

DESARROLLO DE UN MUESTREADOR ATMOSFÉRICO DE BAJO COSTO Y
DE CARÁCTER DIDÁCTICO

FABIAN ENRIQUE GUTIERREZ ANGULO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2017

DESARROLLO DE UN MUESTREADOR ATMOSFÉRICO DE BAJO COSTO Y
DE CARÁCTER DIDÁCTICO

Fabián Enrique Gutiérrez Angulo

Trabajo de grado

Para optar por el título de Ingeniero ambiental

Director

Kento Taro Magara Gómez PhD

Profesor Facultad de Ingeniería Ambiental

Universidad Pontificia Bolivariana

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2017

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado.

Firma del presidente del Jurado.

Firma del presidente del Jurado.

Martes 17 de octubre de 2017

Fabia Enrique Gutierrez Angulo

“Declaro que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad” Art 82 Régimen Discente de Formación Avanzada.

Firma

<inserte texto cliché aquí>

Fabian Enrique Gutierrez Angulo

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS.....	15
1 Objetivo general.....	15
2 Objetivos específicos.....	15
Marco teórico	16
3 Contaminación atmosférica	16
3.1 Contaminantes de criterio	16
3.1.1 Material particulado	17
3.1.2 Partículas gruesas inhalables (<i>Inhalable coarse particles</i>).....	17
3.1.3 Partículas finas (<i>Fine particles</i>)	17
3.1.4 Monóxido de carbono.....	17
3.1.5 Ozono troposférico	18
3.1.6 Óxidos de azufre	18
3.1.7 Óxidos de Nitrógeno.....	18
4 El índice de calidad de aire (ICA)	19
4.1 Calculo del ICA.....	19
4.2 NowCast AQI	20
4.3 InstantCast.....	21
5 Monitoreo de calidad de aire.....	21
5.1 El muestreo activo	21
5.2 El muestreo pasivo	21
5.3 Monitoreo fijo	22
5.4 Redes de monitoreo atmosférico	22

5.5	Métodos de referencia para el muestreo atmosférico	22
6	Sensores de calidad de aire	26
6.1	Sensores de tiempo real	26
6.2	Sensores postprocesados	26
6.3	Sensores electroquímicos de óxido de metal (MO _x)	27
6.4	Principio de operación	27
6.5	Efectos de la temperatura.....	27
6.6	Efectos de la humedad.	28
6.7	Sensores MQ.....	28
6.8	Sensores ME	29
6.9	Sensores <i>MiCs</i>	29
6.10	Sensores catalíticos	29
6.11	Sensores MP	30
6.12	Sensores MG.....	30
6.13	Sensores Ópticos	31
6.14	Métodos de calibración para sensores de bajo costo.....	32
7	Otros parámetros de importancia	33
7.1	Humedad	33
7.2	Temperatura	34
7.3	Presión Atmosférica.....	34
7.4	Luz ambiental	34
8	Parámetros de calidad para muestreo atmosférico.	34
9	Tecnología digital.....	35
9.1	Arduino	35

9.2	Shields Arduino.....	36
9.2.1	Shield Wi-fi.....	37
9.2.2	Shield SD.....	37
9.3	Fritzing.....	37
9.4	JavaScript y Node.js.....	37
9.5	Git.....	38
9.6	GitHub.....	38
9.7	Protocolo de comunicación I2C.....	38
	Metodología.....	39
10	Etapa 0: Selección de sensores y tecnología.....	39
10.1	Material particulado.....	40
11	Etapa 1: Desarrollo del hardware.....	40
11.1	Sensor de humedad y temperatura RHT03:.....	40
11.2	Sensor de presión Barométrica BMP180.....	41
11.3	Sensor de luminosidad TSL2561.....	42
11.4	Sensor <i>Shinyei</i> PPD42NS.....	42
11.5	Sensor MQ-131 de baja concentración.....	43
11.6	Sensores ME03-SO2, ME03-SO2 y módulo ZE03-SO2.....	43
11.7	Circuito electrónico.....	44
12	Etapa 2: Desarrollo del software.....	46
12.1	Generalidades.....	46
12.2	Estructura del Cliente.....	47
12.2.1	Cálculo de ICA.....	47
12.2.2	Gráfico histórico.....	47

12.2.3	Estructura tipo <i>Single Page Application</i> (SPA).....	47
12.2.4	Diseño <i>responsive</i>	48
12.3	Estructura del servidor.....	48
12.3.2	Estructura de la base de datos.	50
13	Etapa 4: Prueba y calibración de los sensores.	52
13.1	Sensores Meteorológicos	53
13.2	Sensores de gas.....	53
13.3	Sensor de material particulado	54
	Resultados y discusión	55
14	Detalles técnicos del equipo de monitoreo.....	55
14.1	Precios.....	56
15	Detalles técnicos de la plataforma	57
16	Resultados de calibración y puesta en marcha del equipo.	58
16.1	Sensores de gas.....	59
16.1.1	Ozono	59
16.2	Sensor de material particulado	60
16.3	Sensores meteorológicos	61
	Conclusiones	65
	Recomendaciones	66
	Bibliografía.....	68
	Anexos.....	75
17	Enlaces adicionales	75
18	Gráficos comparativos	75

Ilustraciones

Ilustración 1. Sensor óptico por principio de dispersión	31
Ilustración 2: Desarrollo metodológico del proyecto.....	39
Ilustración 3. Prototipo funcional con todos sus componentes.	45
Ilustración 4. Prototipo final.....	46
Ilustración 5. Arquitectura del prototipo.....	47
Ilustración 6. Tomas de pantalla de la plataforma vista desde PC y móvil	48
Ilustración 7: Documentación alojada en la página web del proyecto.....	52
Ilustración 8: Diagrama del dispositivo, tal como se muestra en la documentación técnica. Realizado con el software fritzing	58
Ilustración 9. Resultados de calibración del ozono con respecto al equipo de referencia, promedios de 1h	59
Ilustración 10. Resultados de calibración Dióxido de azufre con respecto al equipo de referencia, promedios de 1h.	60
Ilustración 11. Resultados de calibración del PM ₁₀ con respecto al equipo de referencia, promedios de 1h y 3h, respectivamente	61
Ilustración 12. Resultados de calibración de humedad con respecto al equipo de referencia, promedios de 1h	62
Ilustración 13. Resultados de calibración de la temperatura con respecto al equipo de referencia, promedios de 1h	62
Ilustración 14. Resultados de calibración del de la presión. con respecto al equipo de referencia, promedios de 1h	63
Ilustración 15. Resultados de calibración del ozono con respecto al equipo de referencia, promedios de 1h	64
Ilustración 16. Comparación Material Particulado (mg/m ³), Arduair vs dusttrack..	75
Ilustración 17. Comparación Ozono (ppb) arduair vs Sabio 6030 Ozone Analyzer	76
Ilustración 18. Comparación Temperatura, Arduair vs estación acrópolis	76
Ilustración 19. Comparación presión, Dispositivo vs Estación Acrópolis	76
Ilustración 20. Comparación Humedad, Arduair vs estación Acrópolis.....	77
Ilustración 21. Comparación irradiancia Arduair vs Estación Acrópolis	77

Ilustración 22. Pantallas de selección y visualización de datos, Pantallas de Manual de usuario y añadir nuevo dispositivo	78
--	----

Tablas

Tabla 1. Puntos de corte del ICA	19
Tabla 2. Principales Métodos de referencia de la EPA	24
Tabla 3. Dispositivos MQ disponibles y detalles técnicos	28
Tabla 4. Dispositivos ME disponibles y detalles técnicos	29
Tabla 5. Dispositivos ópticos disponibles y detalles técnicos	31
Tabla 6. Valores para mediciones no regulatorias	35
Tabla 7. Especificaciones técnicas de la placa Arduino MEGA	36
Tabla 8. Diseño de la API de la plataforma	49
Tabla 9. Detalles técnicos del prototipo	55
Tabla 10. Costos del equipo desarrollado	56
Tabla 11. Enlaces adicionales	75

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Desarrollo de un muestreador atmosférico de bajo costo y de carácter didáctico

AUTOR(ES): Fabian Enrique Gutierrez Angulo

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Kento Taro Magara Gómez

RESUMEN

Con el propósito de ofrecer a los estudiantes de ingeniería ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana-Bucaramanga la oportunidad de conocer aplicaciones reales del conocimiento recibido en clase se desarrolló un prototipo de muestreador atmosférico, capaz de medir concentraciones de contaminantes de criterio (CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂ y NO₂) y algunas variables meteorológicas (temperatura, humedad, irradiancia y presión barométrica), así como un conjunto cliente/servidor online el cual almacena y permite visualizar los datos registrados por el dispositivo de muestreo Junto con el muestreador se incluye la documentación técnica y el manual del usuario. Se realizó además una prueba piloto con el prototipo en la cual se compararon los datos de las estaciones Floridablanca (UPB) y Acrópolis (CDMB), para así calibrar los sensores. Se encontraron coeficientes de Pearson de 0.92-0.88 para los sensores meteorológicos, 0.95 para el sensor de ozono y 0.48-0.65 para PM₁₀.

PALABRAS CLAVE:

Contaminacion atmosferica, medicion de contaminacion, calidad de aire, prototipo

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Development of a low-cost, educational carácter, air quality measurement device.

AUTHOR(S): Fabian Enrique Gutierrez Angulo

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Kento Taro Magara Gómez

ABSTRACT

With the purpose to offer to the Environmental engineering's students of the Universidad Pontificia Bolivariana-Bucaramanga, the opportunity of know the real applications of the knowledge acquired in class, an air quality measurement device was developed, able to measure pollutant concentrations (CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂ and NO₂) and some meteorological variables (temperature, humidity, irradiance and barometric pressure), also a client/server was developed in order to allow the storage and visualization of the data generated by the device. In conjunction the air sampler the technical documentation and the user manual is included, also a pilot test was performed where the data obtained from the air quality stations UPB-Floridablanca and CDMB-Acropolis was used to calibrate the sensors. The correlation values founded oscillates between 0.88-0.92 for meteorological variables. 0.95 for ozone and 0.48-0.65 for PM₁₀.

KEYWORDS:

Air pollution, pollution measurement, air quality, prototype

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Con base en la idea de mejora continua en los métodos de enseñanza, como medio para mejorar la calidad en la formación de ingenieros ambientales, se elaboró un prototipo de muestreador atmosférico, con capacidad de medir contaminantes de criterio; sus características son sencillez, bajo costo y código abierto; cuyo uso esté orientado a los estudiantes de la asignatura de contaminación atmosférica y afines.

Se usaron tecnologías de bajo costo para la medición de los contaminantes atmosféricos tales como sensores electroquímicos y *light scattering detection*; los avances en éstas tecnologías de evaluación se muestran como una revolución en el estudio de la atmósfera a mediano y largo plazo, donde la reducción en costos permitiría pasar de escasas estaciones monitoreo ubicadas en sitios puntuales, a densas redes de monitoreo capaces de mostrar con mucho mayor detalle los cambios de concentración y las dinámicas medioambientales que se establecen tanto en urbes como campo traviesa, para las instituciones interesadas tales como organizaciones gubernamentales y centros de investigación. Sin embargo, éstas tecnologías se encuentran en desarrollo e investigación, donde uno de los temas determinantes son los procedimientos de calibración, en los cuales se ha visto la necesidad de desarrollar y perfeccionar técnicas poco convencionales debido a la baja selectividad y complejas interacciones que suceden entre los sensores y la atmósfera, pero cuyos esfuerzos se ven compensados ante la posibilidad de analizar de manera más profunda la forma en que los gases de la atmósfera interactúan entre ellos y su entorno.

OBJETIVOS

1 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un equipo portátil de software y hardware libre para medir la concentración de contaminantes atmosféricos de criterio, destinado para la enseñanza universitaria.

2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un equipo de monitoreo atmosférico electrónico basado en Arduino, tecnologías sencillas de fabricación masiva, tales como sensores MQ.
- Estructurar un software para realizar tareas de obtención y manejo de datos del equipo.
- Elaborar el manual de operación y planos de diseño del equipo.

MARCO TEÓRICO

3 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

El aire es un bien compartido de todos los seres vivos que circula por toda la atmósfera. Con contaminación atmosférica, se hace referencia a la perturbación de las condiciones y composición normal del aire contenido en la atmósfera como resultado de las actividades humanas. La resolución 909 de 2008 define los contaminantes atmosféricos como “Fenómenos físicos o sustancias o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana que solos, o en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de estas”. Los principales efectos de la contaminación atmosférica se traducen en un aumento de la mortalidad y morbilidad, incremento de costos de salud y una disminución en la calidad de vida de los ciudadanos (Mihelcic and Zimmerman 2012).

3.1 Contaminantes de criterio

De la multitud de contaminantes existentes en la atmósfera, se consideran el Dióxido de azufre, el PM10 y PM2.5, los Óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono y el ozono como aquellos idóneos para definir la calidad del aire. Esta selección se basa principalmente en las investigaciones de la EPA para la norma *Clean Air Act* en búsqueda de definir los *National Ambient Air Quality Standards* (NAAQS), debido a lo común de su generación y facilidad de medición. (EPA 2016; UNAD 2016). Según la EPA, el Plomo también se incluye dentro de los contaminantes de criterio. Adicionalmente, su medición, actualmente representa un reto para las tecnologías low-cost.

3.1.1 Material particulado

Se define al material particulado o PM (*Particulate matter*) a las partículas de 10 o menos micrómetros de diámetro presentes en el aire, que presentan una composición variable (Office of Air Quality Planning and Standards 2016c).

Partículas de estos rangos de tamaño son capaces de pasar a través del sistema respiratorio y quedar acumuladas en los alvéolos pulmonares, generando problemas respiratorios; además, algunas pueden atravesar el tejido alveolar llegando al sistema circulatorio, aumentando la probabilidad de tener problemas como la hipertensión y el cáncer, debido a estas diferencias se distinguen dos grandes clasificaciones de material particulado.

3.1.2 Partículas gruesas inhalables (*Inhalable coarse particles*)

Cuyos diámetros están comprendidos entre 10 y 2.5 micrómetros, también conocidos como PM₁₀, los cuales se acumulan en los tejidos alveolares, son considerados menos peligrosos en términos de salud por su incapacidad de pasar al torrente sanguíneo.

3.1.3 Partículas finas (*Fine particles*)

Cuyos diámetros son menores a 2.5 micras, son una preocupación mayor a nivel de salud, debido a que usualmente están formados por compuestos de carbono altamente tóxicos (como los *PAHs*) o compuestos carbonados con metales pesados y otra gran variedad de sustancias (World Health Organization 2013).

3.1.4 Monóxido de carbono

El monóxido de carbono es un gas inoloro e inoloro emitido durante procesos de combustión (especialmente bajo condiciones en las cuales el oxígeno es insuficiente para una combustión apropiada). El mayor peligro del CO es el ser un asesino silencioso debido a su capacidad de reducir la absorción del oxígeno por parte de la hemoglobina, causando somnolencia, coma y la muerte (Raub et al. 2000; Office of Air Quality Planning and Standards 2016a).

3.1.5 Ozono troposférico

También denominado ozono ambiental, se trata de un gas incoloro que, a pesar de los efectos beneficiosos de su presencia en la capa de ozono, la presencia de este compuesto cuando se encuentra a nivel troposférico tiene efectos negativos a nivel respiratorio y cardiovascular. El ozono, es generado comúnmente debido a reacciones entre óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles en presencia de la luz solar, además de su emisión directa por parte de la industria pesada (Cakmak et al. 2016; Office of Air Quality Planning and Standards 2016b).

3.1.6 Óxidos de azufre

Los óxidos de azufre generan problemas de salud en el sistema respiratorio y a su vez forman en conjunto con los óxidos de nitrógeno y el agua el fenómeno conocido como la lluvia ácida. La producción de energía por combustibles fósiles (especialmente el carbón) es el responsable del mayor porcentaje de su producción, las fuentes móviles como automóviles y barcos también se consideran responsables, sin embargo, su participación se ha visto mitigada gracias al aumento tecnológico y legislativo en materia de los procesos de desulfurización (Islas and Grande 2008; Office of Air Quality Planning and Standards 2016d; KIYOURA and MUNIDASA 1971).

3.1.7 Óxidos de Nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno son una serie de gases altamente reactivos capaces de formar ozono troposférico en conjunto con VOCs, a su vez es un precursor de la lluvia ácida, capaz de devastar bosques enteros y dañar edificios con su efecto corrosivo y generar problemas en el sistema respiratorio. Los óxidos de nitrógeno de origen antropogénico se forman principalmente por el exceso de aire durante la combustión (debido al alto porcentaje de nitrógeno diatómico que esta mezcla presenta), es por ello que gran parte de las tecnologías de minimización en las emisiones se centran en la correcta ejecución de este proceso químico (Lu et al. 2016; Pipitone and Genchi 2016).

4 EL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE (ICA)

El índice de calidad de aire o *Air Quality Index (AQI)*, es un sistema para reportar de manera fácil los niveles de contaminación del aire, la AQI asigna una escala numérica para ciertos niveles de contaminantes de criterio y los representan mediante un color. El Índice de calidad de aire en Colombia fue adoptado del *Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality –the Air Quality Index (AQI)* emitido por la EPA en el 2009(UNAD 2016; Area Metropolitana del Valle de Aburrá 2016).

Tabla 1. Puntos de corte del ICA

ICA	CLASIFICACIÓN	O3 8H PPB	O3 1H PPB	PM10 24H µG/M3	PM2.5 24H µG/M3	CO 8H PPB	SO 24H PPB	NO2 24H PPB
0-50	Buena	0-54		0-12	0-54	0.0-4.4	0-35	0-53
51-100	Moderada	55-70		12.1-35.5	55-154	4.5-9.4	36-75	54-100
101-150	Dañina en la salud de grupos sensibles	71-85	125-164	35.5-55.4	155-254	9.5-12.4	76-185	101-360
151-200	Dañina para la salud	86-105	165-204	55.5-150.4	255-354	12.5-15.4	186-304	361-649
201-300	Muy Dañina para la salud	106-200	205-404	150.5-250.4	355-424	15.5-30.4	305-604	650-1249
301-400	Peligrosa		405-504	250.5-350.4	425-504	30.5-40.4	605-804	1250-1649
401-500	Peligrosa		505-604	350.5-500.4	505-604	40.5-50.4	805-1004	1650-2049

Fuente: EPA

4.1 Calculo del ICA

El ICA se calcula para cada contaminante, donde el ICA resultante es el mayor de los resultados (ecuación 1)

$$ICA = \frac{I_{high} - I_{Low}}{[PC]_{High} - [PC]_{low}} * ([C] - [PC]_{low}) + I_{Low} \quad (1)$$

Donde:

ICA = índice de calidad del aire

I_{Low} = valor del índice del límite inferior para ese contaminante

I_{high} = valor del índice del límite superior para ese contaminante

$[PC]_{Low}$ = Punto de corte inferior de la categoría para ese contaminante

$[PC]_{high}$ = Punto de corte superior de la categoría para ese contaminante

$[C]$ = concentración del contaminante

4.2 NowCast AQI

A medida que el monitoreo atmosférico se ha convertido en una acción crítica para controlar el impacto que la polución tiene sobre la salud de las personas en las grandes urbes, el enfoque tradicional de generar un AQI por el promedio de las últimas 24 horas es ahora visto como problemático, pues la dinámica de los cuerpos de aire puede generar cambios bruscos de la concentración de un contaminante en menos de 30 minutos (World Air Quality Index Project 2015; AirNow US EPA 2015).

Es por ello por lo que la EPA, desarrolló el *Nowcast* AQI para el cálculo del AQI de Ozono y material particulado, que es una media ponderada de los datos de las últimas 12 horas (para PM10 y PM2.5) o 8 (para el ozono) de la siguiente manera:

$$NowCast = \frac{\sum_{i=1}^N w^{i-1} c_i}{\sum_{i=1}^N w^{i-1}} \quad \text{where } w = \begin{cases} w^* & \text{if } w^* > W_{min} \\ W_{min} & \text{if } w^* \leq W_{min} \end{cases} \quad \text{and } w^* = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

$$W_{min} = 1/2 \text{ and } N = 12$$

Donde:

- N = es el número de horas ponderadas (las últimas 12 horas)
- C_i = es la concentración del contaminante en la hora (i) correspondiente

- W = es el factor de ponderación

4.3 InstantCast

Debido a las falencias de la medición tradicional del índice de calidad de aire, el World Air Quality Index Project, usa lo que ha denominado *Instant AQI* o Instantcast, en la cual el índice de calidad de aire se calcula del último resultado obtenido sin realizar ningún tipo de promedio con las horas previas; sin embargo, el desarrollo método *Nowcast* por parte de la EPA y su adaptación a las condiciones meteorológicas del continente asiático ha propiciado que se realice el cambio del método *Instantcast* al método *Nowcast* por parte de esta entidad (World Air Quality Index Project 2015).

5 MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE

Se define como monitoreo de calidad de aire a la acción de medir los diferentes parámetros de la atmósfera para determinar su toxicidad para el ser humano y el medio ambiente; para realizar un monitoreo de calidad de aire, los compuestos objetivos deben realizar contacto con la zona de muestreo. Existen dos estrategias para lograr que esto ocurra, el muestreo activo y el muestreo pasivo (Salter 2005).

5.1 El muestreo activo

El muestreo activo indica que el dispositivo absorbe activamente las partículas de interés, lo cual se logra normalmente mediante bombas de succión de aire, esto permite un mayor control en la cantidad de aire medido y por lo tanto los resultados de la medición son independientes de la velocidad del viento, es por ello que este tipo de dispositivos son mayormente usados para muestreos donde la calidad y confiabilidad son críticos (Salter 2005).

5.2 El muestreo pasivo

Al contrario del muestreo activo, el muestreo pasivo no realiza succión de flujos de aire, por lo cual las alteraciones de flujo pueden afectar significativamente la

medición, sin embargo, esto no es válido para todos tipos de muestreo pasivo. El desarrollo tecnológico ha permitido que el muestreo pasivo se posicione como una alternativa barata y sencilla que podría desbancar al muestreo activo a futuro (Salter 2005).

5.3 Monitoreo fijo

El monitoreo tradicional de calidad de aire se ha hecho típicamente con estaciones de monitoreo fijas (de Nazelle et al. 2013); estas utilizan tecnologías con una excelente precisión y repetitividad, sin embargo, los costos de inversión y mantenimiento, así como la calidad en mano de obra requerida para su manipulación los hacen excesivamente costosos para su implementación.

5.4 Redes de monitoreo atmosférico

La alta complejidad en los fenómenos de transporte y reacción de los elementos presentes en el aire (aún en distancias cortas), ha dictaminado la necesidad de implementar sistemas de medición capaces de captar datos en múltiples puntos de manera simultánea, por esta razón, la ciencia y la industria ha buscado alternativas de monitoreo menos costosas en términos de inversión y mantenimiento, que puedan ser implementadas a gran escala (Mead et al. 2013). Actualmente existen varias redes de monitoreo de tamaño considerable, como lo son *Automatic Urban and Rural Network* operadas por la UK con 127 sitios monitoreados actualmente (DEFRA-UK 2015) y *National Air Pollution Surveillance* de Canadá con 283 sitios de muestreo (Government of Canada 2016).

5.5 Métodos de referencia para el muestreo atmosférico

En el ámbito formal del muestreo de contaminación atmosférico, las Entidades como la USEPA y la Unión Europea, se encargan de evaluar los métodos adecuados para realizar muestreos de la concentración de contaminantes atmosféricos, la Tabla 2 resume los métodos de referencia acordes con el Título 40, Parte 53 del *Code of Federal Regulations de la USEPA*.

Tabla 2. Principales Métodos de referencia de la EPA

Nombre del método	Descripción	Aplicable a:
<i>Nondispersive Infrared Photometry</i>	Este método usa la absorción del espectro infrarrojo debida a los gases de un compuesto, para dar la concentración de un gas determinado en una mezcla de gases. La energía infrarroja absorbida es proporcional con la concentración del gas objetivo (Lodge Jr. 1988).	NO ₂ , SO ₂ , CO
Método pararosanilina	En este método, un complejo de diclorosulfitomercurato, formado por la interacción entre el SO ₂ y tetracloromercurato de potasio, se hace reaccionar con pararosanilina, formando un tinte que donde se analiza la absorbancia en el laboratorio, obteniendo la concentración de SO ₂ en la muestra (USEPA 1976).	SO ₂
<i>Icp/Ms X-Ray Fluorescence (Edxrf) Frm</i>	Consiste en la lectura de los rayos X emitidos por una muestra, cuando este se bombardea de rayos X o Y	NO _x ,SO _x ,O ₃
<i>Chemiluminescence</i>	La quimioluminiscencia es el fenómeno por el cual bajo algunas reacciones químicas se emite energía a modo de luz, este puede ser medido para determinar la concentración de uno de los reactivos bajo condiciones determinadas, en el caso del ozono, Óxidos de Nitrógeno y Óxidos de azufre, el límite de detección puede estar debajo de 1 ppb. Si las reacciones son ejecutadas cuando el reactante objetivo se encuentra en estado gaseoso, el método se denomina <i>Gas-Phase Chemiluminescence</i>	O ₃ ,NO _x ,SO _x
<i>Open Path Analyzer</i>	Los muestreadores de camino abierto, son aquellos que no utilizan válvulas, bombas y tubos para aislar una muestra de aire de flujo conocido a la zona del equipo donde se realiza la medición, estas pueden ser combinadas con muchas otras tecnologías, pero	NO ₂

		debido al hecho de que una cantidad de factores difíciles de controlar pueden afectar el resultado obtenido, raramente se ven incluidas como métodos estándar de muestreo(U.S. General Services Administration and National Archives and Records Service 1998).	
Photolytic-Chemiluminescence		Consiste en la desintegración fotolítica de compuestos nitrogenados cuya reacción libera fotones, los cuales pueden ser registrados mediante un fotodetector.	NOx
Cavity Attenuated Phase Shift Spectroscopy (CAPS)		Es un tipo de espectroscopia donde se emiten rayos a través de una muestra de gas, para mejorar la sensibilidad, los rayos son reflejados mediante espejos, para dar un recorrido total de 2 km aproximadamente, generando una reflexión más notoria debido a la interacción con el gas (Petzold et al. 2013).	NO ₂
Ultra Violet Absorption		Es un tipo de espectroscopia que usa la región ultravioleta del espectro visible, para inferir la composición de un gas.	NO ₂ , SO ₂ , CO, O ₃
Gravimetric		Consiste en obtener una muestra susceptible a pesarse en el laboratorio, Este método es especialmente usado por equipos de muestreo de Material particulado.	PM
Beta attenuation monitoring (BAM)		Es una técnica de monitoreo atmosférico bastante común para PM ₁₀ y PM _{2.5} la cual se basa en la ley de Beer-Lambert acerca de la atenuación de la radiación beta (electrones) debida a la materia sólida, la cual es solo dependiente de la masa y no de otras propiedades de la materia (Kulkarni, Baron, and Willeke 2011).	PM ₁₀ , PM _{2.5}
Dynamic Light Scattering		Es una técnica que permite determinar la distribución de los tamaños de partículas presentes en una muestra, gracias a dispersión que está a los fotones de una fuente de luz regulada, como un láser (Chu 2012)	PM
Pulsed Fluorescent		Este método excita los compuestos mediante pulsos de luz ultravioleta, las moléculas excitadas emiten una	SO ₂

	radiación característica, la cual puede ser filtrada para obtener la concentración de aquella sustancia deseada (Thermo Environmental Instruments Inc 1993)
<i>Flame Photometric Detection</i>	Este método realiza la detección cuantitativa de NOx compuestos de azufre debido a la luz generada al ser estos compuestos expuestos a una llama de hidrogeno, esta técnica es famosa por su muy alta, en el orden de partes por billón (United States. Environmental Protection Agency, National Center for Atmospheric Research (U.S.) 1974).

Fuente: EPA

6 SENSORES DE CALIDAD DE AIRE

Los sensores de calidad de aire son dispositivos capaces de convertir la presencia de contaminantes atmosféricos en otro tipo de señales, como por ejemplo señales eléctricas. Existen infinidad de tipos y tecnologías para monitorear la presencia de contaminantes en el aire, se diferencian dos grandes tipos de sensores: sensores a tiempo real (Kumar et al. 2016), y sensores postprocesados.

6.1 Sensores de tiempo real

Hacen referencia a aquellos sensores en los cuales el usuario no debe realizar ningún tipo de procedimiento extra para poder obtener la medición, en esta categoría entran los sensores electroquímicos y los contadores ópticos de partículas (Kumar et al. 2016).

6.2 Sensores postprocesados

Estos sensores requieren un paso adicional para hacer la lectura posible, el ejemplo más común son los dispositivos de medición de calidad de aire, que almacenan el material particulado, y requieren un pesaje previo y posterior para obtener los datos. Este tipo de metodologías siguen vigentes gracias a su precisión, sin embargo, se cree que serán totalmente reemplazadas por tecnologías a tiempo real en el futuro.

6.3 Sensores electroquímicos de óxido de metal (MO_x)

La importancia para la ciencia e industria de las redes de monitoreo de contaminantes ha avivado el mercado de sensores de bajo costo en adquisición y mantenimiento, como los sensores MO_x; este nombre hace referencia a un conjunto de tecnologías usadas para la detección de diferentes tipos de gases

Sin embargo, uno de los mayores problemas que embargan a los sensores electroquímicos es su poco controlado estándar de calidad en la producción, con su consecuente pobre calibración y baja repetitividad. (M.I. Mead).

Ante esta problemática algunas empresas como *alphasense* han aprovechado el nicho comercial existente, trabajando en la calidad, repetibilidad y sensibilidad a bajas concentraciones de contaminante, con resultados prometedores.

6.4 Principio de operación

Los sensores MO_x funcionan mediante reacciones de oxidación o reducción que ocurren cuando el gas de interés entra en contacto con la superficie del sensor, lo cual se traduce en la entrada o salida de electrones en el sistema, generando una corriente eléctrica (Masson, Piedrahita, and Hannigan 2015). La superficie del sensor está compuesta por óxidos de metal como Cr₂O₃, Mn₂O₃, Co₃O₄, NiO, CuO, etc, sin embargo, en términos de sensibilidad, los mejores resultados se ven con configuraciones electrónicas d¹⁰ (ZnO y SnO₂) y d⁰ (TiO₂) (Chengxiang Wang, Longwei Yin *, Luyuan Zhang 2010).

6.5 Efectos de la temperatura

La sensibilidad de los óxidos de metal está ligada a la eficiencia de la reacción, por lo cual es usual que los sensores usen resistencias para lograr un aumento en la temperatura, lo que se traduce en una mayor eficiencia de reacción y mejora de la sensibilidad (Chengxiang Wang, Longwei Yin *, Luyuan Zhang 2010). Por otro lado, el hecho de que los gases tengan una temperatura óptima de oxidación hace que,

bajo ciertas temperaturas, la selectividad del sensor sea alterada (Lee and Reedy 1999).

6.6 Efectos de la humedad.

Se ha visto que la humedad disminuye la sensibilidad de los sensores, lo cual es atribuible a varios factores, primero, la reacción entre el MO y el agua, disminuye la resistencia del material lo cual afecta negativamente su sensibilidad; por otro lado, las moléculas de agua actúan como una barrera dificultando el contacto y la reacción de las partículas de gas con la superficie del sensor; por último, la exposición prolongada genera una capa de OH^- en la superficie del sensor, dificultando también los procesos de reacción, sin embargo esta capa se disuelve al exponer el MO a temperaturas superiores a $400\text{ }^\circ\text{C}$ (Chengxiang Wang, Longwei Yin *, Luyuan Zhang 2010).

6.7 Sensores MQ

Son un tipo de sensor electroquímico, que miden la concentración del gas objetivo mediante la oxidación o reducción de este gas y midiendo la corriente generada por este proceso. Son económicos y de fácil adquisición.

Estos sensores están conformados de entre 2 y 4 electrodos en contacto con un electrolito, los cuales se mantienen en contacto con el aire mediante una membrana porosa (Playground 2013).

Tabla 3. Dispositivos MQ disponibles y detalles técnicos

SENSOR	Gas objetivo
MQ2	Metano, butano,LPG y humo
MQ3	Alcohol
MQ6	LPG, propano
MQ8	Hidrógeno
MQ-9	CO
MQ131	Ozono
MQ303A	Alcohol

MQ136	Sulfuro de Hidrógeno
MQ137	Amonio
MQ138	VOCs (bencenos, aldehídos, cetonas, ésteres)

Fuente: Autor

6.8 Sensores ME

Sensores de principios electroquímicos, al igual que los MQ, los sensores ME caracterizan por su bajo consumo, alta precisión, alta sensibilidad, poca interferencia y excelente repetitividad de los resultados (Hanwei Henan Electronics Co 2015).

Tabla 4. Dispositivos ME disponibles y detalles técnicos

SENSOR	Gas objetivo
ME2-CO, ME3-CO, ME4-CO	Monóxido de carbono
ME2-O2, ME3-O2	Oxígeno
ME3-H2S, ME4-H2S	Sulfuro de Hidrógeno
ME3-CL2	Cloro
ME3-NH3	Amonio

Fuente: Autor

6.9 Sensores *MiCs*

Los sensores *MiCs*, son sensores basados en tecnología MO_x producidos por la compañía *SGX sensortech*, estos han demostrado una mayor precisión que los sensores MQ y mayor sensibilidad a menor concentración de sus gases objetivo. Debido a estas características se han encontrado aplicaciones en iniciativas tales como el *air quality egg* (SGX Sensortech 2005; Dye 2014).

6.10 Sensores catalíticos

Se componen de dos elementos, un detector compuesto de un material catalítico sensible a los gases objetivo y un compensador que es inerte. El gas objetivo hará combustión en el detector causando un aumento en la temperatura y resistencia,

una ventaja de estos sensores radica en su relación lineal con respecto a la concentración, simplificando los procesos de calibración (Figaro-sensor 2016).

6.11 Sensores MP

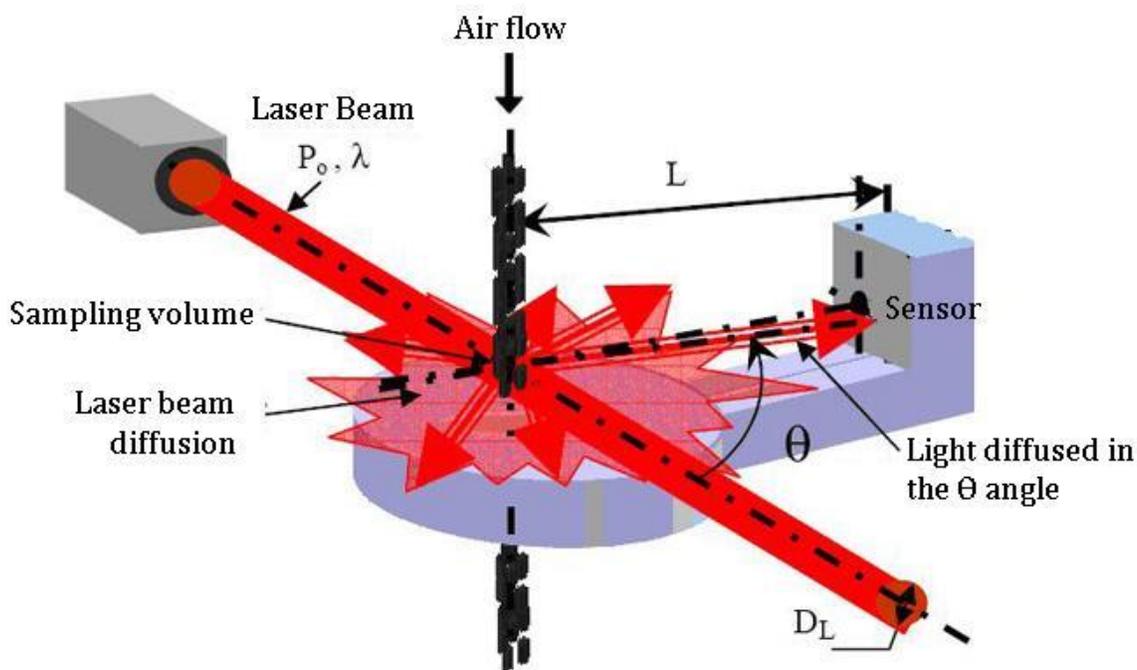
Estos sensores cuentan con una múltiple capa, donde el sustrato se compone de Al_2O_3 , encapsulado en una capa de metal. El resultado del contacto entre el sensor y el gas objetivo es un cambio en la conductividad, que puede ser convertido a una señal eléctrica mediante un circuito sencillo; el nombre “MP” hace referencia a la técnica de construcción (WinsenSensor 2016).

6.12 Sensores MG

MG812 es el sensor de gas de tipo químico que adopta el principio de célula de electrolito sólido, utilizado para detectar dióxido de carbono. Cuando los sensores están expuestos a CO_2 , el sensor produce fuerza electromotriz entre electrodo sensible y electrodo de referencia, la cual puede ser detectada y traducida a la concentración de dióxido de carbono

6.13 Sensores Ópticos

Ilustración 1. Sensor óptico por principio de dispersión



fuente: <http://www.nano-sense.com/en/P4000/p4000-fine-particles-probe.html>

Usan diferentes efectos ópticos (tales como atenuación, dispersión, corrimiento al rojo, entre otros) para estimar la concentración de diferentes compuestos o partículas suspendidas en el aire. El caso más sencillo, corresponde a la dispersión y atenuación generada por las partículas suspendidas en el aire, permitiendo realizar un conteo aproximado de ellas; Por otro lado, ajustando la longitud de onda con los espectros de absorbancia de los diferentes compuestos, se pueden crear sensores láser altamente selectivos y de muy bajo consumo (Korotcenkov 2013).

Tabla 5. Dispositivos ópticos disponibles y detalles técnicos

SENSOR	Objetivo
Laser Particle Sensor Module— PM2003	PM10; PM2.5; PM0.3

6.14 Métodos de calibración para sensores de bajo costo.

La calibración de los sensores de bajo costo se ha considerado complicada, por lo cual se han intentado diversos métodos como la calibración “*on-the-fly*” de estaciones de monitoreo móviles equipados con equipos GPS, donde se busca comparar sus valores con respecto a estaciones de monitoreo fijas, como el sistema *CaliBree* (Hasenfratz, Saukh, and Thiele, n.d.). En base a los problemas de calibración cruzada (Donde se busca compensar la baja selectividad de los sensores); se han realizado extensas pruebas de sensores comercialmente disponibles bajo condiciones de laboratorio, en búsqueda de ecuaciones *empíricas* capaces de ajustar los resultados, con los cuales se han obtenido algunos resultados favorables comparados con las técnicas tradicionales de calibración (Spinelle et al. 2015).

6.14.1.1 Calibración lineal

La calibración lineal es el modelo más usado dentro de la calibración analítica, tanto por su simplicidad, como su fiabilidad para diferentes situaciones. En este modelo se busca la línea recta $y = b_0 + mx$, donde b_0 es el punto de origen, m la pendiente y x el resultado obtenido con el instrumento.

El método más usado para este tipo de calibración es el de los mínimos cuadrados o *least square method*, el cual consiste en obtener la recta en la cual la suma de los cuadrados de las distancias entre los puntos obtenidos por el instrumento y la recta de calibración sea la mínima posible.

Existe también una variación de este método llamada *multivariate linear regression*, donde se utilizan métodos de calibración lineal en eventos donde hay muchas variables capaces de afectar los resultados del instrumento en cuestión, debido a la naturaleza de los sensores de bajo costo, los métodos multivariable presentan un

incremento significativo de la precisión comparados con la calibración monovariable (Spinelle et al. 2015).

6.14.1.2 Calibración por redes neuronales artificiales.

Las redes neuronales artificiales son un método matemático que busca emular el funcionamiento de un cerebro biológico para resolver problemas complejos, una red neuronal artificial consta de unos datos de entrada y salida, así como una serie de capas de nodos que combinan y realizan diferentes operaciones con los datos de entrada y propagan sus datos a las capas siguientes. Este método tiene la ventaja de ser eficiente cuando las relaciones entre las variables son altamente complejas y se tienen grupos de sensores capaces de medir estas variables (Spinelle et al. 2015).

6.14.1.3 Calibración en tiempo real (*on-the-fly*)

Estos métodos buscan compensar los problemas de estabilidad a largo plazo de los que sufren muchos de los sensores de bajo costo, mediante calibraciones constantes usando técnicas estadísticas complejas, Estas técnicas podrían permitir el uso de redes de monitoreo extensas, que permitan mejorar el análisis de los sistemas atmosféricos, sin embargo, estos métodos requieren lógicamente, que un sensor con más precisión y fiabilidad pueda ser acercado lo suficiente como para contrastar las diferencias en las lecturas y aplicar los cambios (Hasenfratz, Saukh, and Thiele, n.d.; Miluzzo et al., n.d.).

7 OTROS PARÁMETROS DE IMPORTANCIA

7.1 Humedad

Hace referencia a la cantidad de vapor de agua presente en el aire; humedades altas se encuentran asociadas a la encapsulación y arrastre de contaminantes hacia el suelo (como en condiciones de lluvia leve o neblina).

La Humedad se mide de acuerdo a 3 formas: Humedad absoluta, que es la masa de vapor de agua presente en el aire; humedad relativa la cual se presenta en

porcentaje con respecto a la máxima carga de vapor de agua que soporta el aire a una determinada temperatura y humedad específica, que hace referencia al ratio de masa de vapor de agua con respecto a la masa total de aire (Guevara 2008).

7.2 Temperatura

Se refiere a la intensidad de la energía dentro de las moléculas que conforman la materia, este parámetro tiene una fuerte relación con la cinética y el equilibrio químico, y, por lo tanto, con las reacciones que se dan en la atmósfera. En el caso sensores electroquímicos descritos en la sección 2.6.3, la temperatura afecta significativamente sus características, haciendo de la medición de este, un factor imprescindible (Lee and Reedy 1999; Masson, Piedrahita, and Hannigan 2015).

7.3 Presión Atmosférica.

La presión atmosférica y sus cambios son factores influyentes en la movilidad de los contaminantes en la atmósfera, así mismo la estabilidad en la presión atmosférica contribuye al estancamiento de los contaminantes en una región geográfica determinada, lo que sumado a otros factores puede generar concentraciones de sustancias químicas a niveles perjudiciales (SWCAA 2014).

7.4 Luz ambiental

Se ha demostrado que la luz solar es un factor contribuyente dentro de la formación de la niebla fotoquímica, proporcionando la energía necesaria para la reacción de compuestos orgánicos volátiles con óxidos de nitrógeno para formar la niebla fotoquímica (Riehl et al. 1979).

8 PARÁMETROS DE CALIDAD PARA MUESTREO ATMOSFÉRICO.

En el *Air Sensors workshop* de 2013, celebrado por la EPA, se puso en evidencia la necesidad de establecer guías de diseño y calidad en los datos de medición para diferentes usos, pues no es lo mismo realizar la medición para justificar medidas legales, que obtener datos de la concentración de contaminantes para establecer

los mejores puntos para que un paciente con enfermedades respiratorias pueda realizar sus actividades diarias de la manera más saludable posible. Tim Dye y la compañía *Sonoma technologies* ha elaborado un cuadro comparativo en las necesidades de precisión y rango de medición para muestreo atmosférico no regulatorio, con base en más de 30 años de experiencia en el sector (Dye 2012). La Tabla 6 se muestra esta información.

Tabla 6. Valores para mediciones no regulatorias

Contaminante	No regulatorio	
	Rango de concentración	Precisión
Ozono	0-350 ppb	1-5 ppb
Monóxido de carbono	0-20 ppm	1 ppm
Dióxido de sulfuro	~0-200 ppb	1 ppb
Dióxido de nitrógeno	~0-400 ppb	1 ppb
PM 2,5	~0-300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM10	~0-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	~10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Black carbon	~0-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Fuente: Tim Dye 2012

9 TECNOLOGÍA DIGITAL

9.1 Arduino

Arduino es una plataforma electrónica *Open Source* diseñada para permitir el uso fácil del hardware y el software, lo cual lo convierte en una potente herramienta de prototipo de dispositivos electrónicos. Al final del desarrollo, el Arduino puede ser reemplazado por un ATmega 2560 lo cual disminuye los costos del equipo concebido (Banzi 2015a), Arduino posee una gran cantidad de tarjetas (*boards*) de

diferentes especificaciones, entre las cuales se destaca Arduino Mega 2560 y Mega ADK, para aplicaciones con gran cantidad de entradas y/o salidas asociadas (Banzi 2015b).



Tabla 7. Especificaciones técnicas de la placa Arduino MEGA

Microcontrolador	ATmega2560/ATmega ADK
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (recomendados)	7-12V
Voltaje de entrada (límites)	6-20V
Pines I/O digitales	54 de los cuales 15 proveen salida PWM
Pines de entrada análoga	16
Corriente DC para cada Pin I/O	40 mA
Corriente para el pin de 3,3 V	50 mA
Memoria flash	256 KB de los cuales 8 son utilizados por el bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

Fuente: Arduino Foundation

9.2 Shields Arduino

Los *shields* son tarjetas electrónicas capaces de acoplarse fácilmente con una placa Arduino para realizar una función específica o extender las posibilidades del Arduino, esto permite un prototipo fácil y eficiente en términos de costo y tiempo (Torrente Artero 2013).

9.2.1 *Shield* Wi-fi

Para realizar la conexión de Arduino a una red wi-fi, se puede usar placas wi-fi comunes o *shields* wi-fi Arduino, donde las placas comunes suelen ser más económicas, pero de una implementación más difícil.

9.2.2 *Shield* SD

El *shield* SD permite añadir soporte de tarjetas SD al dispositivo Arduino, lo cual le permite leer y guardar datos de una manera sencilla, datos que luego pueden ser procesados en un celular o computador, para el caso del prototipo, el *Shield* wi-fi incluye un socket SD.

9.3 Fritzing

Es un software de desarrollo de hardware, de carácter *Open-Source*, facilita el desarrollo, enseñanza y manufactura de prototipos y PCBs profesionales; nació bajo el espíritu y las directrices asentadas por el proyecto Arduino. La página web asociada al proyecto ayuda a compartir contenidos y ayudar al manejo de la producción (Fritzing and IXDS 2015).

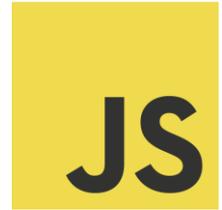


9.4 JavaScript y Node.js

JavaScript es un lenguaje de programación orientado a objetos estándar por su uso en los navegadores web, esto lo ha posicionado como uno de los lenguajes más usados en el mundo (Flanagan 2006), sin embargo, durante muchos años las aplicaciones web dependieron del uso de un lenguaje diferente para el lado del servidor¹, como Ruby o PHP, lo cual ha dado un giro total con la aparición de Node.js, un entorno de ejecución de JavaScript para el lado del servidor, esto ha

¹ Usualmente, las aplicaciones web están divididos en cliente y servidor, donde el cliente es la página web y su código, que se ejecuta en un navegador, y el servidor es una aplicación que responden a las peticiones del cliente, ejecutadas según lo requiera el usuario

permitido desarrollar tanto la aplicación en el lado del cliente (navegador web) como para el servidor en un solo lenguaje.



9.5 Git

Git es un software de control de versiones desarrollado por *Linus Torvalds*; los softwares de control de versiones son indispensables para el correcto desarrollo del software. En el caso del software libre, permite que cualquier programador tenga una copia del código fuente de una aplicación y pueda alterarlo y/o mejorarlo sin miedo a destruir la copia original (Git-official-WebSite 2016).

9.6 GitHub

Es una plataforma de desarrollo colaborativo que utiliza el sistema de control de versiones Git (Github 2016), desde su lanzamiento en el 2008, se ha ido consolidando como el repositorio de proyectos *open-source* más grande de la web con más de 14 millones de usuarios y 35 millones de repositorios.



GitHub cuenta además como un hosting gratuito de páginas estáticas y Wikis para sus proyectos.

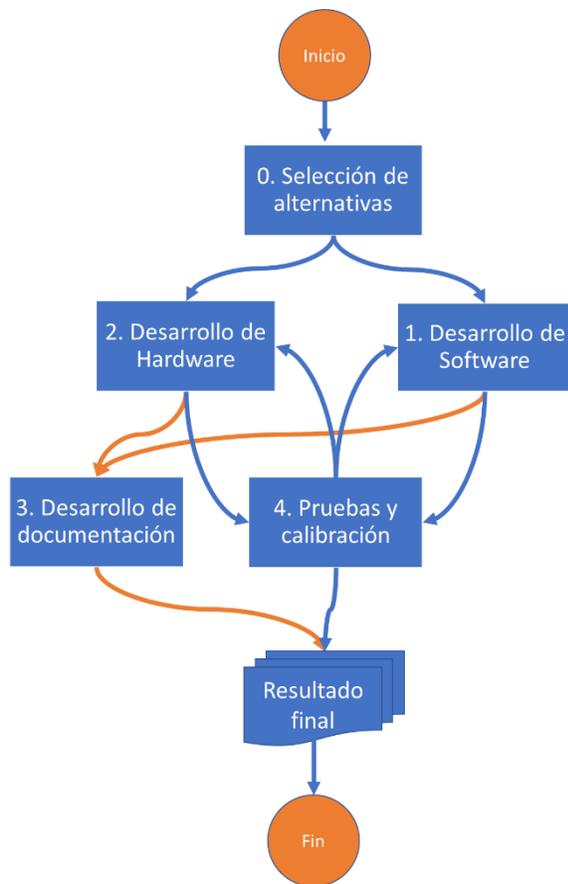
9.7 Protocolo de comunicación I2C

El protocolo I2C (pronunciado i-cuadrado-c), es un protocolo que permite la comunicación entre diferentes partes de un circuito de manera sencilla; gran cantidad de sensores utiliza este protocolo para comunicarse, en el caso de Arduino, la librería *Wire* permite la gestión de lectura y escritura mediante este protocolo (Telos company 2015).

METODOLOGÍA

La metodología aplicada consta 5 de etapas, cabe aclarar que estas (exceptuando los procedimientos de calibración) son de carácter ilustrativo, pues el desarrollo de hardware y software no se puede considerar como un procedimiento lineal, en vez de ello, es un proceso iterativo donde se realiza una retroalimentación constante entre las diferentes etapas.

Ilustración 2: Desarrollo metodológico del proyecto



Fuente: Autor

10 ETAPA 0: SELECCIÓN DE SENSORES Y TECNOLOGÍA.

Como primera medida, durante la formulación del anteproyecto, se realizó una selección de los sensores con respecto a los disponibles en el mercado, teniendo

en cuenta como base su precio, compatibilidad con el dispositivo Arduino y su disponibilidad en el mercado. La oferta de sensores es mucho mayor para el CO y el O₃, que para el NO₂ y SO₂, posiblemente por la reactividad de estos últimos, capaces de corroer los catalizadores cerámicos. Para el CO, se eligió el sensor ZE-CO que Winsen sensor modificó el rango de 0 a 50 ppm, para O₃, se usó el sensor MQ131 en su versión para baja concentración, En el caso de NO₂ y SO₂, se eligieron los sensores ZE3-SO₂ y ZE3-NO₂, debido a su facilidad de uso, y su similitud con sensores ZE10, que proporcionan una resolución mucho mayor, a cambio de un precio mayor. El plomo (Pb) se descartó del proyecto debido a la ausencia de sensores low-cost capaces de detectar su presencia en el aire y la no disponibilidad de equipos de referencia en la región.

10.1 Material particulado

Para este caso se consideraron una variedad de diferentes sensores de bajo costo, los cuales se encuentran dentro de los reportes de investigación “*Air Quality sensors experiments on the World Air Quality Index Project*”; para este caso la mayoría de los sensores fueron descartados por su dificultad de adquisición, excepto para el caso del *Dylos DC1100* y *Alphasense OPC-N2*, donde el mayor problema es su alto costo.

11 ETAPA 1: DESARROLLO DEL HARDWARE

En la presente sección se describen las metodologías de cálculos usadas dentro del hardware (el prototipo de estación de monitoreo), para ejecutar sus diferentes funciones.

11.1 Sensor de humedad y temperatura RHT03:

El sensor RHT03, es un sensor de humedad y temperatura que se comunica mediante el protocolo I2C; su uso en el Arduino es realizado mediante la librería DHTLib (Arduino Foundation 2015), debido a que esta librería no posee mecanismos de calibración, se añadió la siguiente fórmula dentro del cálculo

$$Hum = RHT_{hum}X_{hum} + A_{hum}$$

$$Temp = RHT_{temp}X_{temp} + A_{Temp}$$

Dónde:

Hum y $Temp$ = son los resultados finales de humedad y temperatura en % y °C, respectivamente.

RHT_{hum} y RHT_{temp} = son los resultados de humedad y temperatura obtenidos por el sensor en % y °C, respectivamente.

X_{hum} y X_{temp} = Coeficientes de calibración.

A_{hum} y A_{temp} = Coeficientes de desfase de calibración.

11.2 Sensor de presión Barométrica BMP180

El sensor de presión barométrica BMP180 es un sensor desarrollado por BOCH capaz de medir la presión barométrica (y deducir con ella la altitud) con una precisión de hasta 0.06 mb (*Weather Station Data Logger project 2011*). En el caso de Arduino, la biblioteca BMP180 de *sparkfun* provee el algoritmo para realizar la medición de la presión barométricas sin problemas, basadas en las ecuaciones de la *Weather Station Data Logger Project* y la *información técnica del fabricante* (*Weather Station Data Logger project 2011*).

Para calcular la altitud, se puede usar la “*international barometric formula*”, definida para este caso como:

$$Altitud = 44330 * (1 - (\frac{p}{p_0})^{\frac{1}{5.255}})$$

Donde:

$Altitud$ = altitud del dispositivo en hPa

P =presión medida por el sensor BMP180

P_0 = presión de referencia, en este caso la presión al nivel del mar de: 1013.25 hPa

11.3 Sensor de luminosidad TSL2561

El TSL2561 es un sensor de bajo costo capaz de medir la iluminación en Lux a través del protocolo I2C mediante el uso de dos diodos receptores que captan la luz visible y luz infrarroja. Si bien la conversión de la señal recibida por el sensor a lux puede ser complicada, la librería “TSL2561_Luminosity_Sensor_BOB”, Desarrollada por el fabricante, contiene la implementación para la correcta lectura de la señal (SparkFun 2014).

11.4 Sensor *Shinyei* PPD42NS

Este sensor de bajo costo utiliza la dispersión que producen las partículas en el aire para calcular la concentración. El sensor funciona de la siguiente manera: primero toma la medición de la muestra, donde obtiene una serie de resultados en voltaje los cuales dependen de la cantidad de luz que el diodo receptor sea capaz de interceptar, a este resultado se le aplica un filtro, donde elimina la medición de las partículas pequeñas y el ruido y posterior a ello, de manera independiente de la intensidad o tamaño de las partículas, el sensor arroja una señal binaria, del usuario depende el medir la cantidad de tiempo que el sensor estuvo en señal baja, conocido como el “*Low Pulse Occupancy*” (World Air Quality Index Project 2011), dependiendo de este porcentaje, se puede calcular la concentración de partículas gracias a los datos del fabricante del sensor y una aproximación de las propiedades de las partículas de pm10 y pm2.5, el procedimiento de uso se describe a continuación (Shinyei Corporation 2010):

- 1) Realizar la medición de la salida digital del sensor y repetir esto durante 30 segundos
- 2) Calcular el *low Pulse Occupancy* (LPO) = % del tiempo que el sensor estuvo con una salida digital de 0 en esos 30 segundos
- 3) Aplicar la curva de calibración. El LPO tiene una relación lineal con respecto a la concentración de PM10, el cual fue obtenido con el procedimiento de calibración descrito en la etapa 5.

Para realizar el cálculo de diferentes tamaños de partícula, el filtro aplicado por el sensor puede ser ajustado para ignorar pulsos de radios inferiores.

11.5 Sensor MQ-131 de baja concentración

El sensor de ozono de bajo costo MQ-131 está compuesto de una pequeña pieza de semiconductor cerámico Al_2O_3 , existen 2 versiones MQ-131 (concentraciones de entre 50 ppm y 1000 ppm) y MQ-131 (concentraciones entre 5 ppb y 2000 ppb) para realizar la medición, es necesario realizar una calibración previa y un precalentamiento del sensor, así como añadir una resistencia de carga el al menos 5 ohm, esta se realizó de manera empírica como se explica en la sección 3.5. Sin embargo, ésta también puede ser realizada en el laboratorio, según la especificación de la hoja de datos del sensor.

Para operación del sensor, se realizó el siguiente procedimiento:

- 1) Iniciar el calentamiento del sensor, esperar 24 horas (el sensor puede usarse antes de este tiempo, pero los resultados no serán igual de precisos).
- 2) Tomar el voltaje del sensor (V_{rl})
- 3) Aplicar la curva de calibración.

11.6 Sensores ME03-SO₂, ME03-SO₂ y módulo ZE03-SO₂

El sensor ME03-SO₂ es un sensor electroquímico diseñado por la compañía *Winsen Electronics*, se pueden adquirir por separado o en conjunto con la placa ZE03-SO₂, la cual facilita el uso del sensor, mediante una comunicación vía puerto serial. El sensor no cuenta con gran resolución, pero por un precio mayor (alrededor de 270 USD) se pueden adquirir módulos ZE10-NO₂ y ZE-SO₂, con excelente selectividad y precisión.

El modo por defecto del módulo ZE03 envía señal cada segundo, obteniéndose la concentración como una señal de bits, para obtener la concentración:

1) Iniciar el calentamiento del sensor, esperar 5 minutos (el sensor puede usarse antes de este tiempo, pero los resultados no serán igual de precisos).

2) Tomar la lectura cada segundo durante 30 segundos, para cada lectura se obtiene un *Array*² de 9 bits, con ellas se calcula:

Para los sensores ZE03-NO2 y ZE03-SO2

$$(Bit3 * 256 + Bit4) * 0.1 ppm$$

Para los sensores ZE03-CO

$$(Bit3 * 256 + Bit4) * 1 ppm$$

3) Aplicar la curva de calibración

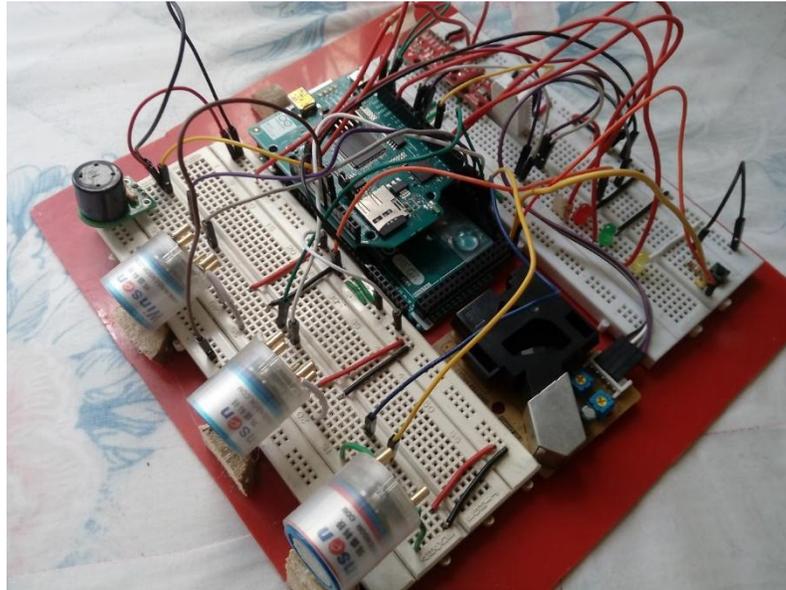
11.7 Circuito electrónico

El circuito electrónico fue realizado en varias etapas, como primera instancia, se realizaron las pruebas de funcionamiento con cada uno de los componentes individuales del prototipo asegurando su buen funcionamiento; el código con el cual se realizaron cada una de las pruebas se encuentra alojado en el repositorio de GitHub.

Posteriormente, se realizó el primer diseño en *Fritzing*, añadiéndose los diferentes Leds indicativos y los botones necesarios para usar el dispositivo y se procedió a ensamblar las piezas (Ilustración 3), durante esta fase, también se desarrolló el código necesario para hacer funcionar el prototipo en su totalidad, y se añadió mejoras de usabilidad.

² Término que se usa en ciencias de la computación para designar a una lista de datos homogéneos y consecutivos

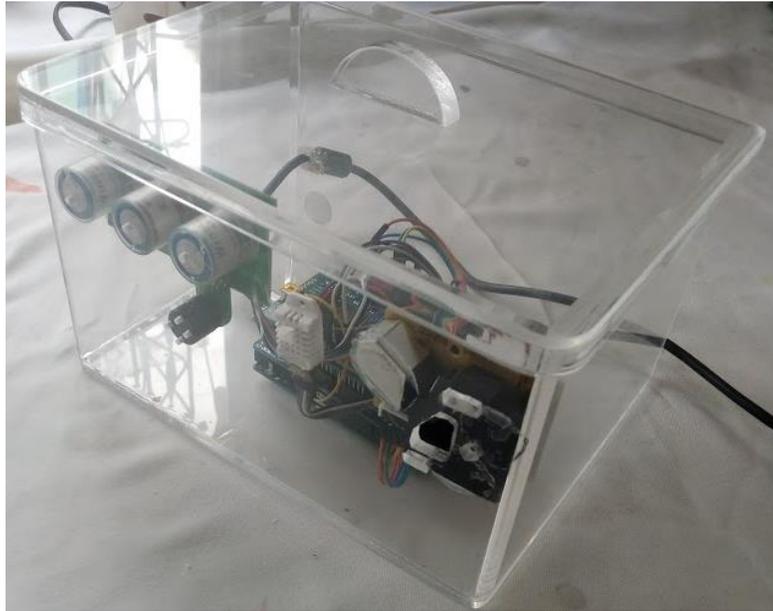
Ilustración 3. Prototipo funcional con todos sus componentes.



Fuente: Autor

Por último, se desarrolló el prototipo final, En una caja de acrílico, el sistema de alimentación y ensamblándose parte de los componentes en una *protoshield* (ver Ilustración 4).

Ilustración 4. Prototipo final



Fuente: Autor

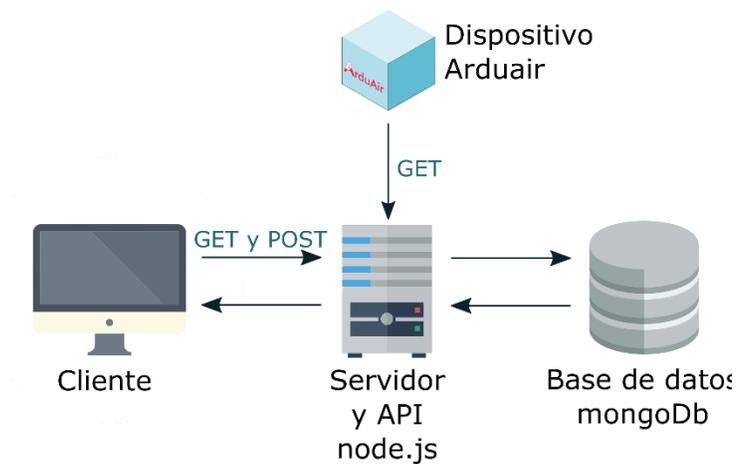
12 ETAPA 2: DESARROLLO DEL SOFTWARE

Durante esta sección, el término “software” hará referencia al conjunto cliente-servidor desarrollado para el presente trabajo.

12.1 Generalidades

El software desarrollado se compone de 3 partes básicas, más el dispositivo de monitoreo, cuya arquitectura se muestra en el gráfico Ilustración 5: Arquitectura del prototipo, donde el servidor es el encargado de mediar la comunicación entre el cliente (y por lo tanto el usuario) y la base de datos, mediante peticiones GET, POST, comunes en la arquitectura web, todo esto se realiza de manera transparente al usuario.

Ilustración 5. Arquitectura del prototipo



Fuente: Autor

12.2 Estructura del Cliente.

El cliente es la interfaz gráfica con la cual interactúa el usuario, el cual se ejecuta en un navegador web. En el caso de este proyecto, se ha desarrollado e incorporado las siguientes características:

12.2.1 Cálculo de ICA

El cálculo del ICA se realiza conforme a la legislación colombiana y a la teoría expuesta en la sección 2.3

12.2.2 Gráfico histórico

En la pestaña data, los usuarios pueden escoger hasta 5 prototipos y generar un gráfico histórico.

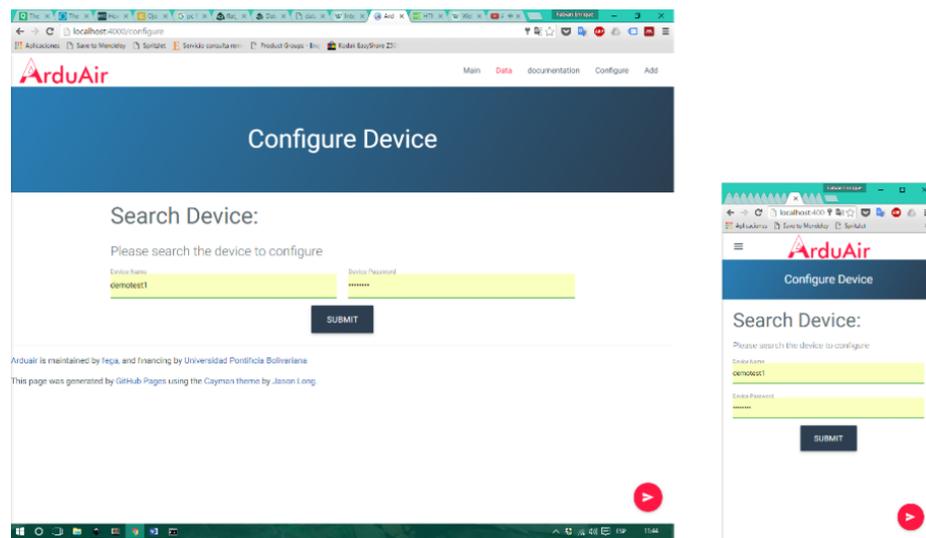
12.2.3 Estructura tipo *Single Page Application* (SPA)

El cliente ejecuta todas sus funcionalidades sin realizar un cambio de página, lo cual minimiza el tiempo de carga y permite deslizarse por todos los sectores sin perder ningún cambio. Este tipo de tecnología es una de las tendencias más importantes en el desarrollo web en la última década (Peter Wayner 2016).

12.2.4 Diseño *responsive*

Debido a que el último año las conexiones mediante dispositivos celulares se han incrementado más de un 63%, las páginas web han tenido que adaptarse a su ejecución en pantallas extremadamente pequeñas, naciendo así el diseño *responsive*.

Ilustración 6. Tomas de pantalla de la plataforma vista desde PC y móvil



Fuente: Autor

12.3 Estructura del servidor

12.3.1.1 Web API

La web API (del inglés *Application Programming Interface*) de una aplicación, son las diferentes rutinas, funciones y protocolos que permiten comunicarse con cierta aplicación, en este caso, la API provee las funciones necesarias para crear, eliminar o modificar datos o dispositivos.

Tabla 8. Diseño de la API de la plataforma

Método ³	Petición	Respuesta	Uso
GET ⁴	/:device /:password /:day /api/:month /:year /:hour /:minute	200 OK	Esta petición permite guardar los datos en el dispositivo “:device” con la fecha mencionada si la combinación “device/password” existe, en la cadena de consulta, admite los parámetros: h = humedad(%), t = temperatura(°C), p= Presión(mmHg), l = intensidad lumínica(W/m ²), pm10 = PM10(ug/m ³), pm25 =PM 2.5(ugm ³), so = SO ₂ (ppb), no = NO ₂ (ppb), o3 = O ₃ (ppb), co = CO(ppb) También se incluyen los parámetros ch4 nh3 voc, los cuales se refieren a metano, amoniaco y compuestos orgánicos volátiles, sin embargo, estos no están soportados por el prototipo.
GET	/api /:device/ :password/ servertime		Esta petición funciona igual a la anterior, pero en vez de guardar los datos con la fecha provista, los guarda con la hora del servidor, siendo esto útil cuando se carece del módulo reloj.
GET	/api /:device/ :password /config	JSON	Obtiene el archivo de configuración de la combinación device/password provista.
POST	/api /:device/ :password		Modifica la configuración de la combinación device/password

³ En el protocolo HTTP se conocen diferentes métodos de comunicación como GET, POST, PUT y DELETE, ellos enmarcan el tipo de petición que se quiere realizar al servidor.

⁴ Por convención, se usa el método POST para enviar y guardar datos en el servidor, sin embargo, se usó el método GET, para facilitar su implementación dentro del prototipo

	/config		provista. En el cuerpo de la petición, admite los parámetros presentes en el archivo de configuración.
GET	/device/:device	JSON	Obtiene los datos del dispositivo cuyo parámetro "name" sea igual a "/:device"
GET	/device	JSON	Obtiene la lista de nombres de los dispositivos registrados en la base de datos
POST	/device	JSON	Registra un dispositivo en la plataforma, con los parámetros provistos en el cuerpo de la petición

Fuente: Autor

12.3.2 Estructura de la base de datos.

El servidor utiliza una base de datos denominada MongoDB, en conjunto con ODM⁵ bastante común llamado Mongoose la cual posee la siguiente estructura de datos:

```

1. module.exports =mongoose.model('device',{
2.   name:      String, // Nombre del dispositivo
3.   password:  String, //Contraseña del dispositivo
4.   description: String, //Descripción del dispositivo
5.   parameters: [String], //Parámetros del dispositivo
6.   owner:     String, //Propietario del dispositivo
7.   email:     String, //email del propietario
8.
9.   lastRegister: {type: Date, default: Date.now}, //Ultima fecha de envío de datos
10.
11.   date:      [Date], //Arreglo con las fechas de medición
12.   humidity:  [Number], //humedad
13.   temperature: [Number],//temperatura
14.   pressure:  [Number],// presión
15.   Location:  [String],//localización en coordenadas geograficas
16.   pst:      [Number], //pst

```

⁵ ODM: acrónimo de "object document mapper", se usa en las bases de datos tipo *NoSQL*, para dar una estructura reconocible y validable, debido que en general las bases de datos *NoSQL* carecen de una estructura interna.

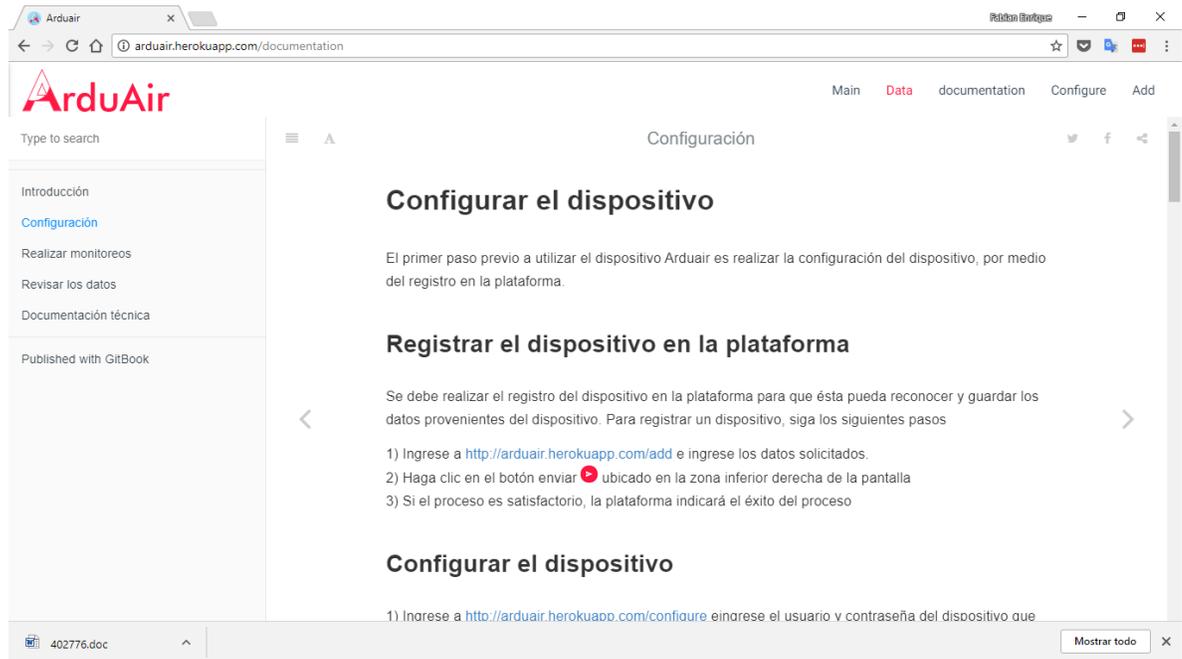
```
17. pm10:      [Number], //P.M. 10
18. pm25:      [Number], //P.M. 2.5
19. so2:       [Number], //SO2
20. no2:       [Number], //NO2
21. o3:        [Number], //O3
22. co:        [Number], //CO
23. ch4:       [Number], //CH (no es un contaminante de criterio)
24. nh3:       [Number] //NH3 (no es un contaminante de criterio)
25. });
```

Etapas 3: Desarrollo de la documentación

Dos tipos de documentación fueron escritas, la documentación técnica, la cual comprende la información necesaria para crear una nueva copia del prototipo y el código fuente, los cuales son necesarios para entender la estructura del proyecto y modificarlo, Esta documentación se encuentra escrita en inglés y alojada en el repositorio de GitHub <https://github.com/fega/arduair>.

Por otro lado, se encuentra el manual del usuario, el cual se encuentra disponible online en <https://fega.gitbooks.io/arduair-user-manual/content/>. O en la plataforma web, tal como se ve a continuación:

Ilustración 7: Documentación alojada en la página web del proyecto



Fuente: Autor

13 ETAPA 4: PRUEBA Y CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES.

Se realizaron pruebas de calibración para los parámetros de humedad, temperatura, nivel de iluminación, presión, ozono y PM10; los parámetros restantes no pudieron ser calibrados debido a las limitaciones de las estaciones de calidad de aire locales.

En todos los casos, usando el software Python Jupyter⁶ en conjunto con las librerías Numpy⁷ y Seaborn⁸, se obtuvo el coeficiente de Pearson (r) y las ecuaciones de calibración mediante regresión lineal, cuyos resultados se encuentran presentes en las ilustraciones.

⁶ Jupyter es un cuaderno interactivo que permite ejecutar código de Python, incluyendo librerías especiales en el manejo de datos y computación algebraica, similar a los cuadernos del software Wolfram mathematica.

⁷ Librería de cálculo estadístico

⁸ Librería de generación de gráficos estadísticos

13.1 Sensores Meteorológicos

Para calibrar los sensores meteorológicos, se realizaron muestreos junto a la estación de calidad de aire “Acrópolis” ubicada en las coordenadas 7°06'22.4"N 73°07'25.1"W , propiedad de la CDMB⁹ , la cual reporta datos con frecuencia horaria; se realizaron muestreos de Humedad, Temperatura, Presión e Iluminación durante las fechas 24 -03-2017 12:00 y 29-03-2017 9:00 pm, en esta etapa el prototipo reportó datos con una frecuencia de aproximadamente 21 segundos, los cuales fueron agrupados en su promedio/hora, durante el monitoreo, el prototipo se mantuvo en el techo de la estación de monitoreo, expuesta a la intemperie, presentándose tanto cielos despejados como lluvias moderadas.

En el caso del sensor de iluminación TSL2561, hubo múltiples lecturas erróneas debido a la sobre exposición del sensor a la luz, estas lecturas, las cuales fueron reportadas por el prototipo como menos uno (-1), fueron eliminadas antes de calcular los promedios/hora.

13.2 Sensores de gas.

Para la calibración y prueba de los sensores de gas se usó como referencia la estación de calidad de aire presente en la Universidad Pontificia Bolivariana, capaz de medir O₃ y SO₂, sin embargo, este último parámetro debió ser descartado debido a problemas con la estación de la UPB, que en ese momento entró en proceso de reparación.

Las pruebas del parámetro ozono se realizaron usando un equipo *Sabio 6030 Ozone Analyzer*, ubicado en el campus universitario de la universidad pontificia bolivariana seccional Bucaramanga, ubicado aproximadamente en las coordenadas 7°02'25.1"N 73°04'17.2"W, zona con pocos edificios y abundante vegetación a los alrededores, y ubicada cerca de los parqueaderos universitarios; el muestreo se

⁹ CDMB: corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga, es una entidad gubernamental autónoma encargadas de la gestión ambiental

llevó a cabo durante las fechas 20-04-2017 5:00 pm y 24-04-2017 3:00pm. Posteriormente los datos fueron agrupados y promediados en intervalos de 30 minutos, en concordancia al equipo de referencia, se realizaron pruebas de correlación entre los dos dispositivos y también con las lecturas de temperatura arrojadas por el mismo prototipo, para analizar su efecto sobre las lecturas.

13.3 Sensor de material particulado

El parámetro PM10 del sensor Shinyei PPD42NS fue comparado junto a un equipo DustTrak (DustTrak drx aerosol monitor 8533ep) durante las fechas 17-04-2017 5:00 pm y 20-04-2017 4:00 pm, el equipo de referencia fue configurado para realizar toma de muestras cada 2 minutos. Durante el procesamiento de los datos, estos fueron promediados a 1, 2 y 3 horas, realizándose al final el cálculo de correlación entre ambos dispositivos; el muestreo se realizó *in-door*, permaneciendo tanto el equipo de referencia como el prototipo dentro de un salón de clases ubicado en un primer piso de la universidad pontificia bolivariana, durante el periodo de muestreo, no se realizó ninguna actividad dentro de la habitación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se introducen los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto, comenzando por la descripción general del dispositivo, plataformas y documentación obtenida y finalizando con los resultados e interpretación obtenidos durante la fase de calibración.

14 DETALLES TÉCNICOS DEL EQUIPO DE MONITOREO

En la Tabla 9 se describen los detalles técnicos del equipo resultante. Los diagramas de diseño del prototipo, protoshield, el diseño de PCB usada para los módulos ZE y el sensor MQ131 y el diagrama esquemático se encuentran en el repositorio de github cuyo enlace se encuentra en la sección de anexos

Tabla 9. Detalles técnicos del prototipo

Parámetro	Valor															
Peso	1360 gramos															
Tipo de Muestreo	Pasivo															
Dimensiones	21x16x12 cm															
Voltaje de entrada	12 v															
Potencia consumida	1 vatios hora (hallada de manera experimental)															
Tiempo de funcionamiento independiente	10 h aproximadamente, con una batería instalada de 2200mAh,35c y 7.4v.															
Conectividad	Wi-fi															
Extracción de datos	Vía SD o HTTP.															
Sensores	<table border="1"><thead><tr><th>Sensor</th><th>Parámetro</th><th>Detalles técnicos.</th></tr></thead><tbody><tr><td>BMP180</td><td>Presión atmosférica.</td><td></td></tr><tr><td>TSL2561</td><td>Luz</td><td>Presenta fallos en respuesta ante intensidades de luz muy altas</td></tr><tr><td>DHT22</td><td>Humedad/ temperatura</td><td></td></tr><tr><td>Shinye y</td><td>Material Particulado</td><td></td></tr></tbody></table>	Sensor	Parámetro	Detalles técnicos.	BMP180	Presión atmosférica.		TSL2561	Luz	Presenta fallos en respuesta ante intensidades de luz muy altas	DHT22	Humedad/ temperatura		Shinye y	Material Particulado	
Sensor	Parámetro	Detalles técnicos.														
BMP180	Presión atmosférica.															
TSL2561	Luz	Presenta fallos en respuesta ante intensidades de luz muy altas														
DHT22	Humedad/ temperatura															
Shinye y	Material Particulado															

ppd42n j		
MQ-131	Ozono	Presenta problemas de sensibilidad debido al cambio de temperatura
ME03-CO	Monóxido de carbono.	Conectado a un módulo ZE03-CO
ME03-SO2	Dióxido de azufre	Conectado a un módulo ZE03-SO2
ME03-NO2	Dióxido de Nitrógeno	Conectado a un módulo ZE03-NO2

Fuente: Autor.

14.1 Precios

A continuación, se listan los precios aproximados del equipo desarrollado para la universidad, consultados a octubre de 2017 con componentes cotizados al detal. El total aproximado ronda la suma de COP \$1.360.000, lo cual contrasta con el valor de estaciones de monitoreo con metodologías certificadas por la EPA, cuyo valor puede iniciar desde los COP \$40.000.000 y ascender fácilmente la suma de COP \$300.000.000.

Tabla 10. Costos del equipo desarrollado

Item	Precio
Arduino Mega	50000
Sensor MQ-131-low-ppb	29000
Sensor ZE03-CO	235000
Sensor ZE03-SO2	235000
Sensor ZE03-NO2	235000
Sensor BMP180	14000
Sensor TSL2561	12000
Sensor DHT22	30000
Sensor Shinyey ppd42nj	20000
Shield wifi	200000

Protoshield	20000
Cables y resistencias,etc	50000
Carcasa	180000
Total:	1310000

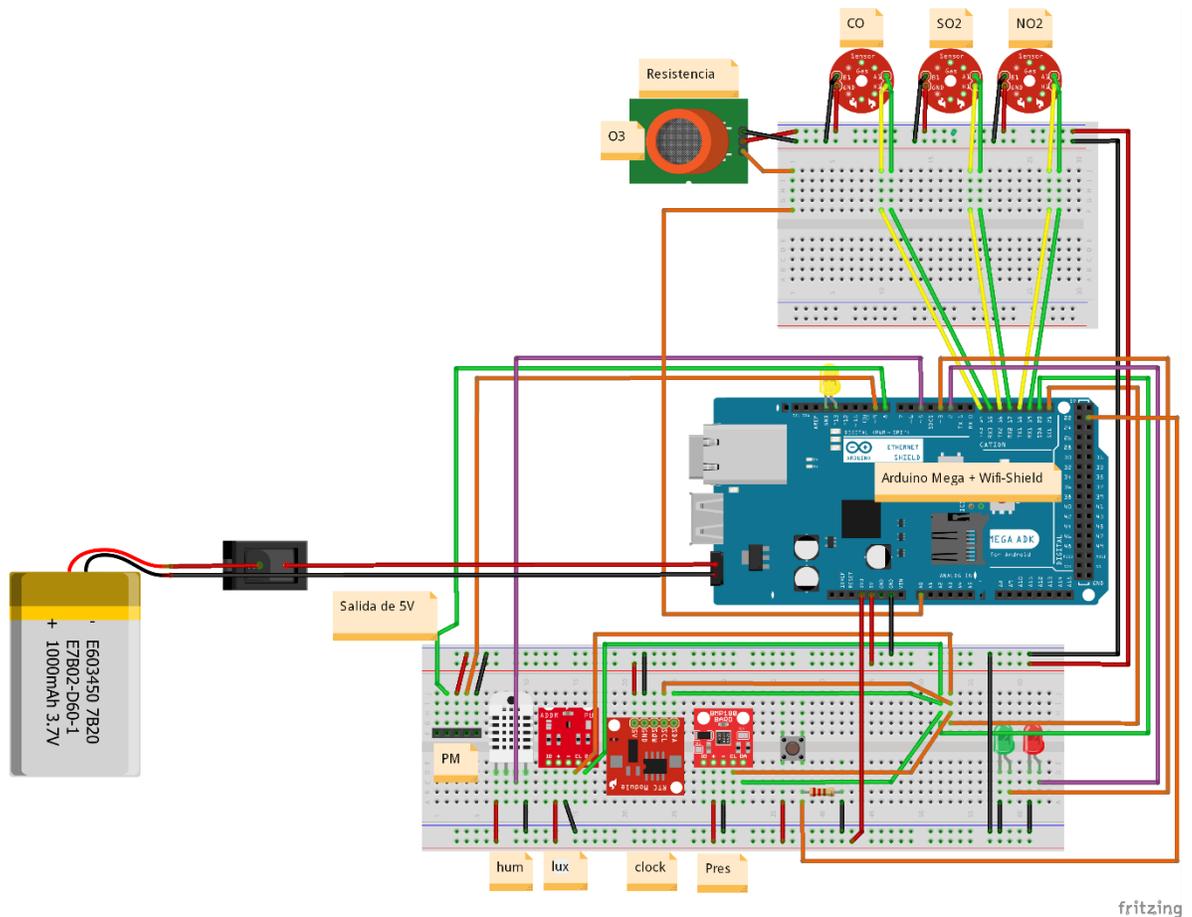
Fuente: Sparkfun, Mercadolibre, TDelectronica, Ebay, entre otros.

15 DETALLES TÉCNICOS DE LA PLATAFORMA

La plataforma es capaz de recibir los datos transmitidos por el equipo en cuestión bajo sencillas peticiones de HTTP, además su diseño *responsive* permite el acceso fácil desde terminales móviles, las cuales son las principales vías de acceso a internet por parte de los estudiantes.

Actualmente, la plataforma se encuentra alojada en un servidor de prueba de *Heroku* (<https://heroku.com>) y una base de datos gratuita provista por *Mlab* (<http://mlab.com>) sin embargo, se espera que, en el futuro, esta plataforma pase a ser parte de los servidores de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Ilustración 8: Diagrama del dispositivo, tal como se muestra en la documentación técnica. Realizado con el software fritzing



Fuente: Autor.

16 RESULTADOS DE CALIBRACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO.

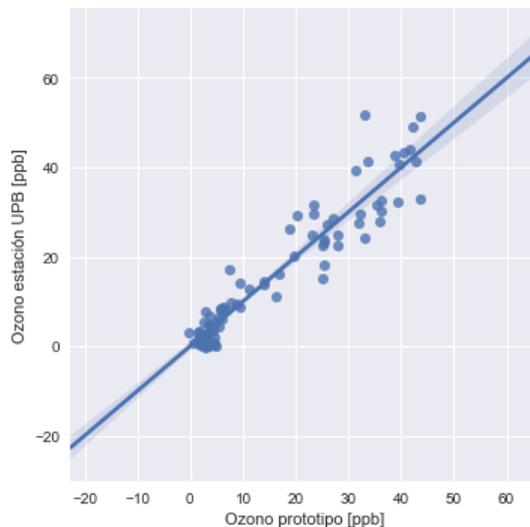
El prototipo obtenido mostró un comportamiento fiable y sin problemas durante las pruebas de calibración, aún bajo temperaturas internas de 51.8 °C y condiciones de lluvias intensas

16.1 Sensores de gas

16.1.1 Ozono

En el caso del sensor de ozono MQ131 (Ilustración 9), se mostró una correlación de 0.95, un valor bastante positivo, más aun teniendo en cuenta que la mayoría de los valores obtenidos por el equipo de referencia estuvieron por debajo de la concentración mínima de detección reportada por el fabricante del sensor (10 PPB); por otro lado, las ecuaciones provistas por la documentación oficial del sensor, se mostraron inútiles a la hora de obtener los resultados de concentración del sensor. Es por ello por lo que el valor aquí reportado se obtuvo posterior a la calibración de los valores directamente reportados por el sensor, sin ningún tipo de tratamiento previo.

Ilustración 9. Resultados de calibración del ozono con respecto al equipo de referencia, promedios de 1h



Pearson r

$$r = 0.95$$

Ecuación de calibración

$$O_3(\text{PPB}) = x^* - 157.66628358901926 + 786.9167306746191$$

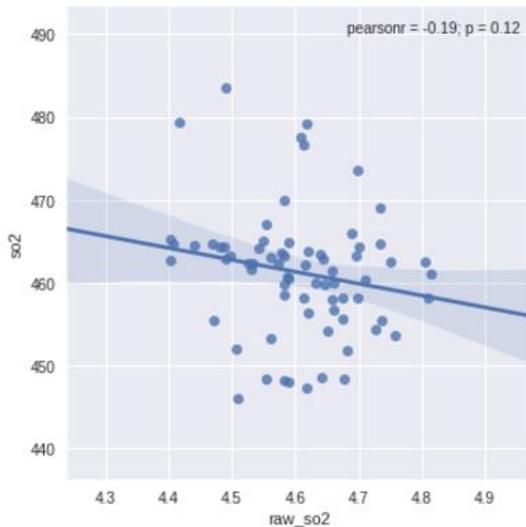
Fuente: Autor

16.1.1.1 Dióxido de Azufre

Para el caso del SO_2 (Ilustración 10), la baja correlación no fue sorprendente, debido a que el sensor usado, como se expresa en su documentación, solo cambia su señal de manera notable ante mayores niveles de SO_2 , los cuales no se registraron.

durante las pruebas realizadas, sin embargo, como se aclaró anteriormente, los resultados no son concluyentes debido a problemas de funcionamiento con equipos de referencia

Ilustración 10. Resultados de calibración Dióxido de azufre con respecto al equipo de referencia, promedios de 1h.



Pearson r:

$r = -0.19$

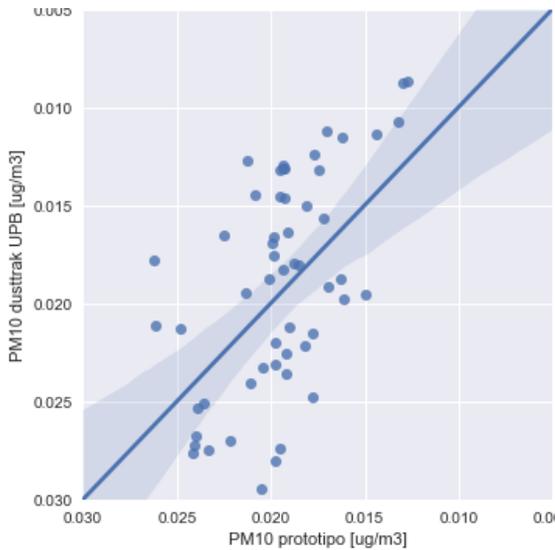
No se generaron ecuaciones de calibración, Debido a su baja correlación.

Fuente: Autor.

16.2 Sensor de material particulado

Los resultados crudos del sensor shinyei PPD42NS (Ilustración 11), se mostraron altos niveles de oscilación, por lo cual se realizaron pruebas con promedios cada 1,2 y 3 horas cuya correlación con respecto a los resultados fue de 0.48, 0.52 y 0.64 respectivamente, esto se muestra acorde con los resultados obtenidos por la EPA (US EPA 2016), si bien esta correlación puede parecer baja, cabe recalcar que se usaron los valores de filtrado por defecto del dispositivo y además, se ha reportado de manera informal una mejora en la correlación con respecto a otros dispositivos si se adjunta un ventilador a este tipo de sensores en vez de confiar en el muestreo pasivo (indiaairquality 2014), por cual queda abierta la posibilidad a mayor experimentación.

Ilustración 11. Resultados de calibración del PM₁₀ con respecto al equipo de referencia, promedios de 1h y 3h, respectivamente

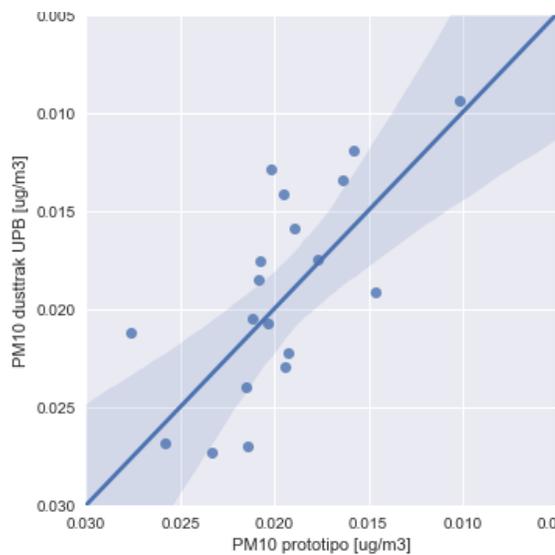


Pearson r

$$r = 0.48$$

Ecuación de calibración

$$\text{PM10 (ug/m}^3\text{)} = x^* - 7.386462397051218 + 735.7745124254552$$



Pearson r

$$r = 0.64$$

Ecuación de calibración

$$\text{PM10 (ug/m}^3\text{)} = x^*1.4219421084150127e-07 + 0.0023909852287479$$

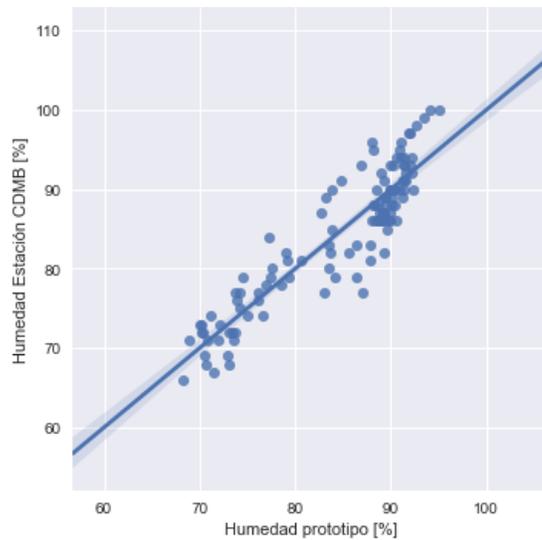
Fuente: Autor

16.3 Sensores meteorológicos

Los resultados mostrados por los sensores de Luminosidad, Humedad, Temperatura y presión son bastante satisfactorios, con correlaciones de entre 0.88 y 0.96 (Ilustraciones 11, 12, 13 y 14), con respecto a la estación de referencia. La correlación más baja fue generada por el sensor de temperatura, el cual muestra

picos mucho más altos de lo esperado, posiblemente debido al calentamiento del prototipo producto de su exposición al sol.

Ilustración 12. Resultados de calibración de humedad con respecto al equipo de referencia, promedios de 1h



Pearson r

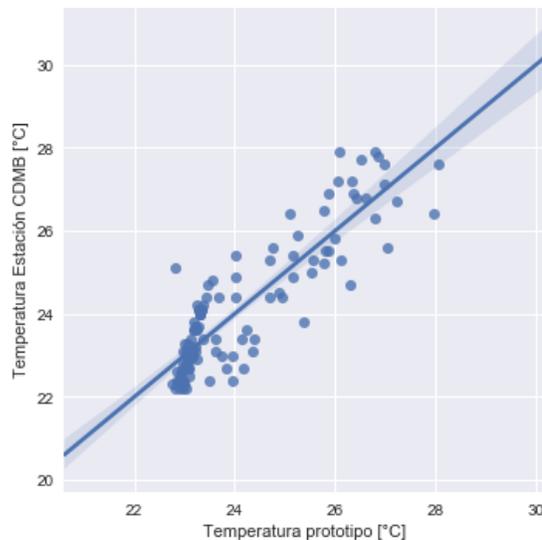
$r = 0.91$

Ecuación de calibración

$\text{Humedad (\%)} = x \cdot 0.364744 + 64.025105$

Fuente: Autor

Ilustración 13. Resultados de calibración de la temperatura con respecto al equipo de referencia, promedios de 1h



Pearson r

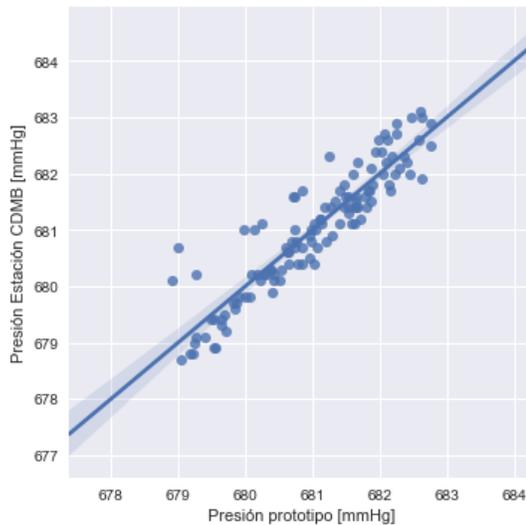
$r = 0.88$

Ecuación de calibración

$\text{Temperatura (°C)} = x \cdot 0.168889 + 19.265576$

Fuente: Autor

Ilustración 14. Resultados de calibración del de la presión. con respecto al equipo de referencia, promedios de 1h



Pearson r

$r = 0.92$

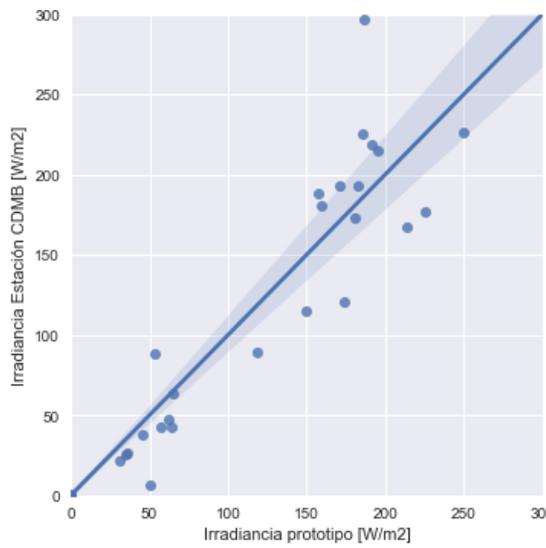
Ecuación de calibración

Presión (mmHg) = $x \cdot 0.7182389 + 28.010073$

Fuente: Autor

En el caso del sensor de luminosidad se presentaron gran cantidad de mediciones fallidas, las cuales son arrojadas en el equipo como números negativos, esto parece ser debido a la sobreexposición del sensor a la luz solar, la cual podría ser solventada modificando los parámetros de ganancia y tiempo de integración (similar a una cámara fotográfica); Estos parámetros, sin embargo, deberían ser modificados dinámicamente durante la ejecución, posiblemente dependiendo de otros parámetros como la hora y las lecturas previas, por lo cual mayor investigación es necesaria.

Ilustración 15. Resultados de calibración del ozono con respecto al equipo de referencia, promedios de 1h



Pearson r

$r = 0.96$

Ecuación de calibración

Radiación(W/m2) $y = x*0.013153 - 1.645152$

Fuente: Autor.

CONCLUSIONES

- Se desarrollo un equipo *open source* basado en tecnologías low-cost cuyo costo se encuentra por debajo de COP \$ 1.500.000, que puede ser usado como una herramienta de apoyo metodológico para los estudiantes de Ingeniería ambiental y contaminación atmosférica.
- Los sensores de humedad, temperatura, presión y luminosidad y ozono, con una correlación de 0.91, 0.88, 0.92, 0.96 y 0.95, respectivamente muestran un comportamiento confiable para la implementación tanto en el aula de clases como para redes de monitoreo de bajo costo
- Para el sensor de PM10, se obtuvo una correlación menor a los sensores mencionados anteriormente; su correlación (0.68 en promedios de 3 horas) puede ser considerada suficiente para uso didáctico, como sistema de alarma para identificar áreas que requieran mediciones con equipos más robustos, o para la generación de datos locales para ser usados en actividades de clase.
- El software generado, cuenta con la capacidad de recolectar datos, generar índices de calidad de aire (*Instant AQI*) y mostrarlos dentro de una plataforma web accesible tanto en equipos de escritorio y dispositivos móviles.
- Tanto la documentación como los esquemas de fabricación se encuentran disponibles en la plataforma de colaboración “Open Source” más grande del momento (GitHub) brindando acceso libre a cualquier individuo para ser reproducido o mejorado.

RECOMENDACIONES

Si bien la calibración de una bomba de aire de flujo constante puede llegar a ser compleja, el uso de ésta para crear un muestreador de tipo *closed path*, es preferido por su mejora en la exactitud de los resultados generados.

Los Sensores usados deberían ser puestos bajo mayor análisis para encontrar su precisión y desviación estándar real, así como las condiciones óptimas de funcionamiento, también se recomienda hacer pruebas con sus contrapartes más avanzadas, tales como el Shinyei PPD60PV-T2 y los sensores ME-10 series. Así mismo, es recomendable someter al sensor de PM a nuevas pruebas de funcionamiento donde se realicen cambios de implementación antes de dar un veredicto sobre su desempeño. Con una inversión mayor, pero aun significativamente inferior a la que requeriría una estación de monitoreo de calidad del aire, sería posible desarrollar un prototipo con base en sensores de mayor sensibilidad, especialmente para la medición de concentración de contaminantes complejos como el material particulado. Esta puede ser una solución económica y fácil de implementar para ciudades pequeñas e intermedias para mantener un sistema de vigilancia de la calidad del aire.

Para el servidor, se recomienda el uso de funciones asíncronas en el cálculo del AQI y el cambio a una base de datos relacional para el almacenamiento de datos.

El cambio del shield wi-fi por un módulo GPRS es recomendado para generar independencia de los fallos en las redes wi-fi, así como los problemas generados después del cambio en la infraestructura de redes de la universidad, sin embargo, se debe considerar en este caso añadir un mayor tiempo de retardo entre cada medición, debido al costo añadido de enviar información por medio de mensajes de texto.

Se recomienda implementar futuras medidas para aislar el equipo de los rayos solares y evitar su calentamiento, lo cual podría estar afectando los resultados arrojados por los sensores.

Considerar la implementación de los sensores, los cuales han demostrado buenos resultados durante pruebas realizadas por la EPA o fueron diseñados específicamente para monitoreo de calidad de aire:

Sensor	Contaminante
Aeroqual SM50	Ozono
MiCS-2710	NO ₂ , CO
Linea Alphasense	NO ₂ , SO ₂ , CO, O ₃
Linea Winsen ZE10	NO ₂ , SO ₂ , CO, O ₃
MiCS-2611	O ₃
Shinyei PPD60PV-T2 con un ventilador adjunto	PM

BIBLIOGRAFÍA

AirNow US EPA. 2015. "AirNow API - Air Quality 101."
<https://docs.airnowapi.org/aq101?aq101=>.

Arduino Foundation. 2015. "Arduino Playground - DHTLib." *November 06, 2015, at 06:18 AM*. <http://playground.arduino.cc/Main/DHTLib>.

Area Metropolitana del Valle de Aburrá. 2016. "ICA." Accessed May 26.
<http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/Paginas/ica.aspx>.

Banzi, Massimo. 2015a. "Arduino." <http://www.arduino.cc/>.

———. 2015b. "Arduino MEGA ADK." *Arduino MEGA ADK*.
<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMegaADK>.

Cakmak, Sabit, Chris Hebborn, Jennifer Vanos, Dan L Crouse, and Rick Burnett. 2016. "Ozone Exposure and Cardiovascular-Related Mortality in the Canadian Census Health and Environment Cohort (CANCHEC) by Spatial Synoptic Classification Zone." *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)* 214 (April): 589–99. doi:10.1016/j.envpol.2016.04.067.

Change Intergovernmental Panel on Climate. 1996. "Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories." Intergovernmental Panel for Climate Change.

Chengxiang Wang, Longwei Yin *, Luyuan Zhang, Dong Xiang and Rui Gao. 2010. "Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors." *Sensors*.

Chu, Benjamin. 2012. *Laser Light Scattering: Basic Principles and Practice*. Dec 2. 2nded. Academic Press, 2012.
<https://books.google.com.co/books?id=zFq9lojBJd0C&printsec=frontcover&dq=Laser+Light+Scattering&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjh4tzmoOrRAhXI6CYKHXTGAcUQ6AEIjAA#v=onepage&q=Laser+Light+Scattering&f=false>.

DEFRA-UK. 2015. "Automatic Urban and Rural Network (AURN)." *26 October 2015*. Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra), Nobel House, 17 Smith Square, London SW1P 3JR helpline@defra.gsi.gov.uk. <https://uk-air.defra.gov.uk/networks/network-info?view=aurn>.

Dye, Tim. 2012. "Desired Characteristics and Information about Major Air Pollutants for Device Manufacturers to Use in Creating Instruments for Non-Regulatory Monitoring (E.g., Citizens, Schools, NGOs)." Sonoma Technology.
<https://airqualityegg.wikispaces.com/file/view/Pollutant+Table.doc/284357422/Pollutant+Table.doc>.

- . 2014. “Airqualityegg Hardware-Sensors.”
<https://airqualityegg.wikispaces.com/Hardware-Sensors>.
- EPA. 2016. “Criteria Air Pollutants.” Accessed May 25.
<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>.
- figaro-sensor. 2016. “Catalytic-Type Sensors: Operating Principle.”
<http://www.figarosensor.com/technicalinfo/principle/catalytic-type.html>.
- Flanagan, David. 2006. *JavaScript: The Definitive Guide*. Edited by Inc O’Reilly Media. 5th ed. O’Reilly Media, Inc.
https://books.google.com.co/books?id=2weL0iAfrEMC&dq=javascript&source=gb_s_navlinks_s.
- Fritzing, friends for, and IXDS. 2015. “Fritzing.” *Fritzing, Electronics Made Easy*.
<http://fritzing.org/home/>.
- Git-official-WebSite. 2016. “GIT --Distributed-Is-the-New-Centralized.” <https://git-scm.com/>.
- Github. 2016. “What Is GitHub?” <https://guides.github.com/activities/hello-world/>.
- Government of Canada. 2016. “National Air Pollution Surveillance Program (NAPS).” Accessed June 2. <http://www.ec.gc.ca/rnsps-naps/>.
- Guevara, Manuel. 2008. “Humedad Atmosferica.” In *Problemas Fundamentales En Meteorologia*, 67. Caracas: Fondo Editorial Humanidades.
[https://books.google.com.co/books?id=Gp0tLWUgCzsC&pg=PA67&dq=humedad+atmosferica&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiHpu72sOLNAhXE9x4KHVHfA6EQ6AEIGjAA#v=onepage&q=humedad atmosferica&f=true](https://books.google.com.co/books?id=Gp0tLWUgCzsC&pg=PA67&dq=humedad+atmosferica&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiHpu72sOLNAhXE9x4KHVHfA6EQ6AEIGjAA#v=onepage&q=humedad%20atmosferica&f=true).
- Hanwei Henan Electronics Co. 2015. “ME2-CO ME2-CO Carbon Monoxide Sensor Manual ME2-CO.” www.hwsensor.com.
- Hasenfratz, David, Olga Saukh, and Lothar Thiele. n.d. “On-the-Fly Calibration of Low-Cost Gas Sensors.”
- indiaairquality. 2014. “Calibrating the Shinyei PPD Sensors.” *Indiaairquality*.
<https://indiaairquality.com/2014/09/15/calibrating-the-shinyei-ppd-sensors-part-2/>.
- Islas, Jorge, and Genice Grande. 2008. “Abatement Costs of SO₂-Control Options in the Mexican Electric-Power Sector.” *Applied Energy* 85 (2–3): 80–94.
doi:10.1016/j.apenergy.2007.09.003.
- KIYOURA, RAISAKU, and MILTON MUNIDASA. 1971. “AVAILABLE DESULFURIZATION TECHNOLOGY AND ITS APPLICATION TO THE

RATIONAL UTILIZATION OF FOSSIL FUEL.” In *Proceedings of the Second International Clean Air Congress*, edited by H M ENGLUND and W T BEERY, 842–50. Academic Press. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-239450-8.50151-9>.

Korotcenkov, G. 2013. *Handbook of Gas Sensor Materials: Properties, Advantages and Shortcomings for Applications Volume 1: Conventional Approaches*. Integrated Analytical Systems. Springer New York.
<https://books.google.com.co/books?id=iSzhAAAAQBAJ>.

Kulkarni, Pramod, Paul A. Baron, and Klaus Willeke. 2011. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. Edited by Klaus Willeke Pramod Kulkarni, Paul A. Baron. 3rded. John Wiley & Sons.
<https://books.google.com.co/books?id=ETvXooNW4-EC&pg=PA256&dq=Beta+attenuation+monitoring&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwin9luWnurRAhXEWCYKHQt1BV4Q6AEIGDAA#v=onepage&q=Beta+attenuation+monitoring&f=false>.

Kumar, Prashant, Andreas N. Skouloudis, Margaret Bell, Mar Viana, M. Cristina Carotta, George Biskos, and Lidia Morawska. 2016. “Real-Time Sensors for Indoor Air Monitoring and Challenges Ahead in Deploying Them to Urban Buildings.” *Science of The Total Environment* 560: 150–59.
doi:10.1016/j.scitotenv.2016.04.032.

Lee, Andrew P, and Brian J Reedy. 1999. “Temperature Modulation in Semiconductor Gas Sensing.” *Sensors and Actuators B: Chemical* 60 (1): 35–42.
doi:10.1016/S0925-4005(99)00241-5.

Lodge Jr., James P. 1988. *Methods of Air Sampling and Analysis*. 3rded. CRC Press. https://books.google.com.co/books?id=GCizU2-Rj18C&pg=PA296&lpg=PA296&dq=Nondispersive+Infrared+Photometry&source=bl&ots=TPpop1SOi5&sig=RJGpBXWS9qfAe_tYU5Uj9RP8OHM&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiS_OuUpeLRAhXC4CYKHWuFBhAQ6AEIRTAf#v=onepage&q=Nondispersive+Inf.

Lu, Xingcheng, Teng Yao, Ying Li, Jimmy C H Fung, and Alexis K H Lau. 2016. “Source Apportionment and Health Effect of NO_x over the Pearl River Delta Region in Southern China.” *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)* 212 (May): 135–46. doi:10.1016/j.envpol.2016.01.056.

Masson, N., R. Piedrahita, and M. Hannigan. 2015. “Approach for Quantification of Metal Oxide Type Semiconductor Gas Sensors Used for Ambient Air Quality Monitoring.” *Sensors and Actuators B: Chemical* 208: 339–45.
doi:10.1016/j.snb.2014.11.032.

Mead, M.I., O.A.M. Popoola, G.B. Stewart, P. Landshoff, M. Calleja, M. Hayes, J.J. Baldovi, et al. 2013. "The Use of Electrochemical Sensors for Monitoring Urban Air Quality in Low-Cost, High-Density Networks." *Atmospheric Environment* 70 (May): 186–203. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.11.060.

Mihelcic, J, and J Zimmerman. 2012. "Ingeniería Ambiental: Fundamentos, Sustentabilidad." *Diseño. Alfaomega. México*, 530–31.

Miluzzo, Emiliano, Nicholas D Lane, Andrew T Campbell, and Reza Olfati-Saber. n.d. "CaliBree: A Self-Calibration System for Mobile Sensor Networks."

Nazelle, Audrey de, Edmund Seto, David Donaire-Gonzalez, Michelle Mendez, Jaime Matamala, Mark J Nieuwenhuijsen, and Michael Jerrett. 2013. "Improving Estimates of Air Pollution Exposure through Ubiquitous Sensing Technologies." *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)* 176 (May): 92–99. doi:10.1016/j.envpol.2012.12.032.

Office of Air Quality Planning and Standards. 2016a. "Carbon Monoxide | Air & Radiation | US EPA." Accessed May 25. <https://www3.epa.gov/airquality/carbonmonoxide/>.

———. 2016b. "Ozone Pollution." Accessed May 25. <https://www.epa.gov/ozone-pollution>.

———. 2016c. "Particulate Matter | Air & Radiation | US EPA." Accessed May 25. <https://www3.epa.gov/pm/>.

———. 2016d. "Sulfur Dioxide | Air & Radiation | US EPA." Accessed May 25. <https://www3.epa.gov/airquality/sulfurdioxide/>.

Peter Wayner. 2016. "21 Hot Programming Trends -- and 21 Going Cold | InfoWorld." *InfoWorld*, March 10. <http://www.infoworld.com/article/3039935/application-development/21-hot-programming-trends-and-21-going-cold.html>.

Petzold, A, T Onasch, P Keabian, and A Freedman. 2013. "Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems Intercomparison of a Cavity Attenuated Phase Shift-Based Extinction Monitor (CAPS PMex) with an Integrating Nephelometer and a Filter-Based Absorption Monitor." *Atmos. Meas. Tech* 6: 1141–51. doi:10.5194/amt-6-1141-2013.

Pipitone, Emiliano, and Giuseppe Genchi. 2016. "NOX Reduction and Efficiency Improvements by Means of the Double Fuel HCCI Combustion of Natural Gas–gasoline Mixtures." *Applied Thermal Engineering* 102 (June): 1001–10. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.04.045.

Playground, Arduino. 2013. "MQ Gas Sensors."
<http://playground.arduino.cc/Main/MQGasSensors>.

Raub, James A., Monique Mathieu-Nolf, Neil B. Hampson, and Stephen R. Thom. 2000. "Carbon Monoxide Poisoning — a Public Health Perspective." *Toxicology* 145 (1): 1–14. doi:10.1016/S0300-483X(99)00217-6.

Riehl, J M, Contrib Simpson, Atmos, and D Phys. 1979. "Tropospheric Air Pollution: Ozone, Airborne Toxics, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and Particles." *Science J. Meteorol. Soc. Jpn. J. Atmos. Sci. W. R. Stockwell and D. Kley, Ber. Forschung-Szentrum Jü Lich. Jü L Atm. Environ* 52 (31): 2868–557.

Salter, Eddie. 2005. "Active versus Passive Air Sampling." http://www.envirotech-online.com/articles/health-and-safety/10/eddie_salter/active_versus_passive_air_sampling_-_eddie_salter/923/.

Schmidt, Kamila, and Ian Podmore. 2015. "Current Challenges in Volatile Organic Compounds Analysis as Potential Biomarkers of Cancer." *Journal of Biomarkers* 2015. Hindawi Publishing Corporation: 1–16. doi:10.1155/2015/981458.

SGX Sensortech. 2005. "MiCS Application Note 2 Frequently Asked Questions for MiCS Gas Sensors." England.
https://sgx.cdistore.com/datasheets/e2v/AN2_FAQ_MiCS.pdf.

Shinyei Corporation. 2010. "Particle Sensor Model PPD42NS." New York: Shinyei Corporation of America. http://www.seeedstudio.com/wiki/images/4/4c/Grove_-_Dust_sensor.pdf.

SparkFun. 2014. "TSL2561 Luminosity Sensor Hookup Guide."
<https://learn.sparkfun.com/tutorials/tsl2561-luminosity-sensor-hookup-guide/all>.

Spinelle, Laurent, Michel Gerboles, Maria Gabriella Villani, Manuel Aleixandre, and Fausto Bonavitacola. 2015. "Field Calibration of a Cluster of Low-Cost Available Sensors for Air Quality Monitoring. Part A: Ozone and Nitrogen Dioxide." *Sensors and Actuators B: Chemical* 215: 249–57. doi:10.1016/j.snb.2015.03.031.

SWCAA. 2014. "Weather Influences Air Quality." *SWCAA NEWS ARCHIVE*.
<http://www.swcleanair.org/News.asp?ID=50>.

Telos company. 2015. "I2C – What's That?" Accessed April 5. <http://www.i2c-bus.org/>.

Thermo Environmental Instruments Inc. 1993. "Pulsed Fluorescence SO₂ Analyzer, Instruction Manual." Franklin, Massachusetts.
http://pas.ce.wsu.edu/CE415/SO2_TECO_43B.pdf.

Torrente Artero, Oscar. 2013. "Hardware Arduino." In *Arduino : Curso Práctico de Formación*, edited by RC Libros, 588. RC Libros.
https://books.google.com.co/books?id=6cZhDmf7suQC&dq=shields+arduino&source=gbs_navlinks_s.

U.S. General Services Administration, and National Archives and Records Service. 1998. *Code of Federal Regulations*. Edited by U.S. General Services Administration. Washington: U.S. General Services Administration.

UNAD. 2016. "Lección 5. Contaminantes Primarios Y Secundarios, Criterio Y No Criterio." Accessed May 25.
http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358007/Contenido_en_linea_Caracterizacion/leccin_5_contaminantes_primarios_y_secundarios_criterio_y_no_criterio.html.

United States. Environmental Protection Agency, National Center for Atmospheric Research (U.S.), American Society for Testing and Materials. Committee D-22 on Methods of Sampling and Analysis of Atmospheres. 1974. *Instrumentation for Monitoring Air Quality: A Symposium*. Edited by ASTM International. 1sted. ASTM International.
[https://books.google.com.co/books?id=DiRevS__HUKC&pg=PA20&dq=flame+photometric+air+pollution&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi90LX0o-rRAhXBMSYKHSHgA6cQ6AEIGDAA#v=onepage&q=flame photometric air pollution&f=false](https://books.google.com.co/books?id=DiRevS__HUKC&pg=PA20&dq=flame+photometric+air+pollution&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi90LX0o-rRAhXBMSYKHSHgA6cQ6AEIGDAA#v=onepage&q=flame%20photometric%20air%20pollution&f=false).

US EPA. 2016. "Evaluation of Emerging Air Pollution Sensor Performance." *Air Sensor Toolbox*. <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/evaluation-emerging-air-pollution-sensor-performance>.

US EPA Climate Change Division. 2016. "Methane Emissions." Accessed May 26.
<https://www3.epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/ch4.html>.

USEPA. 1976. *Pararosaniline Method for the Determination of Sulfur Dioxide in the Atmosphere--Technicon II Automated Analysis System*. 1sted. North Carolina: USEPA.
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/9100Q7LP.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=Prior+to+1976&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&>.

Weather Station Data Logger project. 2011. "Bosch BMP085 Barometer Floating Point Pressure Calculations."

WinsenSensor. 2016. "MP135 Air-Quality Gas Sensor." <http://www.winsensor.com/products/flat-surfaced-gas-sensor/mp135.html>.

World Air Quality Index Project. 2011. "The Shinyei Experiment."

———. 2015. “A Beginner’s Guide to Air Quality Instant-Cast and Now-Cast.”
<http://aqicn.org/faq/2015-03-15/air-quality-nowcast-a-beginners-guide/es/>.

World Health Organization. 2013. “Health Effects of Particulate Matter: Policy Implications for Countries in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia.” *Journal of the Korean Medical Association* 50 (2): 20. doi:10.5124/jkma.2007.50.2.175.

ANEXOS

17 ENLACES ADICIONALES

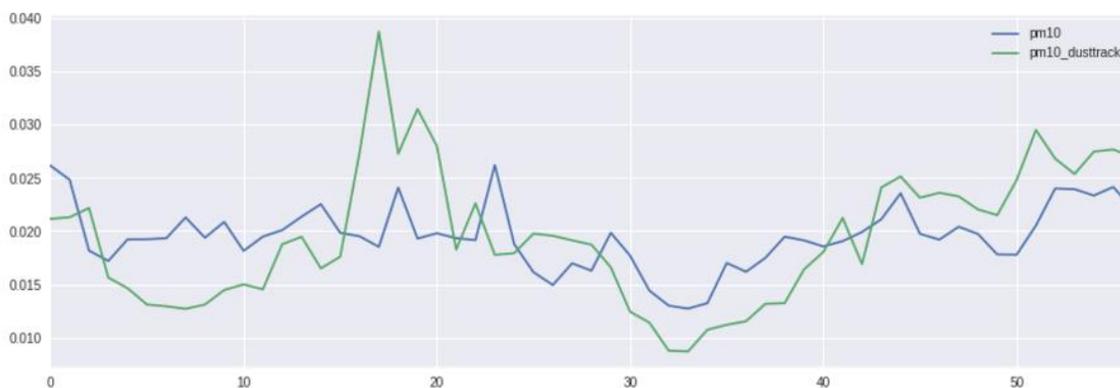
Tabla 11. Enlaces adicionales

Descripción	Enlace
Código fuente servidor / cliente	https://github.com/fega/arduair
Código fuente hardware	https://github.com/fega/arduair-hardware
Data y libretas Jupyter con calibración	https://github.com/fega/arduair-calibration
Servidor alojado en la nube	https://github.com/fega/arduair
Manual de instrucciones	https://www.gitbook.com/book/fega/arduair-user-manual/details
Manual de construcción	https://github.com/fega/arduair/blob/master/docs/build-an-Arduair-device.md

Fuente: Autor

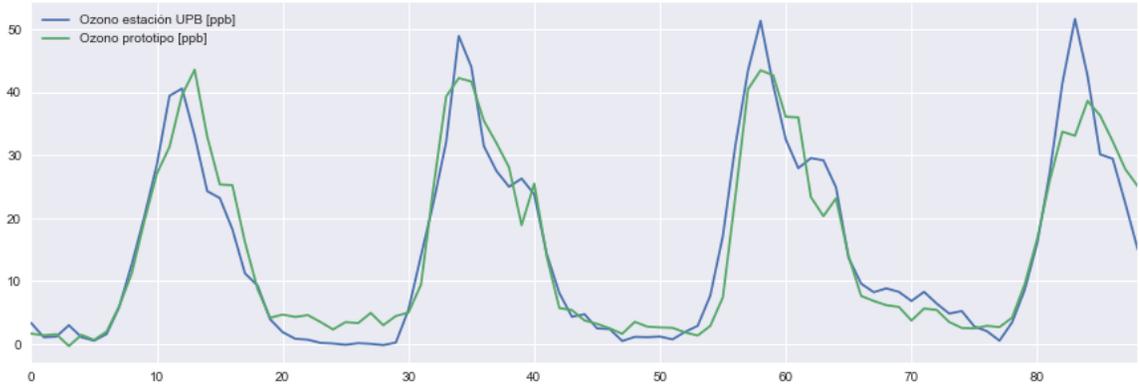
18 GRÁFICOS COMPARATIVOS

Ilustración 16. Comparación Material Particulado (mg/m³), Arduair vs dusttrack



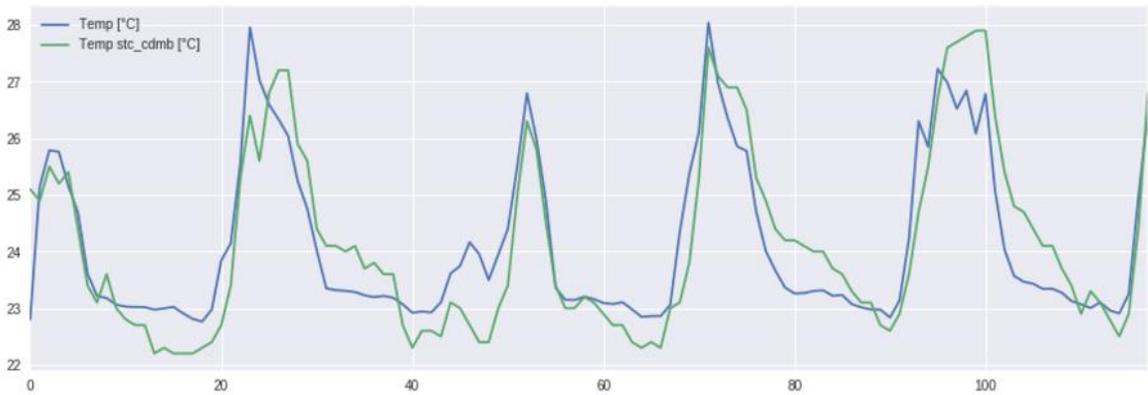
Fuente: autor

Ilustración 17. Comparación Ozono (ppb) arduair vs Sabio 6030 Ozone Analyzer



Fuente: Autor

Ilustración 18. Comparación Temperatura, Arduair vs estación acrópolis



Fuente: autor

Ilustración 19. Comparación presión, Dispositivo vs Estación Acrópolis

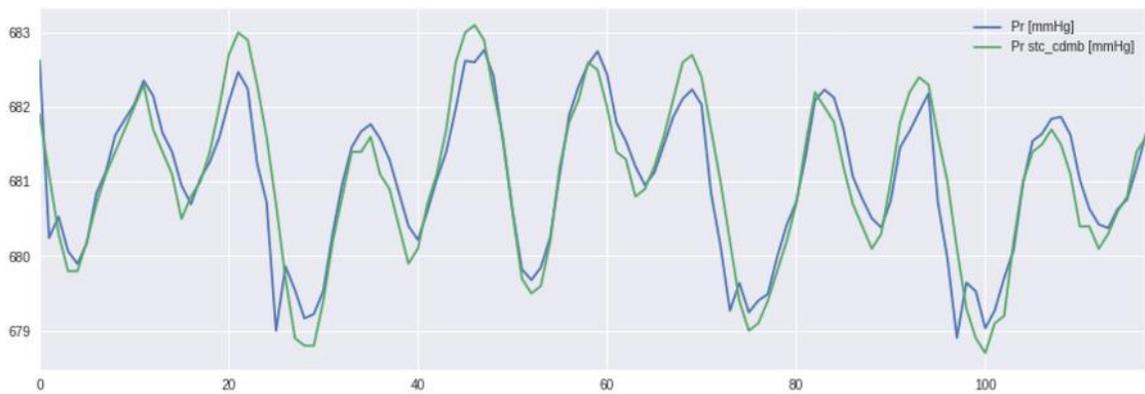
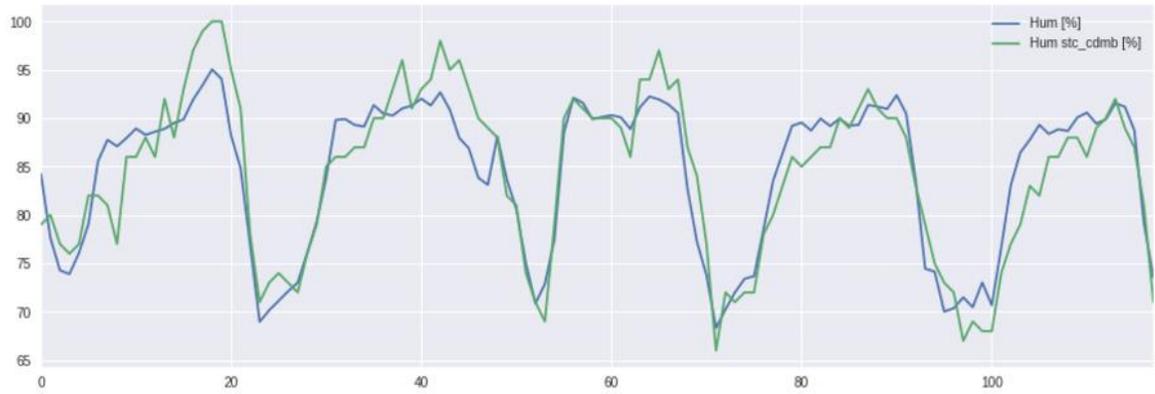
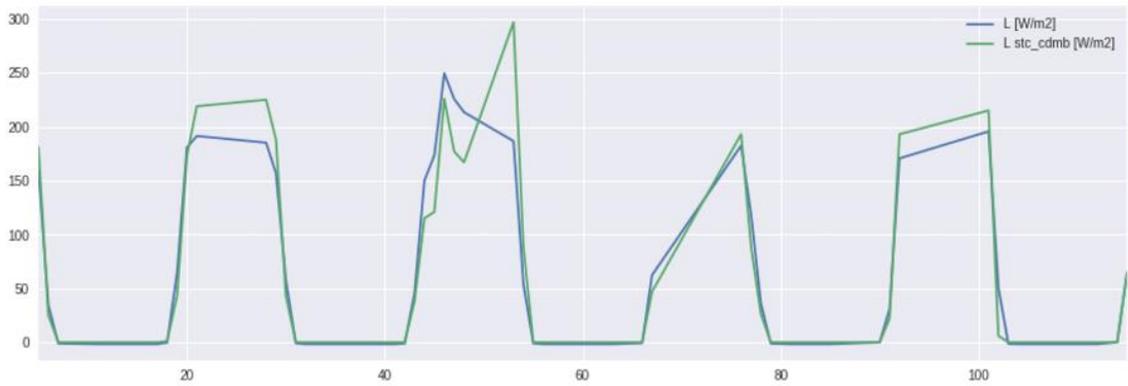


Ilustración 20. Comparación Humedad, Arduair vs estación Acrópolis



Fuente: Autor

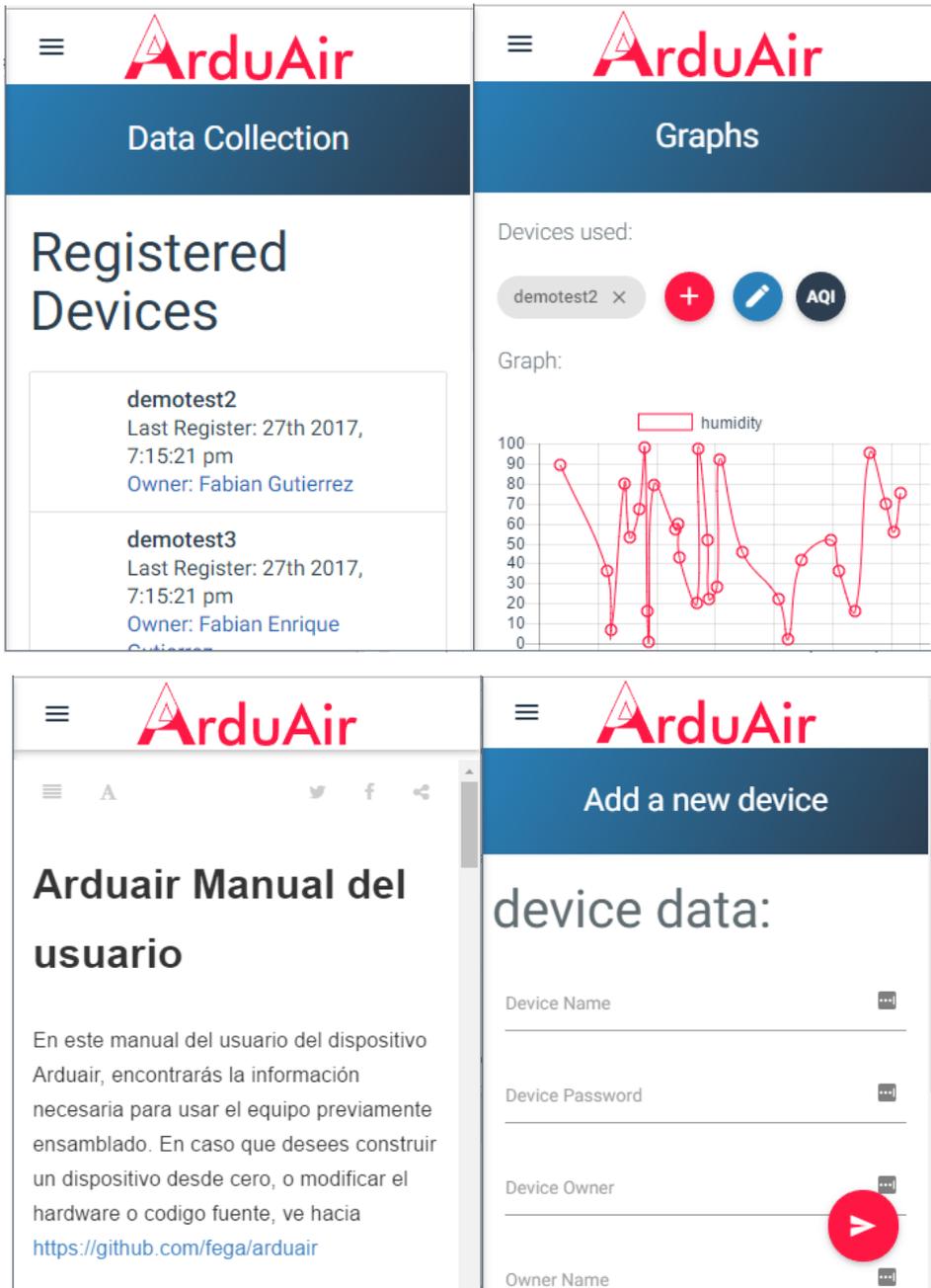
Ilustración 21. Comparación irradiancia Arduair vs Estación Acrópolis



Fuente: autor

1.1 Diseño de la plataforma web

Ilustración 22. Pantallas de selección y visualización de datos, Pantallas de Manual de usuario y añadir nuevo dispositivo



Fuente Autor