis de Resultados y Propuesta Ingenieril	22
Capítulo 4 Conclusiones	31
Capítulo 5 Recomendaciones.....	32

Bibliografía	33
Anexos	37

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Niveles máximos permisibles de cada contaminante</i>	16
Tabla 2. <i>Descripción general del índice de calidad del aire (ICA)</i>	17
Tabla 3. <i>Puntos de corte del ICA</i>	18
Tabla 4. <i>ICA 5 de mayo Barranquilla Verde</i>	24
Tabla 5. <i>ICA 5 de mayo dispositivo ESCA-MC</i>	24

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Diagrama de proceso</i>	4
Figura 2. <i>Sensor MQ7</i>	6
Figura 3. <i>Sensor MQ135</i>	7
Figura 4. <i>Sensor MQ131</i>	7
Figura 5. <i>Sensor PMS5003</i>	8
Figura 6. <i>Módulo DHT11</i>	8
Figura 7. <i>Esquema Arduino</i>	9
Figura 8. <i>Montaje en Protoboard</i>	10
Figura 9. <i>Diagrama de flujo de la aplicación móvil</i>	12
Figura 10. <i>Interfaz de usuario (GUI)</i>	12
Figura 11. <i>Diagrama de proceso para SVCA manual</i>	14

Lista de Anexos

Anexo A. <i>Datasheet Sensor MQ7</i>	37
Anexo B. <i>Datasheet Sensor MQ135</i>	37
Anexo C. <i>Datasheet Sensor MQ131</i>	37
Anexo D. <i>Datasheet Sensor PMS 5003</i>	37
Anexo E. <i>Datasheet DHT11</i>	37
Anexo F. <i>Código Arduino dispositivo ESCA-MC</i>	37
Anexo G. <i>Datasheet modulo Bluetooth HC-05</i>	37
Anexo H. <i>Código Aplicación Móvil</i>	37
Anexo I. <i>Código de fuente (.aia) aplicación móvil</i>	37
Anexo J. <i>Promedio por día y por hora de cada contaminante</i>	37
Anexo K. <i>Gráficas diarias de promedios por hora</i>	38

Lista de Gráficas

Gráfica 1. <i>Porcentajes de datos válidos</i>	23
Gráfica 2. <i>Comportamiento del PM10 durante 28 días</i>	25
Gráfica 3. <i>Comportamiento PM2.5 durante 28 días</i>	26
Gráfica 4. <i>Comportamiento monóxido de carbono durante 28 días</i>	26
Gráfica 5. <i>Comportamiento ozono durante 28 días</i>	27
Gráfica 6. <i>Comportamiento Óxidos de Nitrógeno durante 28 días</i>	27
Gráfica 7. <i>Comportamiento Temperatura durante 28 días</i>	28
Gráfica 8. <i>Comportamiento Humedad Relativa durante 28 días</i>	28
Gráfica 9. <i>ICA diario por cada contaminante censado durante 28 días</i>	29
Gráfica 10. <i>ICA del promedio por hora del día 5 de mayo</i>	30

Introducción

El aire es la sustancia gaseosa, incolora e inodora que conforma la atmósfera, conformada de hasta un 21% de oxígeno y un 78% de nitrógeno, el porcentaje faltante tiene una proporción de partículas de gases inertes como el argón y el helio además una pequeña de este es de vapor de agua entre otras moléculas (Refrigerating Facilities 1: Física Aplicada, 1997). En si es el aire que todos conocemos y respiramos, contando con una gran importancia para la mayoría de los seres vivos que habitan todos los ecosistemas, ya que en el aire se encuentra la base del intercambio gaseoso de funciones vitales, como lo es el respirar.

Un adulto humano en reposo respira de 5 a 6 litros de aire por minuto y este solo contiene aproximadamente de 1,8 a 2,4 gramos de oxígeno, como resultado en un día estaríamos respirando entre 7.200 a 8.600 litros de aire (PatentStorm, 2001). Por lo que queda claro que toda impureza que el aire contenga también será introducida en nuestro organismo y será absorbido en el proceso respiratorio deteriorando así con el tiempo los órganos y la salud de la persona expuesta a este aire contaminado. Gran parte de la contaminación que está afectando nuestro aire proviene de actividades humanas. Es el resultado de la fabricación, el transporte y la dependencia de combustibles fósiles como el gas y el carbón.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), contaminantes como el monóxido de carbono, altos niveles de dióxido de carbono y polución causan inflamación e irritación en las vías respiratorias además de irritación ocular, personas sensibles pueden contraer en corto plazo síntomas de tos y secreción de moco e infecciones severas a largo plazo (OMS, s.f.). Es particularmente perjudicial para aquellos con asma o sistemas inmunitarios comprometidos. Con el tiempo, la exposición a una mala calidad del aire puede conducir a una reducción de la función

pulmonar y problemas respiratorios, así como cáncer de pulmón o enfermedades cardiovasculares (EPA, s.f.). Por otro lado, si la persona ya sufre de estas últimas enfermedades son particularmente vulnerables a los efectos de la contaminación, y pueden encontrar que sus condiciones empeoraron debido a la exposición.

Por esto es de suma importancia que la calidad del aire se mantenga por encima de los valores mínimos establecidos por entidades regulatorias del medio ambiente como lo es el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Instituto de Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales (IDEAM) entidades gubernamentales de Colombia.

Capítulo 1

Descripción del Proyecto

Planteamiento del Problema

Existen muchas causas de la contaminación del aire, entre estas están el cocinar en casa con carbón, la quema a gran escala de carbón y petróleo por parte de industrias, el metano y amoníaco que produce el ganado, más la quema de los residuos agrícolas, gases de efecto invernadero, quema de basuras, plaguicidas, y los combustibles fósiles. Estos últimos son una de las más grandes fuentes contaminantes del aire, donde los vehículos (carros, motos, camiones, entre otros), día a día queman cantidades inmensas de este combustible, el cual emite dióxido de carbono.

La contaminación del aire trae como consecuencia diferentes problemáticas tales como el efecto invernadero, lluvias ácidas, variaciones en el comportamiento meteorológico, daño en la capa de ozono, etc., y también repercute de manera directa en la salud del ser humano cómo el desarrollo de enfermedades respiratorias graves (cáncer de pulmón, neumonía, asma, alergias),

intoxicación por consumo de alimentos contaminados por el aire, enfermedades cardiovasculares, etc.

Por todo lo anterior, se hace necesario tener métodos y equipos que permitan la medición de la calidad del aire partiendo de diferentes partículas encontradas en el mismo. En la industria se encuentran variedades de equipos diseñados para este propósito, pero son de elevado costo y no están destinados para el usuario común.

Formulación del Problema

¿Es posible estudiar la calidad del aire en la intersección de la cra 38 con 76 de Barranquilla a través del desarrollo de un sistema tecnológico de un costo asequible?

Impacto Esperado

Se espera que el dispositivo y la aplicación móvil se conviertan en una herramienta útil de información para censar diferentes sustancias contaminantes del aire para realizar la estimación de la calidad del aire no sólo en la intersección de la carrera 38 con 76 de la ciudad de Barranquilla, sino en otros espacios para futuros proyectos, también que sirva como punto de partida para las entidades ambientales de Barranquilla si se necesita mejorar la calidad de la zona censada.

Usuarios Directos e Indirectos

Este proyecto está orientado para ser utilizado por entidades educativas, equipos de investigación estudiantiles que quieran realizar trabajos de campo basados en análisis de variables y partículas contaminantes presentes en el aire, con un amplio abanico de posibles actualizaciones tanto en la aplicación móvil cómo por la base de la plataforma Arduino y su capacidad para añadir nuevos sensores. Igualmente, las personas que estén interesadas en utilizarlo, también lo pueden hacer.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar de un sistema tecnológico para la realización de estudio sobre la calidad del aire en la intersección de la carrera 38 con calle 76 de la ciudad de Barranquilla.

Objetivos Específicos

- Caracterizar las variables del aire a censar.
- Desarrollar un dispositivo portátil para la adquisición de los parámetros para estimar el nivel de calidad del aire.
- Diseñar una aplicación para la visualización y almacenamiento de las variables censadas.
- Realizar pruebas de funcionamiento del sistema de censado para estimar la calidad del aire.

Metodología

La elaboración de este proyecto se dividió en cuatro (4) procesos principales expresados en la figura a continuación.

Figura 1. Diagrama de proceso



Caracterización de variables

Para la realización del proyecto se tomaron en cuenta variables contaminantes establecidas en la resolución 2254 del 2017, que son el monóxido de carbono, el ozono troposférico y el material particulado PM10 y PM2.5. A parte, se considera otra variable contaminante, el NOx u óxidos de nitrógeno que se define como un conjunto de gases compuestos por óxido nítrico (NO)

y dióxido de nitrógeno (NO₂) (PRTR España, s.f.). Estas variables se escogen porque los sensores a utilizar son asequibles en cuestión de costos.

En el presente proyecto no se incluyen las variables dióxido de nitrógeno (NO₂) aunque este sea uno de los componentes de los óxidos de nitrógeno (NO_x), ni el dióxido de azufre (SO₂) ya que, aunque están incluidas en la resolución 2254 del 2017, los sensores necesarios para el censado de dichas sustancias sobrepasaban el presupuesto planteado para el desarrollo del proyecto.

Además de las variables contaminantes anteriormente mencionada, se tienen en cuenta las variables meteorológicas con el fin de que los datos recolectados de estas se procesen junto a los datos de las sustancias contaminantes escogidas (ozono troposférico, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}), para estimar la calidad del aire en este proyecto para conocer si en el comportamiento de estas sustancias influyen las variables meteorológicas seleccionadas. Las variables meteorológicas escogidas para ser censadas son la humedad relativa y la temperatura (incluidas dentro del reporte de calidad de aire del primer semestre del año 2021 elaborado por el laboratorio ambiental EPA de Barranquilla Verde).

Desarrollo de dispositivo

En primera instancia, para el diseño y desarrollo del dispositivo, se decide utilizar la plataforma de desarrollo Arduino ya que es una plataforma conocida y existe una experiencia previa con la misma. Una vez realizada la elección, se realiza una exhaustiva búsqueda de los sensores necesarios para la recolección de datos en conjunto con la selección de sustancias contaminantes a censar. Por motivos de accesibilidad, se toman en cuenta los sensores a continuación capaces de censar las sustancias contaminantes elegidas:

I. Sensor MQ7

Caracterizado por su alta sensibilidad al monóxido de carbono, rápida respuesta a cambios en la salida tanto analógica como digital que proviene del divisor de voltaje que forma el sensor y una resistencia de carga. (Anexo A)

Figura 2. Sensor MQ7



Nota: Fuente: ServoTronik. MQ-7 module-carbon-monoxide-gas-sensor. Recuperado de: <https://www.servotronik.com.co/index.php/producto/sensor-mq7-monoxido-de-carbono-co/>.

II. Sensor MQ135

Sensor de control de calidad del aire, encargado de la detección de gas en diversos porcentajes, es usado para la detección de contaminación en el medio ambiente por lo general es implementado en circuitos de control como alarmas en las casas, sitios donde se desea prevenir altos niveles de contaminación a nivel aeróbico como industrias que manejan compuestos químicos que pueden ser nocivos también para la salud, especialmente en equipos controladores de calidad de aire en edificios/oficinas (ARDOBOT, s.f.) . Para nuestro proyecto, será utilizado para censar específicamente el NO_x.

La señal de salida que proporciona el MQ-135 es dual, de carácter analógico y digital. Respecto a la señal analógica proporcionada, esta viene a ser directamente proporcional al incremento de voltaje, esta es la salida que se utilizó para la conexión con el Arduino. (Véase Anexo B)

Figura 3. Sensor MQ135



Nota: Módulo Sensor MQ-135 Calidad del Aire. Recuperado de: <https://www.ardobot.co/modulo-sensor-mq-135-calidad-del-aire.html>

III. Sensor MQ131

Sensor altamente sensible a partículas de Ozono contando con una salida analógica y una digital donde entre mayor sea la tensión en el pin de salida, mayor será la concentración de ozono. (Anexo C Anexo C. *Datasheet Sensor MQ131*)

Figura 4. Sensor MQ131



Nota: Fuente: Electrónica Plug And Play Recuperado de: <https://www.electronicaplugandplay.com/sensores-y-transductores/gas-y-calidad-de-aire/product/833-module-mq-131-ozone>

IV. Sensor Calidad De Aire Pms 5003 Pm 2.5

El PMS5003 es un sensor de concentración de partículas que, dentro de sus utilidades, puede obtener el número de partículas suspendidas en el aire en concentraciones de PM1.0, PM2.5 y PM10. (Anexo D)

Figura 5. Sensor PMS5003



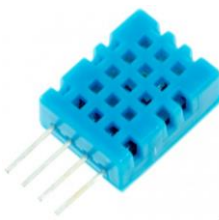
Nota: Fuente: Adafruit Learnign System Recuperado de: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/pm25-air-quality-sensor.pdf>

V. DHT11 Módulo de temperatura y humedad

El DHT11 es un sensor digital de temperatura y humedad relativa. Integra un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante, y muestra los datos mediante una señal digital en el pin de datos (no posee salida analógica). Utilizado en aplicaciones académicas relacionadas al control automático de temperatura, aire acondicionado, monitoreo ambiental en agricultura y más (NAYLAMP, s.f.).

En cuanto a software, se cuenta con librerías para Arduino con soporte para el protocolo “single bus”. Tiene un rango de medición de temperatura desde los 0°C hasta los 50°C con precisión de $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$, y un rango de medición de humedad relativa del 20% al 90% con una precisión del 5%. Por otra parte, una desventaja del sensor es que sólo puede obtener datos cada 2 segundos. (Anexo E)

Figura 6. Módulo DHT11

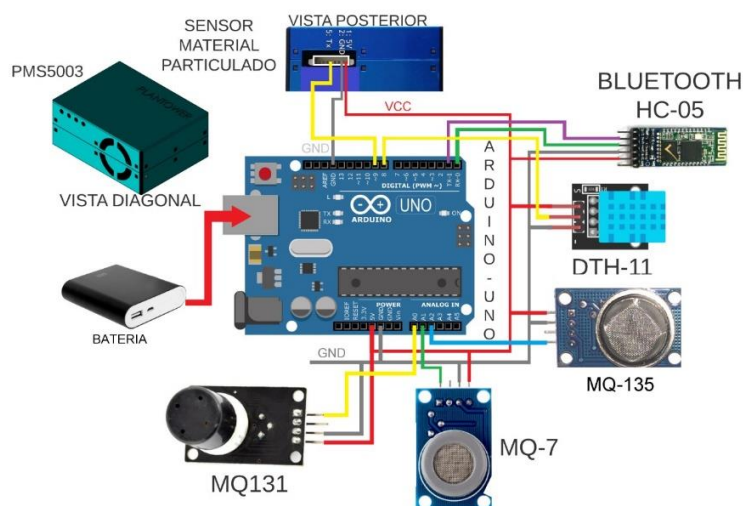


Nota: Fuente: Naylamp. Recuperado de: <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/57-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht11.html>

Al obtener los sensores y módulos, el paso siguiente es diseñar un circuito para la conexión de cada uno de ellos con la placa de Arduino UNO, garantizando no sólo el correcto envío y recibimiento de datos sino también la proporción de niveles de corriente y voltajes necesarios para el óptimo funcionamiento de cada componente del circuito. Se utilizaron 3 baterías portátiles de 10.000mA con una duración de 4 horas, para proporcionar la alimentación del dispositivo. Cabe recalcar que se puede conectar el dispositivo directamente a la toma de electricidad por medio de un cargador de 9v compatible con la plataforma Arduino. A la par, se programa un código para la obtención de los datos censados por cada sensor.

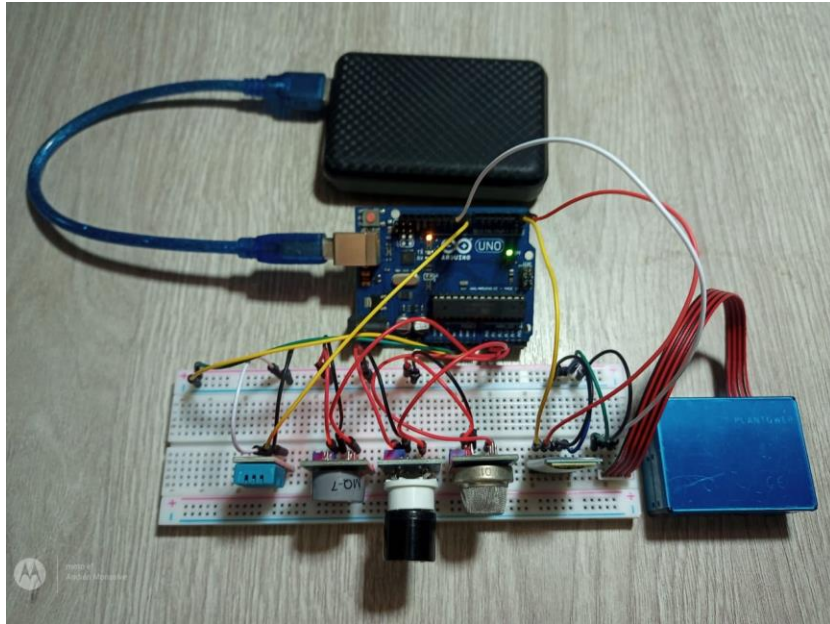
Al tener el código de recolección de datos censados (Véase Anexo F), se integró el módulo Bluetooth (Véase Anexo G para más especificaciones del módulo Anexo G. *Datasheet modulo Bluetooth HC-05*) para realizar la conexión entre el Arduino UNO y un dispositivo móvil para así lograr el almacenamiento de los datos recibidos de cada sensor en tiempo real. La elección del módulo Bluetooth se basó específicamente porque es un módulo con el cuál se ha trabajado, además de que ofrece una conexión estable y eficiente para entablar la comunicación entre los dispositivos a utilizar en el proyecto.

Figura 7. Esquema Arduino



Nota. Esquema de montaje de sensores y módulos en Arduino UNO

Figura 8. Montaje en Protoboard



Nota: Imagen montaje en protoboard de todos los componentes del dispositivo.

Diseño de aplicación

Para el diseño de la aplicación móvil se utiliza el entorno de desarrollo de software destinado para Android, App inventor 2, el cual usa Java, Kawa y Scheme como lenguajes de programación. Escogido por ser un entorno útil, muy intuitivo y gráfico, asequible en cualquier momento teniendo conexión a internet pudiendo modificar los bloques de código de manera fácil frente a cualquier necesidad, se adapta de grata manera a las necesidades del proyecto.

Se divide el desarrollo de la aplicación en cuatro (4) puntos claves para abarcar las funcionalidades principales de la misma, que son la recepción de datos, la visualización de los datos recibidos en tiempo real, envío de los datos a la nube, y un último punto dedicado a la interfaz gráfica (GUI) de la aplicación móvil.

En la primera etapa, se establece el bloque de código correspondiente al emparejamiento entre el dispositivo del proyecto y el teléfono móvil, por medio de bluetooth, se hace uso de una

etiqueta para indicar si se realiza una conexión exitosa o si existe un fallo en ella o en caso de haber ocurrido cualquier eventualidad al momento de establecer la conexión entre los dos (2) dispositivos. Una vez establecida la conexión, se da inicio a la recepción de datos enviados por el dispositivo “ESCA-MC” por parte de la aplicación.

Para la segunda etapa, en un bloque de código siguiente, se colocan siete (7) etiquetas correspondientes tanto a las variables meteorológicas como contaminantes escogidas para ser censadas, adyacente a cada variable se muestra en tiempo real el valor censado de cada variable.

Al recibir los valores censados de cada variable, se pasa a la tercera etapa, donde se tiene un bloque de código donde se toman los datos recibidos por la aplicación y se importan en tiempo real a un archivo de Google Sheet por medio de un formulario. Se decide elegir Google Sheet por sobre bases de datos u otros mecanismos de almacenamiento de datos por ser una herramienta intuitiva basada en la nube, de fácil manejo y edición, capaz de adaptarse a las necesidades inmediatas del proyecto, además de ser muy compatible con App Inventor 2 por la facilidad de integración de la hoja de Google Sheet a los bloques de código de la aplicación móvil.

Para la última etapa, se configura la interfaz gráfica (GUI) (Figura 10) para simplificar la comunicación con el usuario y que esta sea estéticamente agradable con un estilo minimalista para el fácil entendimiento del usuario. Se establecen botones clave desconexión del bluetooth, un botón para salir de la aplicación y un último botón encargado de redireccionar al usuario a Google Sheet donde se da acceso a todos los datos recolectados. (Véase Anexo H y Anexo I)

Figura 9. Diagrama de flujo de la aplicación móvil

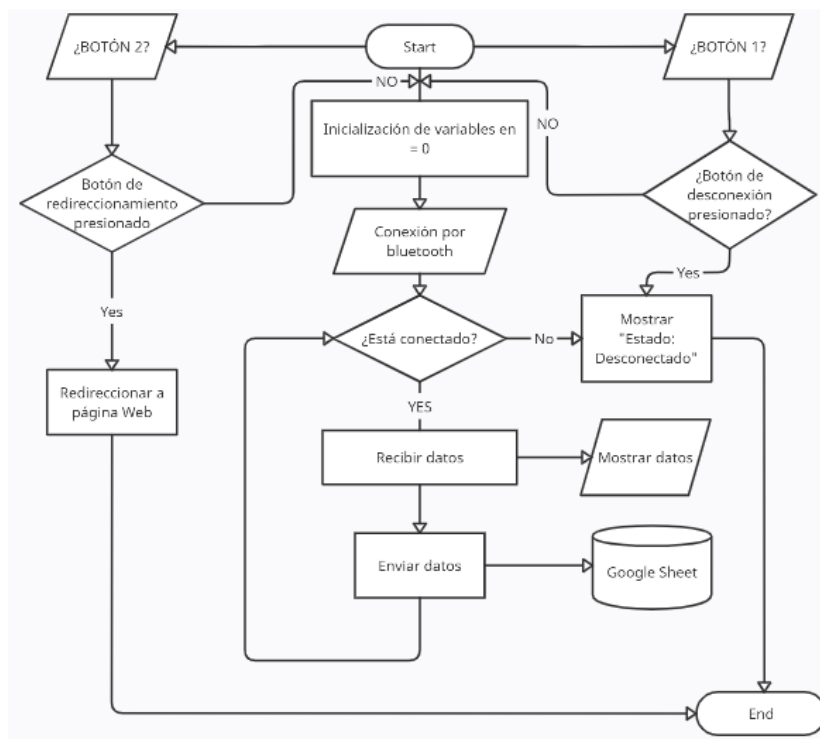


Figura 10. Interfaz de usuario (GUI)



Pruebas de funcionamiento

Una vez se completa el diseño y desarrollo tanto del prototipo del dispositivo como de la aplicación móvil, se lleva a cabo las pruebas de funcionamiento en el sitio seleccionado para realizar el trabajo de campo por su alto volumen de transeúntes, flujo vehicular, presencia de comercios, lugares de comida y algunas viviendas, la intersección de la carrera 38 con 76 durante dos días en diferentes horarios del dispositivo junto con la aplicación para revisar si se realizan las tareas de cada uno y se cumplen con los objetivos de comunicación, envío y almacenamiento de la información.

Concluidas las pruebas, se efectúa el ensamble de los módulos, los sensores y, finalmente, se construye un contenedor de acrílico para almacenar el dispositivo. Este contenedor, consta de una ranura destinada a los sensores y al módulo Bluetooth. En su parte posterior tiene un orificio para el cable de alimentación (si se quiere conectar directamente al toma corriente), es su parte

superior tiene una tapa para poder acceder más fácilmente a los sensores y a la batería portátil. Además, en uno de sus laterales tiene un sticker con el código QR para descargar la aplicación.

Al tener completamente desarrollado el sistema tecnológico, se procede a realizar un monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. En Colombia, las empresas e industrias que realicen mediciones de la calidad del aire, las firmas consultoras, universidades, entes educativos, laboratorios ambientales que presenten servicios de medición de la calidad del aire y las autoridades ambientales (MAVDT, 2008), utilizan el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, y este depende del tipo de sistema de vigilancia de la calidad de aire o SVCA.

Para la realización de este proyecto, se siguieron de manera general los procedimientos establecidos para los SVCA manuales que se presentan a continuación:

Figura 11. Diagrama de proceso para SVCA manual



Nota: Fuente: Ref. MAVDT (2008). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire*. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/Protocolo+para+el+Monitoreo+y+seguimiento+de+la+calidad+del+aire.pdf/6b2f53c8-6a8d-4f3d-b210-011a45f3ee88>

Se establece un intervalo de tiempo de 12 horas diarias (de 6am a 6pm) con un tiempo de muestreo de 2 segundos, ya que es la frecuencia mínima de muestreo del sensor DHT11, por un periodo de 28 días calendario desde el día 14 de abril hasta el día 21 de mayo, para la recolección de datos de sustancias contaminantes en el aire en la intersección de la carrera 38 con 76 de la

ciudad de Barranquilla. Posteriormente, se realiza un tratamiento de la información recolectada, y se estima el índice de calidad del aire (ICA) con la fórmula a continuación:

$$ICA_p = \frac{I_{Alto} - I_{Bajo}}{PC_{Alto} - PC_{Bajo}} * (C_p - PC_{Bajo}) + I_{Bajo}$$

En donde:

ICA_p = Índice de Calidad del Aire para el contaminante p

C_p = Concentración media para el contaminante p

PC_{Alto} = Punto de corte mayor o igual a C_p

PC_{Bajo} = Punto de corte menor o igual a C_p

I_{Alto} = Valor del ICA correspondiente al PC_{Alto}

I_{Bajo} = Valor del ICA correspondiente al PC_{Bajo}

Durante la recolección de datos el equipo fue ubicado la mayoría de los días sobre una estación de servicio telefónico que se encuentra justo en la esquina de la intersección de la carrera 38 con calle 76, aprovechando así su altura para una mejor toma de muestras, días muy soleados se le colocaba una especie un plástico oscuro sobre la caja del equipo o se cambiaba de lugar el equipo para protegerlo de la luz solar y que el calor no afectara su rendimiento. Durante el tiempo que se hicieron las muestras no llovió, por lo que no tuvimos inconvenientes con ese aspecto.

Capítulo 2

Marco Teórico y Estado del Arte

El aire es una mezcla de gases y partículas suspendidas en la atmósfera. Su composición está integrada principalmente por el nitrógeno 78%, oxígeno 21%, vapor de agua 0-7%, ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y gases nobles como el argón 1% (ConceptoDefinición, 2021).

Este elemento se ve contaminado por muchas causas, ya sean naturales como el polvo, humo, la pulverización de agua marina, gases sulfurosos, polen e incendios forestales, o antropogénicas, es decir, que derivan de la actividad humana. Estas actividades son la producción de energía con la quema de carbón, plantas basadas en Diesel, procesos industriales, el transporte,

la agricultura con la quema de residuos agrícolas y, el amoníaco y metano que produce la ganadería, la quema de residuos que producen humos negros, la quema de combustibles y madera en actividades como cocinar, calentar o iluminar hogares.

Según el IDEAM¹ se entiende por contaminación la presencia que existe en el aire de pequeñas partículas o productos secundarios gaseosos que pueden implicar riesgo, daño o molestia para las personas, plantas y animales que se encuentran expuestas a dicho ambiente. La fuente de esta contaminación puede ser de fuentes móviles, fuentes fijas, fijas puntuales y/o fijas dispersas. Por esto es importante la implementación del índice de calidad del aire (IDEAM, s.f.).

El gobierno nacional de Colombia diligenció el decreto 1076 de 2015 donde se describe la estructura y entidades que conforman el sistema de toma de decisiones a nivel ambiental, y la reglamentación vigente para cada uno de los componentes ambientales. En el título cinco (5), el aire, se encuentra consignado el reglamento de protección y control de la calidad del aire donde se establecen las normas y principios generales para la protección atmosférica, mecanismos de prevención, control y atención a episodios de contaminación del aire generadas por fuentes fija y móviles, directrices y competencias para la fijación de las normas de calidad del aire o niveles de inmisión, normas básicas para estándares de emisión y descarga de contaminantes a la atmósfera, emisión de ruido y olores ofensivos, regulación de otorgamiento de permisos de emisión, instrumentos y medios de control y vigilancia. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

A partir del decreto 1076 de 2015 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible expidió la resolución 2254 el 01 de noviembre del año 2017, donde se consignan las normas de calidad del aire o nivel de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire en el

¹ IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) es una entidad del gobierno colombiano que proporciona información mediante estudios sobre el estado y las dinámicas del medio ambiente.

territorio colombiano. En el artículo dos (2) del capítulo uno (1) de la resolución, se establecen los niveles máximos permisibles de contaminantes (Tabla 1) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Tabla 1. Niveles máximos permisibles de cada contaminante

<i>Contaminante</i>	<i>Nivel Máximo Permissible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Tiempo de Exposición</i>
PM_{10}	50	Anual
	100	24 horas
$PM_{2.5}$	25	Anual
	50	24 horas
SO_2	50	24 horas
	100	1 hora
NO_2	60	Anual
	200	1 hora
O_3	100	8 horas
CO	5000	8 horas
	35000	1 hora

Nota: Fuente: Resolución 2254 el 01 de noviembre del año 2017

En el capítulo 4 de la resolución anteriormente mencionada, se consigna la definición del índice de calidad del aire o ICA, la cual lo describe como un valor adimensional que reporta el estado de la calidad del aire en función de un código de colores (Tabla 2) al que están asociadas unos efectos generales que deben ser tenidos en cuenta para reducir la exposición a altas concentraciones por parte de la población. También se encuentran los puntos de corte del ICA (Tabla 3) según los contaminantes de criterio.

Tabla 2. Descripción general del índice de calidad del aire (ICA)

<i>Rango</i>	<i>Color</i>	<i>Estado de la calidad del aire</i>	<i>Efectos</i>
--------------	--------------	--	----------------

0-50	Verde	Buena	La contaminación atmosférica supone un riesgo bajo para la salud
51-100	Amarillo	Aceptable	Posibles síntomas respiratorios en grupos poblacionales sensibles.
101-150	Naranja	Dañina a la salud de grupos sensibles	Los grupos poblacionales sensibles pueden presentar efectos sobre la salud. 1) Ozono troposférico: Las personas con enfermedades pulmonares, niños, adultos mayores y las que constantemente realizan actividad física al aire libre, deben reducir su exposición a los contaminantes del aire. 2) Material Particulado: Las personas con enfermedad cardiaca o pulmonar, los adultos mayores y los niños se consideran sensibles y por lo tanto en mayor riesgo.
151-200	Rojo	Dañina para la salud	Todos los individuos pueden comenzar a experimentar efectos sobre la salud. Los grupos sensibles pueden experimentar efectos más graves para la salud.
201-300	Púrpura	Muy Dañina para la salud	Estado de alerta que significa que todos pueden experimentar efectos más graves para la salud.
301-500	Marrón	Peligroso	Advertencia sanitaria. Toda la población puede presentar efectos adversos graves en la salud humana y están propensos a verse afectados por graves efectos sobre la salud.

Nota. Fuente: Resolución 2254 el 01 de noviembre del año 2017

Tabla 3. Puntos de corte del ICA

Índice calidad de aire				Puntos de corte del ICA													
ICA	Color	Categoría		PM10		PM2.5		CO		SO2		NO2		O3/ 8h		O3/ 1h	
0	50	Verde	Buena	0	54	0	12	0	5094	0	93	0	100	0	106		
51	100	Amarillo	Aceptable	55	154	13	37	5095	10819	94	197	101	189	107	138		
101	150	Naranja	Dañina a la salud de grupos sensibles	155	254	38	55	10820	14254	198	486	190	677	139	167	245	323
151	200	Rojo	Dañina a la salud	255	354	56	150	14255	17688	487	797	678	1221	168	207	324	401
201	300	Púrpura	Muy dañina a la salud	355	424	151	250	17689	34862	798	1583	1222	2349	208	393	402	794
301	500	Marrón	Peligrosa	425	604	251	500	34863	57703	1584	2629	2350	3853	394	795	1185	

Nota. Fuente: Resolución 2254 el 01 de noviembre del año 2017

En Colombia, para medir la calidad del aire según el decreto 1076 del 2015 y la resolución 2254 del 2017, se tienen en cuenta 5 tipos de sustancias que son el material particulado (PM) el

cual se define como un contaminante primario generado por la combustión de combustibles fósiles; para el caso del PM menor de 10 micrómetros (PM_{10}) el mayor precursor es la combustión Diesel, y para el caso del PM menor de 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), se compone por compuestos asociados comúnmente a partículas acidas, combustión de combustibles fósiles, quema agrícola y producción de manufactura (Carlos F. Gaviria, 2011).

Entre las sustancias para medir la calidad del aire también se tiene el monóxido de carbono (CO) el cual es un gas proveniente de una combustión incompleta, es decir, combustión a bajas concentraciones de oxígeno, el dióxido de nitrógeno (NO_2) formado a partir de la combinación entre el óxido nítrico (NO), emitido fundamentalmente por el transporte, generación de energía mecánica y eléctrica, y procesos industriales, y el oxígeno encontrado en la atmósfera, el dióxido de azufre (SO_2) que es un gas reactivo encontrado en la atmósfera y, en su gran mayoría, las emisiones de este componente se deben a la quema de combustibles fósiles por parte de las industrias (IDEAM, 2007).

Y, la última sustancia a tener en cuenta es el ozono troposférico, producido a partir de reacciones químicas complejas de compuestos orgánicos volátiles que se mezclan con el óxido de nitrógeno (NO_x) en presencia de la luz solar, se hace presente en la estratósfera superior, donde protege la tierra de niveles perjudiciales de radiación ultravioleta y en concentraciones más bajas en la tropósfera, donde es el componente principal del smog² fotoquímico antropogénico (IDEAM, 2007).

A nivel nacional en Colombia, se tienen diversos ejemplares de trabajos investigativos como el realizado por Tomas Gonzales en la universidad libre sede bosque popular en la ciudad de Bogotá, donde su objetivo principal fue establecer la calidad del aire en los alrededores de esta

² El smog es una forma de contaminación que afecta el aire.

universidad (Velandia), de acuerdo con la Resolución 610 del 24 de Marzo de 2010 expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) que para el año 2015 (año en el cual se realizó la investigación universitaria) era la resolución con respecto a la normatividad de calidad del aire más actual. En este trabajo se realizaron medidas sobre las principales partículas contaminantes, mediante el uso de equipos de censado, industriales pertenecientes a la línea de Selective High Volume, Air Sampling System y equipos vendidos por la empresa Hi-Q environmental products Company.

Por otra parte, en la universidad de los Andes (Bogotá), se realizan periódicamente análisis de calidad del aire por equipos del departamento de ingeniería civil y ambiental, con el fin de realizar trabajos enfocados al desarrollo de posgrado cuyo objetivo general es el de generar un diagnóstico del problema de contaminación atmosférica de la ciudad, a partir de la información proveída por la autoridad ambiental local. La metodología de estos proyectos incluye la consecución de la información de la red de calidad del aire de la ciudad (operada por la Secretaría Distrital de Ambiente), la organización y validación de dicha información, la construcción de una base de datos y el análisis estadístico de los datos en ésta contenidos (Gaitán, Cancino, & Behrentz, 2007).

Así mismo, en la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, la ingeniera ambiental egresada de dicha universidad, Johana de la paz Cortés Araujo, realizó un trabajo de campo donde nuevamente se emplearon los equipos de grado industrial Hi-Vol. Para la toma muestras, al finalizar este trabajo se concluyó que los datos de calidad del aire recolectados en las estaciones de monitoreo presentaron uniformidad y se encontraron dentro del rango máximo permitido. Los valores medios anuales de PM10 obtenidos para las estaciones de monitoreo están por debajo del límite anual establecido en la Resolución 610 de 2010, no obstante, todas las

estaciones están por encima del límite promedio anual recomendado por la OMS para ese año (Araujo) .

En la Universidad Autónoma del Caribe de la ciudad de Barranquilla, se realizó un trabajo investigativo con relación a la calidad del aire como tesis de grado por parte del ahora ingeniero industrial y egresado, Andrés Felipe De La Hoz Hernández donde propuso un diseño metodológico para medir la calidad del aire en zonas sujetas a contaminación por fuentes móviles en la ciudad de Barranquilla, específicamente en el sector comprendido en la calle 72 entre carreras 38 7 58 (De La Hoz Hernández).

En el año 2017, fue llevada a cabo una investigación por el egresado Sergio Pacsi de la universidad Nacional Agraria la Molina en Lima, Perú, donde se realizó una análisis de la variación temporal y espacial de la concentración de materiales contaminantes suspendidos en el aire en los alrededores del área metropolitana de la universidad utilizando datos obtenidos y almacenados por la entidad DIGESA (Dirección General de Salud Ambiental) siendo este un órgano normativo del ministerio de salud de Perú. A partir de los datos proporcionados se concluyó, de manera resumida que, estacionalmente en el otoño los valores de PM_{10} son máximos y mínimos durante la primavera austral, la variación multianual del PM_{10} muestra que casi todas las estaciones de monitoreo, superan significativamente los valores límites del ECA³ para PM_{10} ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y, que existe una disminución moderada de los niveles de PM_{10} en casi todas las estaciones de monitoreo, y que la variación mensual del $PM_{2.5}$ presenta mayores valores durante otoño y los mínimos durante invierno (Pacsi).

³ ECA o estándar de Calidad Ambiental es una herramienta de gestión ambiental en Perú, que fija los niveles de concentración de elementos y sustancias presentes en el ambiente que no representan riesgos para la salud y el ambiente.

De manera más local, específicamente en la ciudad de Barranquilla, se lleva a cabo ,financiado por la alcaldía de dicha ciudad, un análisis de la calidad del aire a cargo del laboratorio ambiental EPA Barranquilla verde y desarrollado por el equipo de su subdirección de gestión ambiental, donde se otorga de manera mensual un análisis detallado de la calidad del aire obtenido a través de tres (3) estaciones de monitoreo, dos (2) fijas y una (1) móvil, ubicadas estratégicamente en el área urbana de la ciudad, censando y analizando diariamente diferentes partículas y materiales contaminantes, para así conmensurar un análisis anual siendo este la conclusión de todos los trabajos mensuales entregados a lo largo del año. Esto con el fin de monitorear y, en dado caso que se requiera, gestionar acciones que disminuyan el impacto ambiental en la ciudad de Barranquilla.

Capítulo 3

Análisis de Resultados y Propuesta Ingenieril

Al plantear el presente proyecto que tiene como base estimar la calidad se hizo absolutamente necesario una profunda investigación para establecer qué tipo de sustancias y compuestos determinan la calidad del aire. Durante la investigación, se encuentran con un conjunto de normativas, regulaciones y protocolos dispuestos por el estado colombiano para la prevención, control y atención de episodios de contaminación, protección atmosférica y fijación de niveles permisibles de emisión de sustancias contaminantes específicas. Dentro de dichas normativas se hallan un grupo de seis contaminantes principales para establecer el índice de calidad del aire (ICA), estos son el monóxido de carbono, material particulado PM10, material particulado PM2.5, dióxido de azufre, ozono troposférico y dióxido de nitrógeno. De los cuales, en el presente proyecto, se tienen en cuenta el monóxido de carbono, el material particulado tanto PM10 como

PM2,5 y el ozono troposférico, y el NOx u óxidos de nitrógeno que se incluyó sólo de manera informativa, los contaminantes dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno.

Paralelamente, se investigaron los sensores a utilizar para cada una de las variables, y se determinó cuáles de estas incluir o no dependiendo de la accesibilidad y costos de cada sensor.

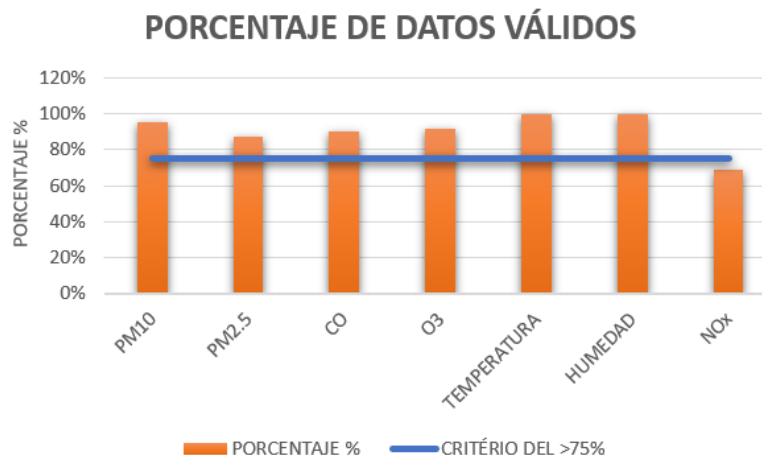
Seguidamente, se decide desarrollar el proyecto sobre la plataforma Arduino iniciando así el proceso de diseño del prototipo del dispositivo, la calibración de los sensores, la integración de los códigos en el IDE⁴ de Arduino en conjunto con la aplicación móvil desarrollada en AppInventor2, para el almacenamiento de los datos censados.

Una vez culminado el proceso de desarrollo del prototipo del dispositivo y la aplicación, se realiza una prueba de campo para evaluar el funcionamiento del sistema y corregir errores de calibración u otros expuestos durante dicha prueba. Luego, se realiza el montaje del dispositivo y, posteriormente, se establece un periodo 28 días donde, durante 12 horas diarias, se lleva a cabo el trabajo de campo del censo de las variables.

Al cabo de los 28 días propuestos se les aplica a los datos recolectados el criterio de validación del >75%, en la gráfica (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) se puede observar que en el periodo escogido seis (CO, O3, PM10, PM2.5, temperatura y humedad) de las 7 variables censadas cumplieron con dicho criterio. El parámetro que no cumplió con el criterio del >75% (NOx) se presenta sólo de manera informativa y no será incluido en la determinación del ICA.

Gráfica 1. *Porcentajes de datos válidos*

⁴ IDE: Entorno de Desarrollo Integrado



Nota: Porcentaje de datos válidos por contaminantes según el criterio del >75%.

A continuación, se realiza un tratamiento de datos extenso donde se obtiene el promedio por hora y el promedio diario (Véase Anexo J) de cada contaminante censado para así dar inicio al análisis de los resultados obtenidos. (En el Anexo K se encuentran graficados los promedios por hora de cada uno de los 28 días escogidos para realizar el trabajo de campo).

Al finalizar el censado de los 28 días se realiza una comparativa con los reportes de Barranquilla verde para validar los resultados del dispositivo. De todos los días censados se toma el día 5 del mes de mayo para realizar la comparación de los datos recolectados por el dispositivo ESCA-MC (Tabla 5) y el reporte de la entidad Barranquilla Verde⁵ (Tabla 4) del día escogido. Se observa que los valores entregados por el dispositivo ESCA-MC son muy parecidos a los que presenta la entidad Barranquilla verde en su informe de calidad del aire dando a entender que el dispositivo si es válido para la estimación del ICA.

Tabla 4. ICA 5 de mayo Barranquilla Verde

⁵ Barranquilla Verde es un Establecimiento Público Ambiental (EPA) que promueve, orienta y regula la protección de los recursos naturales y la sostenibilidad ambiental, como garantía de la calidad de vida de los ciudadanos (Barranquilla Verde EPA, 2020)

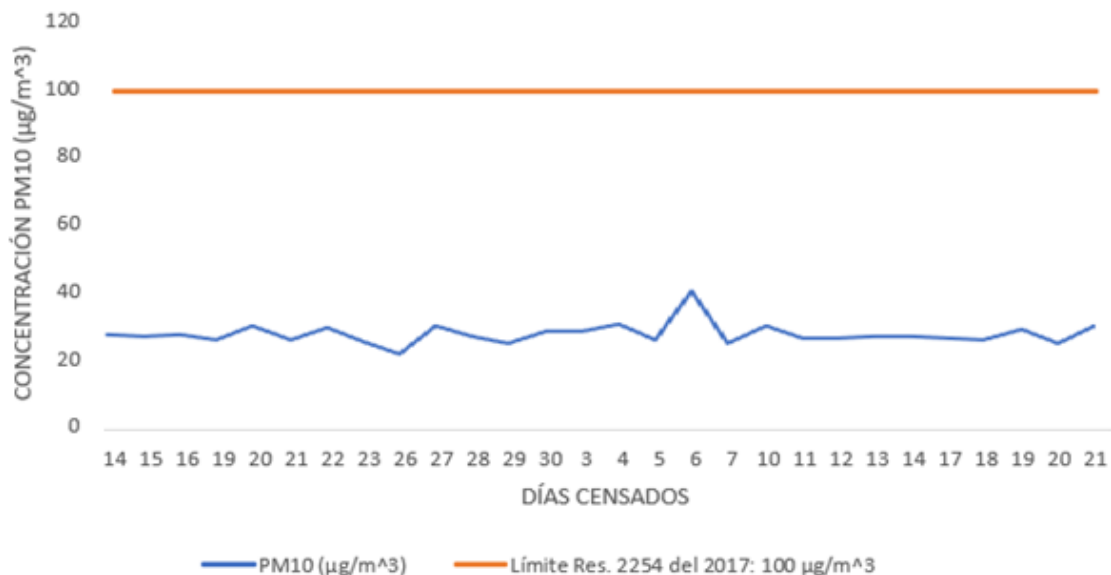
Hora	PM ₁₀			PM _{2.5}		CO		SO ₂		
	Escuela de policía	Tres Ave María	Móvil	Escuela de policía	Móvil	Escuela de policía	Tres Ave María	Escuela de policía	Tres Ave María	Móvil
0:00	410	219	218	28.5	32.9	4.3	2.3	0.06	0.10	0.03
1:00	40.7	22.1	21.9	28.6	33.1	4.3	2.3	0.06	0.10	0.03
2:00	40.3	22.5	21.6	28.5	33.3	4.3	2.3	0.06	0.10	0.03
3:00	40.1	22.7	21.7	28.7	33.6	4.3	2.3	0.06	0.10	0.03
4:00	40.0	22.1	21.9	29.0	34.1	4.3	2.3	0.06	0.10	0.03
5:00	39.4	21.4	21.5	29.5	33.6	4.2	2.3	0.06	0.10	0.04
6:00	39.2	21.0	21.2	29.9	33.5	4.2	2.3	0.06	0.10	0.04
7:00	38.5	20.3	20.9	29.4	33.4	4.0	2.3	0.07	0.10	0.04
8:00	37.7	18.7	19.6	28.0	31.5	3.9	2.1	0.07	0.09	0.04
9:00	37.0	18.0	18.9	26.8	30.5	3.8	2.0	0.07	0.09	0.04
10:00	37.1	18.0	18.8	25.6	29.6	3.8	2.0	0.07	0.09	0.04
11:00	37.1	18.4	19.0	25.6	29.4	3.8	2.0	0.07	0.09	0.04
12:00	37.8	18.9	19.3	25.6	29.7	3.9	2.0	0.06	0.08	0.04
13:00	38.0	19.6	19.3	25.7	29.7	3.9	2.0	0.06	0.08	0.04
14:00	38.5	19.4	19.8	25.8	30.2	3.9	2.0	0.06	0.08	0.05
15:00	38.8	19.6	19.8	25.6	30.8	3.9	2.0	0.06	0.08	0.05
16:00	39.6	20.5	19.9	25.9	31.5	4.0	2.0	0.06	0.08	0.05
17:00	40.6	21.5	20.2	26.1	32.4	4.0	2.0	0.07	0.06	0.05
18:00	40.6	22.5	20.6	26.1	33.3	4.0	2.1	0.07	0.05	0.05
19:00	41.0	22.5	20.8	26.0	34.2	4.0	2.2	0.07	0.05	0.05
20:00	41.6	22.5	20.8	26.1	34.5	3.9	2.2	0.07	0.04	0.05
21:00	41.7	22.5	20.5	26.6	33.5	3.9	2.3	0.08	0.03	0.06
22:00	41.6	22.5	20.6	27.2	33.4	4.0	2.4	0.08	0.02	0.06
23:00	41.6	22.5	20.3	27.7	33.9	4.0	2.5	0.08	0.02	0.06

Nota: Fuente: Reporte índice de calidad del aire de Barranquilla Verde. Recuperado de: http://barranquillaverde.gov.co/storage/app/media/calidad-aire/050521_reporte_ica.pdf

Tabla 5. ICA 5 de mayo dispositivo ESCA-MC

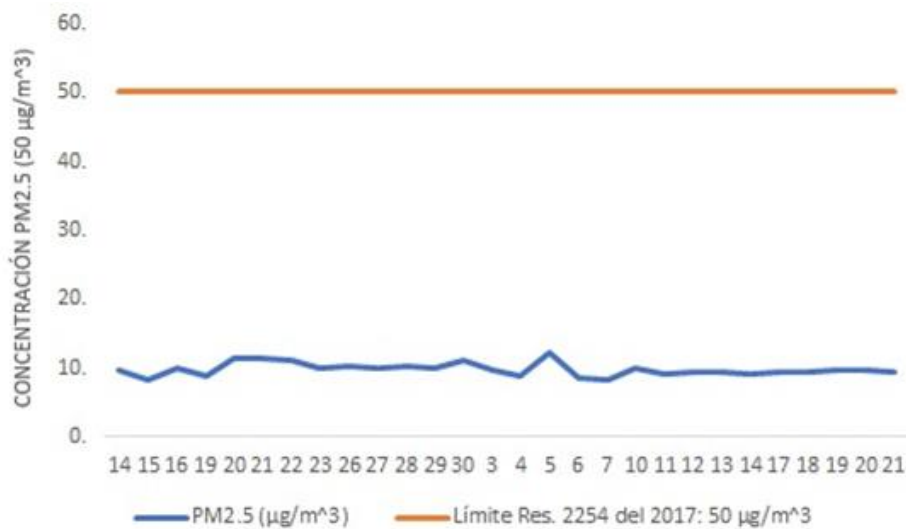
TABLA ICA 5 DE MAYO					
DÍA	HORA	PM10	PM2.5	CO	O3
5	06:00:00 a. m.	31	34	2	38
5	07:00:00 a. m.	30	39	2	36
5	08:00:00 a. m.	28	43	2	37
5	09:00:00 a. m.	28	39	2	37
5	10:00:00 a. m.	31	43	2	36
5	11:00:00 a. m.	33	39	2	36
5	12:00:00 p. m.	29	42	2	36
5	01:00:00 p. m.	27	37	2	36
5	02:00:00 p. m.	26	36	1	36
5	03:00:00 p. m.	29	38	1	38
5	04:00:00 p. m.	33	88	2	37
5	05:00:00 p. m.	28	42	2	36

Gráfica 2. Comportamiento del PM10 durante 28 días



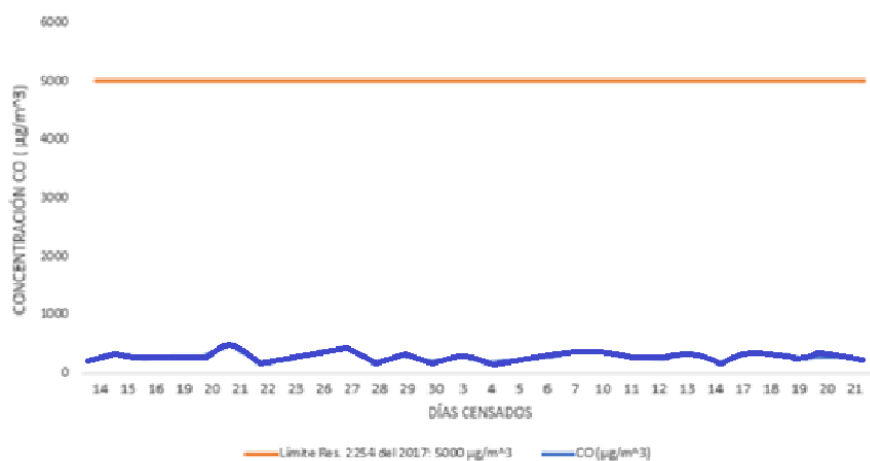
Los datos registrados para el material particulado pm10 tuvieron en promedio valores entre 30ug/m3 y 20ug/m3 a lo largo de las 4 semanas de mediciones por lo que está muy por debajo del límite máximo impuesto en la resolución 2247 de 2017 que es de 100 µg/m³, exceptuando un ligero aumento de esta variable los días 5, 6,7 de mayo donde se resaltar que estos días, debido a las protestas por el paro nacional, vías principales fueron obstaculizadas por lo que se vio un aumento significativo del tráfico vehicular por la vía de la carrera 38 con intersección de la calle 76.

Gráfica 3. Comportamiento PM2.5 durante 28 días



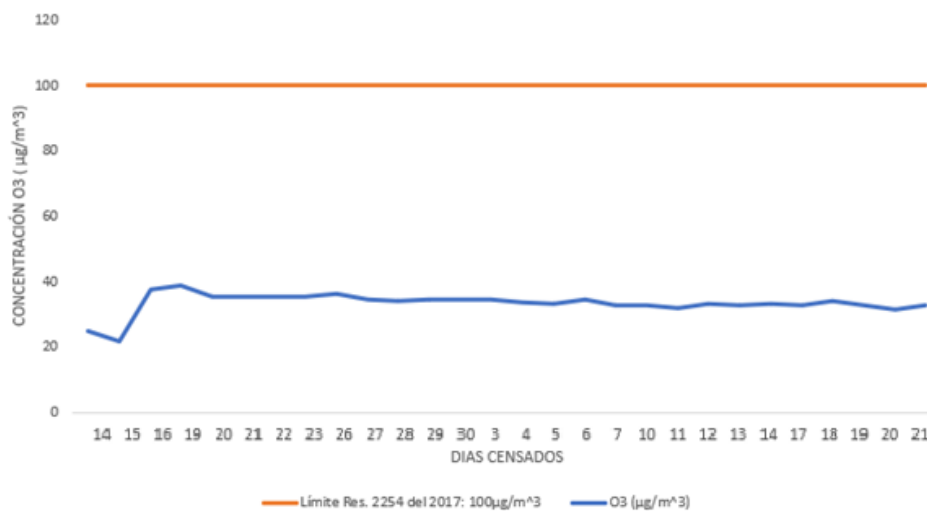
Para el material particulado PM2.5 se obtienen similitudes en la forma de la gráfica con la de PM10 dado que sus valores promedio se mantienen estables en $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ con ligeros aumentos por encima y ligeros valores por debajo, destacando de igual forma los picos promedio desde el día 5 de mayo donde se ve un notable incremento debido al elevado tráfico vehicular por motivos de las protestas.

Gráfica 4. Comportamiento monóxido de carbono durante 28 días



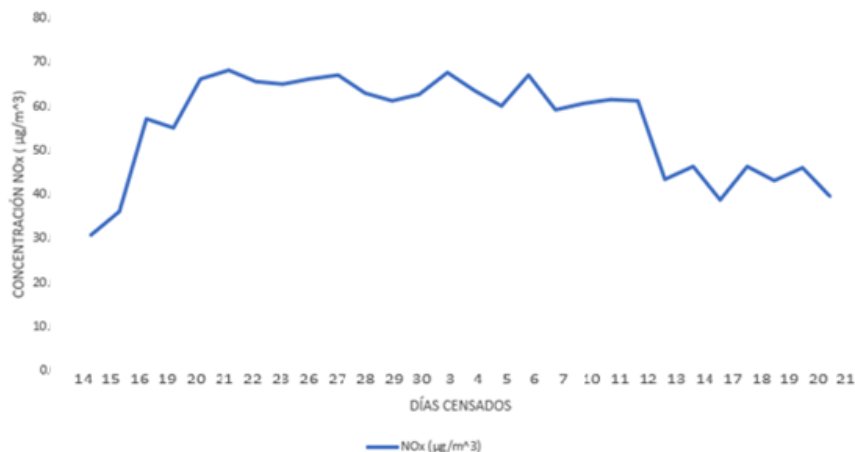
En el gráfico del monóxido de carbono se observa que sus valores promedio están entre $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $270 \mu\text{g}/\text{m}^3$ teniendo pocos casos donde el CO llega picos altos entre los $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ siendo estos de los valores más altos pero que aún se encuentran muy por debajo del límite máximo que en esta variable contaminante es de $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Gráfica 5. Comportamiento ozono durante 28 días



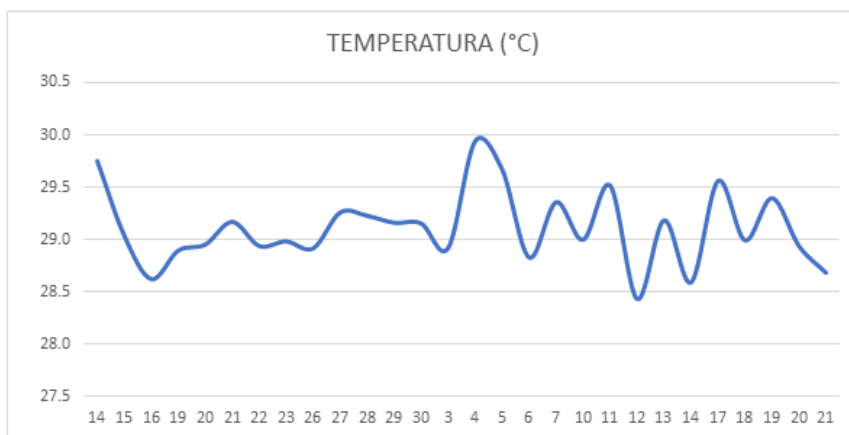
En la gráfica 5, se obtiene el ozono se mantuvo estable la mayoría de los días censado, con intervalos entre 20 y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que nuevamente se encuentran dentro del rango aceptable y por debajo del nivel máximo de ozono que según la normativa es de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Gráfica 6. Comportamiento Óxidos de Nitrógeno durante 28 días

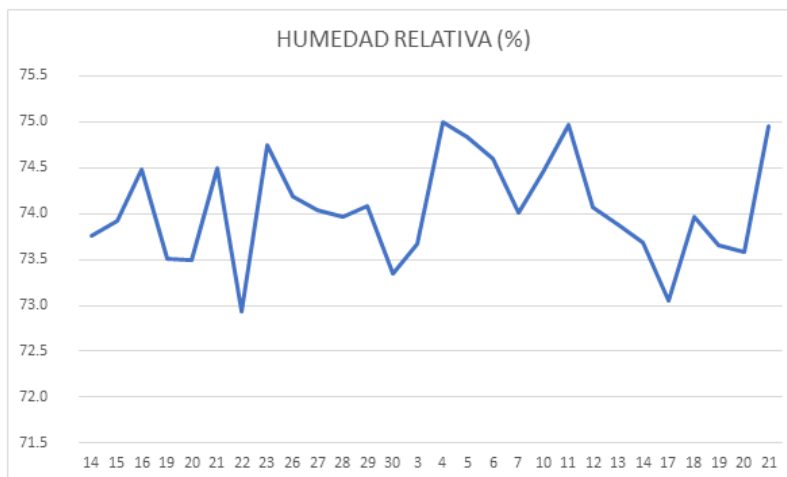


Esta grafica representa los niveles promedio mensuales de los óxidos de nitrógeno que, si bien no entra dentro del cálculo del índice de calidad del aire, decidimos añadirlo por motivos informativos, ya que no está regulada por resolución 2247 de 2017 y tampoco puede ser comparada con la variable contaminante dióxido de nitrógeno, aunque si da una idea del comportamiento de esta sustancia. En la gráfica se puede observar que la concentración de NOx oscila entre los $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, resaltando un aumento de esta variable, las primeras 3 semanas del mes censado y una notable disminución la última semana, en este caso no es posible referenciar un límite máximo debido a lo mencionado anterior mente.

Gráfica 7. Comportamiento Temperatura durante 28 días

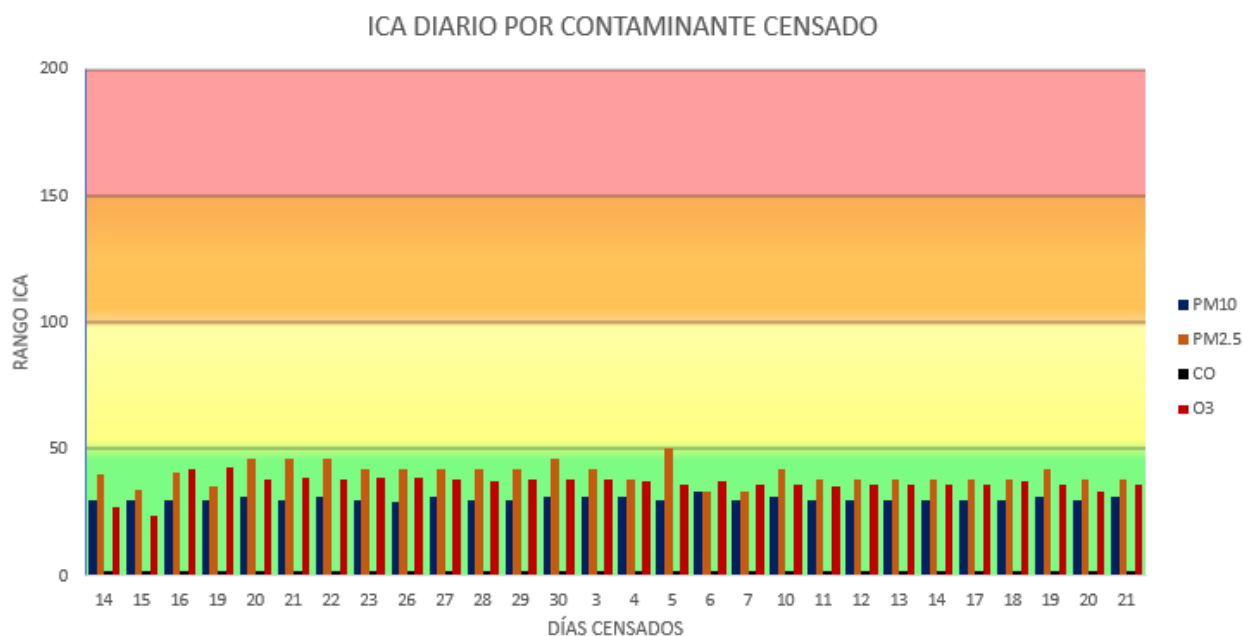


Gráfica 8. Comportamiento Humedad Relativa durante 28 días



Al analizar las gráficas 7 y 8, las variables meteorológicas de temperatura y humedad relativa, no se encuentra una relación directa por sobre las variables contaminantes censadas, teniendo un promedio mensual de 29°C y humedad relativa entre el 72% y 73% características de la ciudad de Barranquilla.

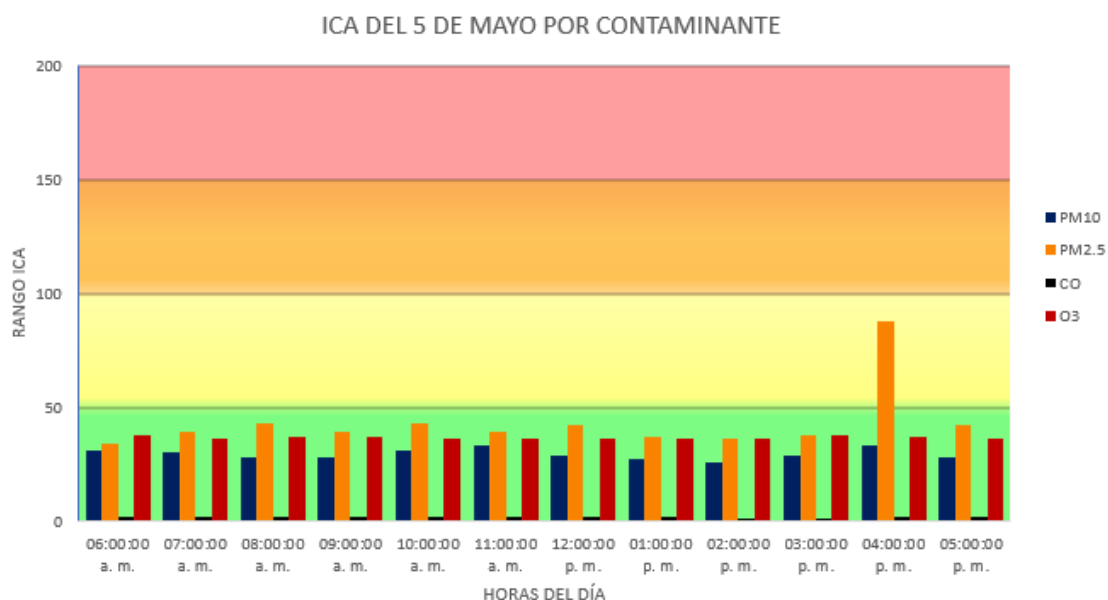
Gráfica 9. ICA diario por cada contaminante censado durante 28 días



En la gráfica 9 se presenta el índice de calidad de aire (ICA) de los promedios diarios de cada variable contaminante censada, recordando que la separación por colores hace referencia a los puntos de corte del ICA respecto al contaminante criterio (Tabla 3), siendo verde para un nivel de calidad del aire bueno, amarillo para moderado, naranja para un nivel de contaminación riesgoso para personas sensibles o con enfermedades respiratorias y rojo indicando un nivel de contaminación de alto riesgo para todo tipo de personas. Retomando los datos obtenidos, se resalta a la vista que todos se encuentran en la franja verde, dando a entender que se encuentra en la categoría “BUENO” según el ICA y, que no es un riesgo para la salud, aunque si hay que destacar que valores como el pm2.5 y pm10 sobrepasan el 50% del rango de esa categoría, llegando en

ocasiones específicas muy cerca del rango entre 51-100, es decir, de calidad del aire “ACEPTABLE”. Variables como el ozono mantienen un ICA promediando el 50% por lo que no hay problema con este, con el CO monóxido de carbono se observa un ICA muy bajo con un promedio de 2. Por sobre todo también se puede destacar como el día 5 hubo un aumento significativo comparado con los demás días donde la variable de PM2.5 está a un valor de entrar en la categoría del ICA “ACEPTABLE”.

Gráfica 10. ICA del promedio por hora del día 5 de mayo



Al analizar en detalle el promedio del índice de calidad del aire el día 5 de mayo se observa como alrededor de las 4 de la tarde, la variable pm2.5 se encuentra en el rango del ICA de 51-100, es decir, “ACEPTABLE” debido al aumento masivo del flujo vehicular gracias a las protestas presentada durante ese día en la ciudad de Barranquilla.

Capítulo 4

Conclusiones

Al finalizar el desarrollo del proyecto se llega a la conclusión que si es posible desarrollar un sistema tecnológico dispositivo-aplicación móvil, para el censado de variables contaminantes convirtiéndose así en una herramienta muy útil para estimar la calidad del aire ICA, en este caso teniendo en cuenta cuatro variables las cuales son el monóxido de carbono, ozono troposférico, el PM10 y el PM2.5 escogidas como resultado de un proceso de investigación extenso para seleccionarlas dependiendo principal mente de qué tipo de sensores y/o módulos pueden ser usados para censarlas y la asequibilidad, eficiencia y portabilidad de los mismos.

Por otra parte, es evidente que, a través del desarrollo del sistema tecnológico realizado en el presente proyecto, los datos recolectados comprados con los datos obtenidos por otros equipos como los utilizados por la entidad Barranquilla Verde, son semejantes por lo tanto se puede determinar que el sistema tecnológico tiene es fiable para estimar el índice de calidad del aire ICA.

Para finalizar, igualmente se exalta que el presente proyecto puede ser replicado o utilizado por estudiantes, docentes o entidades ambientales en caso de estar interesados en un estudio ya sea de la calidad del aire, de alguna partícula o compuesto en específico, resaltando una característica muy importante del equipo desarrollado que es su portabilidad y asequibilidad en cuanto a precio además de la gama de posibilidades de expansión a otros módulos o sensores del dispositivo.

Capítulo 5

Recomendaciones

Las recomendaciones para futuros proyectos basados en esta tesis, es ampliar el desarrollo de la aplicación móvil, para que esta pueda no sólo mostrar los valores obtenidos en tiempo real, sino también generar graficas en tiempo real los datos obtenidos de las variables contaminantes censadas, se recomienda también que el almacenamiento de los datos recolectados sea en un servidor, también la posibilidad de desarrollar una aplicación de escritorio para que no sea de uso limitado para dispositivos móviles, implementar un módulo Wifi en el equipo para la conexión directa a una base de datos, todo lo anterior para mejorar la eficiencia del sistema tecnológico.

Bibliografía

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s.f.). *IDEAM*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/contaminacion-atmosferica#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20atmosf%C3%A9rica%20es%20la%2Cencuentran%20expuestas%20a%20dicho%20ambiente.>
- (18 de 04 de 2021). Obtenido de ConceptoDefinición: <https://conceptodefinition.de/aire/>
- AQUAE Fundación* . (s.f.). Obtenido de <https://www.fundacionaquae.org/causas-y-tipos-de-la-contaminacion-del-aire/>
- Araujo, J. d. (n.d.). Tesis. *Air pollution evaluation in ambient air of Manizales COPs y PM10*. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Manizales. Retrieved from <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21382/4101005.2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ARDOBOT. (s.f.). *Módulo Sensor MQ-135 Calidad del Aire*. Obtenido de <https://www.ardobot.co/modulo-sensor-mq-135-calidad-del-aire.html>
- Barranquilla Verde EPA. (2020). *Barranquilla Verde*. Obtenido de ¿QUIÉN ES BARRANQUILLA VERDE?: <http://barranquillaverde.gov.co/quien-es-barranquilla-verde#:~:text=Es%20un%20Establecimiento%20P%C3%ABlico%20Ambiental,de%20vida%20de%20los%20ciudadanos.>
- Berdejo, J., Saltaín, M., & Castillo, M. (02 de 2021). Reporte. *Reporte Mensual Calidad de Aire*. Barranquilla.
- Carlos F. Gaviria, C. B. (2011). *Contaminación por material particulado (pm_{2,5} y pm₁₀) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009)*. Medellín. Obtenido de Contaminación por material particulado (pm_{2,5} y pm₁₀) y consultas por enfermedades

respiratorias en Medellín (2008-2009):

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5079414>

Convenio Interadministrativo 0133-2015 celebrado entre el EPA y la Universidad de. (12 de 2015). DISEÑO DEL SISTEMA INTELIGENTE DE MONITOREO DE LA CALIDAD AMBIENTAL DEL DISTRITO DE CARTAGENA. Cartagena.

De La Hoz Hernández, A. F. (2008). Tesis de grado. *Diseño metodológico para medir la calidad del aire en zonas sujetas a contaminación por fuentes móviles en la ciudad de Barranquilla, específicamente en el sector comprendido en la calle 72 entre carreras 38 y 58*. Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla. Obtenido de http://koha.uac.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=18188&query_desc=contaminaci%C3%B3n%20del%20aire%20%23relevance_asc

EPA. (s.f.). *United States Environmental Protection Agency*. Obtenido de <https://espanol.epa.gov/espanol/la-contaminacion-del-aire-y-las-enfermedades-del-corazon>

EPA. (s.f.). *United States Environmental Protection Agency*. Obtenido de <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics>

Gaitán, M., Cancino, J., & Behrentz, E. (2007). Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. *Revista de ingeniería. Universidad de los Andes* . Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n26/n26a11.pdf>

IDEAM. (s.f.). Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>

IDEAM. (Diciembre de 2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. *Nota técnica del IDEAM*.

MAVDT. (Febrero de 2008). *IDEAM*. Obtenido de

<http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/Protocolo+para+el+Monitoreo+y+seguimiento+de+la+calidad+del+aire.pdf/6b2f53c8-6a8d-4f3d-b210-011a45f3ee88>

Mézáros, E. (1999). Artículo académico. *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*. Akadémiai Kiado.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (26 de 05 de 2015). Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. 412-460. Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (01 de 11 de 2017). Resolución No. 2254. 01-11. Bogotá, Colombia. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res%202254%20de%202017.pdf>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. . (s.f.). *SIAC*. Obtenido de Sistema de Información Ambiental de Colombia: <http://www.siac.gov.co/normativa>

NAYLAMP. (s.f.). *Sensor de temperatura y humedad relativa DHT11*. Obtenido de <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/57-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht11.html>

OMS. (s.f.). Obtenido de Organización Mundial De La Salud:

https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/background_information/es/

Pacsi, S. (s.f.). Análisis científico. *ANALISIS TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA CALIDAD DEL AIRE DETERMINADO POR MATERIAL PARTICULADO PM10 Y PM2,5 EN LIMA METROPOLITANA*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima. Obtenido de

https://www.researchgate.net/publication/311958459_ANALISIS_TEMPORAL_Y_ESPACIAL_DE_LA_CALIDAD_DEL_AIRE_DETERMINADO_POR_MATERIAL_PARTICULADO_PM10_Y_PM25_EN_LIMA_METROPOLITANA

PatentStorm. (01 de 05 de 2001). Obtenido de

<https://archive.is/20120914001112/http://www.patentstorm.us/patents/6224560-description.html#selection-19.0-19.11>

PRTR España. (s.f.). *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Obtenido de <https://prtr-es.es/NOx-oxidos-de-nitrogeno,15595,11,2007.html>

Querol, X. (2008). Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. *Revista Española de salud pública*, 1-2.

Refrigerating Facilities 1: Física Aplicada. (1997). En J. J. Pierre J. Rapin. Barcelona:

Marcombo. Obtenido de

https://books.google.es/books?id=LAc3sKX0B_MC&pg=PA427&dq=aire+composici%C3%B3n&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjLx-_Pj5XSAhWJLsAKHWGXC-8Q6AEIJDAB#v=onepage&q=aire20composici%C3%B3n&f=false

Velandia, T. F. (s.f.). Trabajo de grado. *Determinación de la calidad del aire en la universidad libre seccional Bogotá sede bosque popular*. Universidad libre, Bogotá. Obtenido de

<https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/7951>

Vignolo, I. d. (06 de 05 de 2014). *Intendencia Montevideo*. Obtenido de

<https://montevideo.gub.uy/areas-tematicas/ambiente/calidad-del-aire/principales-contaminantes-del-aire>

Anexos

Anexo A. Datasheet Sensor MQ7

<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-7.pdf>

Anexo B. Datasheet Sensor MQ135

https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MQ-135_Hanwei.pdf

Anexo C. Datasheet Sensor MQ131

https://www.allelectronics.com/mas_assets/media/allelectronics2018/spec/MQ-131.pdf

Anexo D. Datasheet Sensor PMS 5003

<https://drive.google.com/file/d/0BzaKjvCRihgbc1JOdERkenl0ems/view>

Anexo E. Datasheet DHT11

<https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>

Anexo F. Código Arduino dispositivo ESCA-MC

<https://drive.google.com/file/d/1ihsz1MmEdW8AKGx0c9fBgWc-JE9K6FGp/view?usp=sharing>

Anexo G. Datasheet modulo Bluetooth HC-05

https://components101.com/asset/sites/default/files/component_datasheet/HC-05%20Datasheet.pdf

Anexo H. Código Aplicación Móvil

<https://drive.google.com/file/d/1hqjEIYddjlQ7YqhTfFk41vsaDj2BEX1q/view?usp=sharing>

Anexo I. Código de fuente (.aia) aplicación móvil

<https://drive.google.com/file/d/1ZCUB92TnhsLMQc6DDGiQC-TT3hlDDJLK/view?usp=sharing>

Anexo J. Promedio por día y por hora de cada contaminante

<https://www.mediafire.com/file/tgc2a6ae69k8h63/PROMEDIO+POR+HORA+Y+PROMEDIO+DIARIO.pdf/file>

Anexo K. *Gráficas diarias de promedios por hora*

<https://drive.google.com/file/d/1booQ46EnYh6okrnBl6udPjxwYGOMQVv4/view?usp=sharing>