



Calibración y validación de dos equipos de bajo costo para la medición de material particulado a partir de los modelos de regresión lineal simple y múltiple

Lina María Gamba Gallego

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, 4 de mayo de 2022

Calibración y validación de dos equipos de bajo costo para la medición de material particulado a partir de los modelos de regresión lineal simple y múltiple

Lina María Gamba Gallego

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniera Ambiental

Directora
Laura Cabezas Pinzón

Línea de Investigación: Gestión integral sustentable, grupo de investigación Choc Izone

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia

2022

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Dedicatoria y agradecimientos

Le doy gracias a todas las personas que participaron y estuvieron presentes de cualquier forma en el trabajo de grado que culminó satisfactoriamente, a mis padres que me han acompañado y apoyado a lo largo del proceso y estuvieron dispuestos a ayudarme en lo que necesitara.

A mi directora de tesis, Laura Cabezas quien siempre estuvo a disposición para enseñar y guiar de la mejor manera, y que con mucha dedicación y compromiso me apoyó de principio a fin en el desarrollo y culminación del proyecto de grado.

A mi Sofia Martinez, quien siempre estuvo presente en el desarrollo del proyecto y aportó con sus conocimientos con la mejor disposición y dedicación. Y a los profesores e investigadores del Instituto de Salud y Ambiente por hacer parte e influir de manera positiva que desde su conocimiento guiaron para las bases del proyecto.

Agradezco a los estudiantes de estadística Karen Torres y David Rojas, de ingeniería electrónica Gendelfav Izquierdo y diseño industrial Daniel García que estuvieron presentes en el semillero de investigación TeGes y que aportaron desde sus conocimientos en la construcción y cumplimiento de los objetivos del proyecto.

Tabla de Contenido

Contenido

1. Introducción	2
2. Planteamiento del problema	4
3. Pregunta de investigación.....	6
4. Justificación	6
5. Objetivos	9
5.1 General	9
5.2 Específicos.....	9
6. Marco de referencia	10
6.1 Antecedentes	10
6.2 Estado del arte	10
6.3 Marco teórico	13
6.4 Marco conceptual	14
6.5 Marco normativo	16
6.6 Marco geográfico	19
6.6.1 Localización geográfica	19
6.7 Marco institucional.....	20
7. Metodología	21
7.1 Actividades por objetivo	24
7.1.1 Objetivo específico 1	24
7.1.2 Objetivo específico 2	25
7.1.3 Objetivo específico 3	29
7.2 Plan de trabajo	29
8. Resultados.....	30
8.1 Consolidar una revisión bibliográfica para definir el método de calibración de las mediciones de los EBC a utilizar.	30
8.2 Validar sensores de bajo costo para la medición de material particulado (PM 10 - PM 2.5, porcentaje de humedad relativa y temperatura media) con el equipo de referencia Aeroqual	31
8.3 Determinar la influencia de factores ambientales y de diseño a incluir en próximos estudios con los EBC evaluados.	36
9. Análisis y discusión de resultados.....	41
9.1 Consolidar una revisión bibliográfica para definir el método de calibración de las mediciones de los EBC a utilizar.	41

9.2	Validación de las mediciones de los sensores de bajo costo para la medición de material particulado (PM 10 - PM 2.5, porcentaje de humedad relativa y temperatura media) con el equipo de referencia Aeroqual.....	42
9.3	Determinar la influencia de factores ambientales y de diseño a incluir en próximos estudios con los EBC evaluados.	46
	10. Conclusiones	47
	11. Recomendaciones	48
	12. Referencias Bibliográficas.....	49
	13. Anexos	53
13.1	Anexo 1: Revisión sistemática.....	53

Listado de Tablas

Tabla 1	Normatividad calidad del aire en Colombia.	17
Tabla 2.	Componentes metodológicos (Por objetivo).....	22
Tabla 3.	Variables e indicadores de la investigación.	24
Tabla 4	Resumen para el equipo de bajo costo 52.....	31
Tabla 5.	Resumen para el equipo de bajo costo b9.....	32
Tabla 6.	Resumen para el equipo de referencia Aeroqual	32
Tabla 7.	Resumen de los datos arrojados por los EBC52 frente a las medidas del equipo de referencia (en amarillo resaltan las mediciones del equipo de referencia).	43
Tabla 8.	Resumen de los datos arrojados por los EBC-B9 frente a las medidas del equipo de referencia (en amarillo resaltan las mediciones del equipo de referencia).	44
Tabla 9.	Resultados de los modelos finales simples para el EBC 52 y B9	45
Tabla 10.	Resultados de los modelos finales múltiples para el EBC 52 Y B9	46

Listado de Figuras

Figura 1.	Localidad de suba	19
Figura 2.	Organigrama de actores involucrados en la realización del proyecto	20
Figura 3.	Equipo de referencia Aeroqual	26

Figura 4. Equipo de bajo costo.....	27
Figura 5. Disposición de los equipos para las mediciones.....	27
Figura 6. Metodología utilizada para la validación y calibración de los EBC.....	28
Figura 7. Cronograma de actividades	29
Figura 8. Distribución de los datos (EBC 52).....	33
Figura 9. Distribución de los datos (EBC B9)	34
Figura 10. Relación entre mediciones de PM entre EBC 52 y Equipo de Referencia.....	35
Figura 11. Relación entre mediciones de PM entre EBC y Equipo de Referencia.....	35
Figura 12. Estructura final del EBC con las entradas de ventilación.....	38
Figura 13. Servidor utilizado para la descarga de información de los EBC	40

Resumen

La contaminación del aire por material particulado (PM) se presenta por diversas fuentes y su alta concentración en la atmósfera, y la exposición al mismo ocasiona impactos a ecosistemas, infraestructura y a la salud. Con el fin de poder monitorear la calidad del aire, se implementan redes de monitoreo que permiten tener un panorama general del estado actual del recurso. Sin embargo, aún existen en Colombia poblaciones que no cuentan con esta tecnología de medición, ya que esta demanda altos costos, o incluso ciudades cuya cantidad de estaciones es muy baja, en comparación con la superficie. Los Equipos de Bajo Costo (EBC) se plantean como un complemento a las redes de monitoreo existentes, ya que estas son más asequibles, se pueden producir en masa, sus costos son bajos y proporcionan información en tiempo real. No obstante, estos EBC presentan problemas en cuanto a la confiabilidad de los datos, por lo que se requiere una calibración previa a la puesta en marcha de estos equipos.

El presente trabajo, inicialmente, buscó explorar y conocer que metodologías estadísticas permiten validar las mediciones de estos equipos, mediante una revisión sistemática en donde se encontró que el método de regresión lineal era adecuado para realizar la calibración y posterior validación de las mediciones de los EBC mediante la comparación de las mediciones obtenidas del equipo de referencia Aeroqual, con dos EBC (EBC 52 y EBC B9). En relación con los resultados de los modelos de regresión lineal se obtuvo un factor de correlación R^2 de 0.7 para uno de los equipos, sin embargo se recomienda utilizar modelos no lineales para obtener mejores resultados, para el caso del segundo equipo, se encontraron mediciones atípicas que posiblemente están relacionadas con algún defecto de fábrica, a su vez se determinaron aspectos importantes que se deben incluir en posteriores estudios con EBC, como periodo de medición, diseño y material de la carcasa y ventilación de los equipos, finalmente, se asociaron variables de correlación importantes como humedad y temperatura en la incidencia de las mediciones de PM.

Palabras clave: *Calibración, Calidad del aire, Equipos de bajo costo (EBC), Material particulado, Validación.*

Abstract

Air pollution by particulate matter (PM) occurs from various. its high concentration in the atmosphere, and exposure to it, causes impacts to ecosystems, infrastructure and health. In order to be able to monitor air quality,

monitoring networks are implemented that allow to have an overview of the current state of the resource. However, there are still populations in Colombia that do not have this measurement technology, since this demands high costs, or even cities whose number of stations is very low, compared to the surface. Low Cost Equipment (EBC) is proposed as a complement to existing monitoring networks, since these are more affordable, can be mass-produced, their costs are low and provide real-time information. However, these GCBs present problems in terms of data reliability, so calibration is required prior to the commissioning of this equipment. The present work, initially, sought to explore and know what statistical methodologies allow to validate the measurements of these equipment, through a systematic review where it was found that the linear regression method was suitable to perform the calibration and subsequent validation of the measurements of the EBC by comparing the measurements obtained from the Aeroqual reference equipment, with two EBCs (EBC 52 and EBC B9). In relation to the results of the linear regression models, a correlation factor R^2 of 0.7 was obtained for one of the equipment, however it is recommended to use non-linear models to obtain better results, in the case of the second team, atypical measurements were found that are possibly related to a factory defect, in turn, important aspects were determined that should be included in subsequent studies with EBC, such as measurement period, design and material of the housing and ventilation of the equipment, finally, important correlation variables such as humidity and temperature were associated in the incidence of PM measurements.

Keywords: *Air quality, calibration, low-cost equipment, particulate matter, validation*

1. Introducción

La contaminación del aire es un factor de riesgo en temas de salud y mortalidad, que ha venido tomando importancia a nivel mundial. Según un estudio de Global Burden of Disease (2017), 3,4 millones de personas murieron prematuramente como resultado de la contaminación del aire exterior, dato que representa más de tres veces el número de muertos por VIH / SIDA y más de ocho veces el número de homicidios para el mismo periodo. Esto denota que la contaminación del aire exterior fue responsable del 6% de las muertes a nivel mundial (Global Burden, 2017), especialmente en los países de ingresos bajos y medios (Cohen et al., 2017).

La calidad del aire, se ve afectada por diversos factores y contaminantes, entre los que se encuentra el Material Particulado (PM) que es producido por diversas fuentes como las industrias y en ambientes interiores como viviendas (Ej., polvo de ropa, electrodomésticos a gas, cocinar, fumar, quemar madera)

e incluso la naturaleza (Ej., polvo, polen, moho) (Collingwood, S et al., 2019). Esto demuestra que el PM aumenta la tasa de enfermedades como lo expuso la Organización Mundial de la Salud (OMS) cuando atribuyó la relación del 72% de las muertes prematuras, con enfermedades cardiovasculares, ataques cardíacos y problemas cerebrovasculares, donde el 14% se asoció con infecciones pulmonares y enfermedad pulmonar obstructiva crónica, y otro 14% se asoció con cáncer de pulmón (OMS, 2016). De acuerdo con esto, se corrobora la importancia de fortalecer los sistemas de monitoreo de calidad del aire tanto en ambientes exteriores como en espacios interiores, teniendo en cuenta cambios en las dinámicas poblacionales a causa de la pandemia de COVID19, en el cual la población pasa el 90% de su tiempo en ambientes interiores, por lo que su estudio se vuelve indispensable (Chojer, H et al., 2020). Sin embargo, los altos costos de los equipos, su mantenimiento y la necesidad de contar con pruebas de validación de las mediciones, dificultan el cumplimiento de las necesidades que se demanda dentro de los sistemas de monitoreo (Qin, X et al., 2020).

Por lo anterior, los equipos de bajo costo (EBC) para la medición de la contaminación del aire se han proporcionado como una opción innovadora dentro del monitoreo de la calidad del aire, debido a las ventajas de aplicar estas tecnologías de bajo costo; como la accesibilidad, el tamaño, los costos de operación y mantenimiento, además de tener la capacidad de presentar información en tiempo real generando datos en volumen suficiente y disponibles en todo momento y contribuir con las redes de monitoreo (Navarrete, G. G., & Soto, K. G. R. 2019). Por otra parte, al ser una tecnología que se encuentra aún en desarrollo, los equipos no cuentan con todas las características deseadas y se ven reflejadas en desventajas como la falta de estandarización de principios y validación de información, teniendo en cuenta que en la mayoría de casos no se cuenta con una certificación o aval, como se presenta en los equipos de referencia que brindan mediciones confiables. Según la EPA, los EBC deben ser calibrados y validados con equipos de referencia, como lo es el DustTrak; un monitor capaz de medir tanto la masa como la fracción de tamaño del PM, proporciona una muestra gravimétrica, y es implementado en espacios interiores y exteriores (TSI, 2019). Existen otros equipos en el mercado, como lo es el Aeroqual, que permite mediciones precisas en tiempo real de los contaminantes comunes del aire, con un sensor para partículas (PM_{2.5}/PM₁₀) que mide la concentración promedio de contaminación del aire en el intervalo de tiempo establecido, en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$, temperatura en grados Celsius y porcentaje de humedad dentro de un entorno (Aeroqual, 2018).

La presente investigación, pretende contribuir con el estudio de la calidad del aire a nivel local, con el fin de aportar con equipos confiables y asequibles que puedan ser implementados en espacios interiores con mayor facilidad en el distrito. Para el desarrollo de este estudio, con las mediciones obtenidas por un equipo de referencia Aeroqual, se realizó la validación de las mediciones de dos equipos de bajo costo para la medición de PM, diseñados y construidos por el estudiante Gendelfav Izquierdo de ingeniería electrónica y Daniel García del programa de diseño industrial de la Universidad El Bosque. Las mediciones obtenidas por los dos equipos se alojaron en versión preliminar de una plataforma web, diseñada por el estudiante Gendelfav. Es importante mencionar que el equipo Aeroqual, cuenta con la respectiva calibración y validación por un equipo de referencia avalado por la EPA.

El presente documento se organizó en secciones, la primera corresponde a la parte introductoria, abarcando la definición del problema, pregunta de investigación y objetivos planteados. En la segunda, se encuentra el marco de referencia, en donde se incluyen los conceptos teóricos, antecedentes y normativa correspondiente. Consecuente a esto, la tercera parte contiene la metodología utilizada para la investigación, análisis y estadísticas realizadas y finalmente en la cuarta parte se encuentran las conclusiones y recomendaciones de la autora.

2. Planteamiento del problema

La contaminación del aire es una problemática latente que se encuentra asociada a múltiples enfermedades. Las afectaciones a la salud derivadas de la contaminación del aire inciden directamente en la calidad de vida o habitabilidad de las personas, en el aumento de la morbilidad y mortalidad en la población susceptible como lo son los niños y los adultos mayores, de igual manera en ausentismos laborales que repercuten en la productividad de las empresas y por ende en el rendimiento y posterior crecimiento del país (Barreto Rincón, 2017).

Con el objeto de conocer el panorama de la contaminación atmosférica urbana en Colombia, durante las últimas décadas se han venido implementando los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) en las ciudades más pobladas, de mayor desarrollo y potencialmente más contaminadas, encontrando que, las ciudades de Colombia superan con frecuencia los límites de calidad del aire establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), y a su vez se estima que el 60% de la población respira aire

contaminado, esto teniendo en cuenta que en el 2019 se presentaron aproximadamente 13.000 muertes prematuras atribuidas a la contaminación del aire por partículas finas, según estimaciones de la Carga Global de Enfermedades (Breathe Life, 2021). En cuanto a la problemática de contaminación del aire que presenta Bogotá, esta no es solamente reconocida a nivel local, es también una percepción a nivel regional, donde según el denominado Índice de Ciudades Verdes en América Latina (EIU,2011), la ciudad de Bogotá, en el análisis general de calidad del aire, se ubica por debajo del promedio, entre las observaciones que sustentan esta posición se encuentran reportados los altos niveles de compuesto contaminantes atmosféricos entre los que se incluyen óxidos de azufre y material particulado.

Actualmente, la red de monitoreo de calidad del aire ha sido una importante herramienta en la definición y seguimiento de medidas que el gobierno local ha establecido para mejorar las condiciones ambientales en la ciudad. Según los registros de la red, el contaminante que por sus altas concentraciones se presenta como más crítico para la calidad del aire de la ciudad, es el material particulado respirable PM10, seguido de PM2.5. De igual manera, el alto costo de los equipos de medición de material particulado y el bajo presupuesto de inversión conlleva a escasos estudios e investigaciones de calidad del aire, principalmente en espacios interiores.

Es por ello que el presente proyecto, tiene como objetivo la validación y evaluación de equipos de bajo costo que permita ampliar, en un futuro, la red de monitoreo de la calidad del aire, enfatizando principalmente en espacios interiores. La calibración de estos EBC es uno de los pasos más importantes que se deben realizar de manera previa a la implementación, debió a que una de las falencias y desventajas que se evidencian de mayor forma en los EBC, es el poco grado de confiabilidad que generan las mediciones y por lo tanto las dificultades que se presentan para ser utilizados y tenidos en cuenta como herramientas de estudio sin una validación apropiada.

Adicional a ello, se busca encaminar el proyecto a futuro a un enfoque de ciencia ciudadana que involucre a los ciudadanos en el ámbito de la calidad del aire, mediante la ubicación de monitores en espacios que se pueda interactuar de manera sencilla y el conocimiento de datos en tiempo real, con ello se busca consolidar una comunidad de ciudadanos que promuevan y entiendan la importancia de contar con una buena calidad del aire y un monitoreo de la misma, así como la apropiación de esta mediante la gobernanza del aire, en la cual se evidencie no solo el actuar de entidades como el gobierno y las políticas,

sino una apropiación por parte de los ciudadanos por su cuidado y salud en relación con la calidad del aire y las políticas públicas.

3. Pregunta de investigación

¿Cuáles son los factores externos y propios de los EBC para la medición de material particulado, que se deben considerar en la fase de calibración y validación de estos equipos?

4. Justificación

Social

Según un análisis del Banco Mundial, en Colombia ocurren unas 6.000 muertes en el año a causa de la contaminación del aire (Banco Mundial, 2018). Cerca del 20% de estas muertes se encuentran asociadas con la exposición a elevados niveles de contaminación del aire en espacios cerrados. Es por ello que, el fenómeno de contaminación en interiores ha venido tomando especial relevancia para las autoridades ambientales y de salud pública de la ciudad (Franco, J. F. 2012).

Para mediados del siglo XX, tres de cada diez personas en el mundo vivían en áreas urbanas. Actualmente, se estima que más de la mitad de la población mundial vive en las ciudades y de acuerdo con las proyecciones de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) la mayor parte del crecimiento poblacional de los próximos años se concentrará en centros urbanos (UN, 2010). Este proceso de urbanización tiene tendencia a ocurrir más rápidamente en países ubicados en regiones catalogadas como economías en desarrollo, particularmente en América Latina (incluyendo a Colombia) donde se calcula que el 75% de la población vive en ciudades y centros urbanos (Franco, J. F. 2012).

Los estilos de vida han ido cambiando, y esto ha generado variaciones en los lugares de trabajo, donde la cantidad de horas en recintos cerrados es constante y más en la actualidad por la pandemia de Covid-

19, en la cual el teletrabajo se incrementó en un 80% (Núñez, 2020), factor que podría influir en problemáticas asociadas con la calidad de vida y la salud de las personas.

El monitoreo de la calidad del aire en espacios interiores actualmente es limitado, principalmente porque, aunque se conocen bien los efectos de la exposición aguda a contaminantes presentes en el aire, adicional a esto, existen vacíos en los datos relacionados con exposiciones a largo plazo a concentraciones bajas y a mezclas de diferentes contaminantes (Solá, X. G., et al., 2019). Por otro lado, los altos costos de los equipos de calidad del aire generan dificultades económicas para su implementación, y la utilización de los EBC debe estar estandarizada según normativa, que demuestre una calibración y validación por medio de equipos de referencia certificados por la EPA, para que los datos obtenidos puedan ser tenidos en cuenta como válidos en estudios. A su vez, las leyes y políticas colombianas no han avanzado en la vigilancia de esta en ambientes interiores, por lo que no se le da importancia en su seguimiento y control, sin embargo, se ha evidenciado que su estudio ha tomado relevancia por parte de la sociedad colombiana y por la comunidad científica, especialmente por su efecto en la salud, en la memoria y concentración de las personas (Sandoval et al., 2020).

La calidad del aire afecta los estilos de vida actuales, por lo tanto, surge la necesidad de promover la gobernanza estratégica del aire mediante la cooperación y asociación entre sectores gubernamentales, públicos y privados, para resolver problemas sociales, contemplando la posibilidad de que los ciudadanos tengan mayor acceso a bases de datos e información de calidad del aire, así como un mayor monitoreo de tal manera que se fortalezca y se complemente la red de información, promoviendo una cultura ciudadana que se preocupe y entienda la necesidad de una buena calidad del aire, no solo en espacios exteriores sino también en interiores (Jovašević-Stojanović et al., 2015).

Económico

En el contexto económico, el control de la contaminación atmosférica representa altos costos generados a partir de la mitigación de los efectos negativos de esta problemática, afectando de manera significativa la competitividad de las ciudades y sus ciudadanos, según el Banco Mundial, el costo de la contaminación del aire en Bogotá es del orden de los miles de millones de dólares al año. La contaminación del aire trae

también impactos económicos considerables, como el aumento de costos médicos que reducen la economía y su productividad a causa de la pérdida de días laborales (EEA, 2019).

Aunque existen dispositivos que monitorean la calidad del aire en ambientes exteriores, su aplicación no se da de igual manera para espacios interiores y es escaso o nulo su estudio debido a que no hay suficiente oferta para la implementación de los equipos por sus elevados costos. En consecuencia, se genera la necesidad de contribuir con la implementación de equipos de bajo costo dentro de la red de monitoreo del aire, que permitan dar a conocer información acerca del estado del material particulado en espacios interiores, y lograr la divulgación de los resultados e interpretación de los datos, exponiendo cómo la calidad del aire incide de manera directa en la salud, específicamente por la exposición a material particulado PM10 y PM2.5 (Jovašević-Stojanović et al., 2015).

Ecológico

Las dinámicas de crecimiento demográfico que enfrentan las ciudades representan una seria amenaza para el ambiente, así como para la salud y la calidad de vida de sus habitantes. Dicho crecimiento genera nuevos procesos económicos y está generalmente acompañado de un incremento en las actividades industriales, mayores tasas de motorización y aumento en el consumo de combustible; lo que genera mayores emisiones de contaminantes del aire (Franco, J. F. 2012).

Es así como la contaminación de la calidad del aire en centros urbanos de países de economías en desarrollo es un fenómeno que se encuentra en constante crecimiento (Chow, et al., 2004). Bogotá, la capital colombiana y una de las más grandes ciudades de América Latina, no ha sido ajena a esta condición y ha sido catalogada como una de los centros urbanos con mayor contaminación atmosférica en la Región (OPS, 2005).

Una de las problemáticas ambientales de mayor impacto en Bogotá es la contaminación atmosférica. Entre los años 1997 y 2008 siete de las estaciones que conforman la red de monitoreo reportaron concentraciones anuales de PM10 superiores a los niveles máximos permitidos y establecidos por la normativa nacional, es decir $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ indicado como norma anual para este contaminante y desde el año

2001 y a nivel de toda el área urbana de Bogotá se incumple la norma anual de PM10 durante el 40% de los días del año (SDA, 2009).

En total, en Bogotá existen 16 estaciones de monitoreo, las cuales están distribuidas en los siguientes puntos: Guaymaral, Suba, Engativá, Las Ferias, Usaquén, Fontibón, Parque Simón Bolívar, Puente Aranda, Chapinero, Kennedy, Carvajal, Tunal y San Cristóbal. La Secretaría explica que “los datos recolectados en las distintas estaciones se reciben en una estación central donde se someten a un proceso de validación final y a un análisis posterior con el fin de evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad de aire en Bogotá” de acuerdo al Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (hoy en día el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) y el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la calidad del aire (SDA,2018). Y añade que “esta información se utiliza como base para la definición de las políticas de control de la contaminación y de la gestión ambiental” (SDA,2018). Sin embargo, el número de equipos con los que cuenta la ciudad no corresponden con la cantidad de habitantes que tiene ni con la extensión del perímetro urbano de Bogotá, por ende, estas mediciones no son 100% acertadas, dejando gran cantidad de datos faltantes y una alta probabilidad de presentar datos erróneos.

5. Objetivos

5.1 General

Calibrar y validar las mediciones de material particulado de dos equipos de bajo costo a partir de las mediciones realizadas por un equipo de referencia mediante los modelos de regresión lineal simple y múltiple.

5.2 Específicos

1. Consolidar una revisión bibliográfica para definir el método de calibración de las mediciones de los EBC a utilizar.
2. Validar las mediciones obtenidas de los sensores de bajo costo de material particulado (PM 10 - PM 2.5, porcentaje de humedad relativa y temperatura media) con el equipo de referencia Aeroqual, a través de los modelos de regresión lineal simple y múltiple.

3. Determinar la influencia de factores ambientales y de diseño que se deben incluir en próximos estudios con los EBC evaluados.

6. Marco de referencia

6.1 Antecedentes

Desde el Instituto de Salud y Ambiente de la Universidad el Bosque, con el semillero de investigación: Tecnologías de la Información Geográfica aplicadas a la salud, ambiente y economía circular “TeGes”-, se está desarrollando un macroproyecto desde el año 2019 titulado *“Evaluación de la calidad del aire por material particulado en ambientes interiores a través de dispositivos de bajo costo y su asociación con la presencia de sintomatología de infección respiratoria aguda del personal de la Universidad El Bosque”*, el cual pretende la utilización de EBC presentes en el Instituto como insumo principal para lograr los objetivos del proyecto, uno de los objetivos iniciales de la investigación hace referencia a la validación y calibración de estos equipos para poder ser utilizados de manera certera en la investigación, dado que, al realizar el análisis respectivo para la construcción de la metodología, se encontró que uno de los problemas principales que presentan los EBC es la variación de sus datos frente a los de un equipo de referencia, y por lo tanto, se presenta la necesidad de realizar un ajuste o calibración de los datos que a su vez permita la validación de los mismos.

A partir de ello, se toma como insumo, la necesidad de realizar una validación y calibración de los EBC presentes en el Instituto, mediante una prueba piloto de lo que sería el proyecto a pequeña escala, determinando algunas necesidades que surgieron en la investigación, recomendaciones y consolidación del método de validación a utilizar.

6.2 Estado del arte

En los últimos años la calidad del aire en interiores ha sido un tema importante de estudio. Comenzando por contextualizar la temática con una visión global, se aborda el tema de calidad del aire en la ciudad de Bogotá, donde se encuentra como lo expresa Franco en su documento *“Contaminación atmosférica en centros urbanos. Desafío para lograr su sostenibilidad: Caso de estudio Bogotá”* que las condiciones

de calidad del aire en la ciudad representan una amenaza constante para la salud y calidad de vida de la población, a partir de ello se encuentra que desde el año 1997 la ciudad presenta una amplia red de monitoreo de calidad del aire operada por la autoridad local en temas ambientales y administrada por el DAMA (Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente), y como lo expresa Franceschi (2018) en Bogotá se demostró que, 21% de la población necesita atención médica por enfermedades generalmente relacionadas con la contaminación atmosférica urbana, y que para el 2015 el PM10 y PM2.5 eran los contaminantes de mayor preocupación para la ciudad al superar los límites nacionales.

La calidad del aire en interiores IAQ (por sus siglas en inglés) se cree que es un factor ambiental importante desde hace más de cien años, desde el comienzo cuando se empezó a tener cuenta las condiciones de vida de la población y la salud, alrededor de 1850, hasta que las cuestiones ambientales al aire libre entraron en escena y se convirtieron en dominantes alrededor de 1960 (Sundell, 2004). Según los autores Xilei Dai, Junjie Liu, Xiangdong Li, Lei Zhao de China, entre los contaminantes interiores más comunes, se encuentra el PM2.5 y el dióxido de carbono (CO₂), los cuales merecen especial atención, ya que sus concentraciones en interiores son indicadores importantes del nivel de calidad del aire, y que pueden traer efectos potenciales sobre la salud de los ocupantes y el desempeño laboral. A partir de ello, la OMS y el gobierno de China, una de las ciudades pioneras en investigación de IAQ han requerido que estas concentraciones de PM2.5 sean inferiores a $75\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para América Latina, la creación y participación del Programa Global de Monitoreo de la Calidad del Aire, iniciado en 1976 por la OMS y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), como parte de un sistema global de monitoreo ambiental, llamado GEMS por sus siglas en inglés (Global Environmental Monitoring System), da la oportunidad de la creación de nuevas políticas que permitan afrontar de manera efectiva la contaminación y tenga en cuenta las implicaciones que esta tiene para la salud (Korc, M., & Sáenz, R. 1999). A pesar de ello, se encuentra que la mayoría de las redes de monitoreo presentan una limitación de baja resolución espacial de los datos registrados y poca cobertura, como lo es en el caso de Bogotá, que cuenta con tan solo 16 estaciones de monitoreo para una superficie de 1.775 km², evaluando parámetros como partículas (PM10, PM2.5, PST), gases (SO₂, NO_x, O₃, CO, CH₄) y datos meteorológicos (precipitación, velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica).

Uno de los contaminantes criterio para el estado de la calidad del aire y en el cual se va a centrar la investigación, es el material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀). Varios estudios acreditados por la OMS, establecen que este es el problema principal en temas de calidad del aire, debido al aumento de emisión del contaminante, la cual consiste en sustancias líquidas o sólidas suspendidas en el espacio. El material particulado menor a 10 micrómetros de diámetro (PM₁₀) pertenece entre uno a dos tercios de emisiones totales del material particulado. La principal alteración en la salud que se puede producir por PM es la acumulación en los pulmones y el aparato respiratorio causando daños y muertes prematuras (OMS, 2016).

Un gran referente a nivel nacional en temas uso de equipos de bajo costo para la medición de calidad del aire en interiores es un proyecto desarrollado por el SIATA y financiado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en donde se realiza la entrega a los ciudadanos de un sensor de medición de calidad de aire y una aplicación para dispositivos móviles, que se constituyen como herramientas pedagógicas para realizar un proceso de educación en temas meteorológicos y de calidad del aire. El proyecto consistió en la instalación de sensores o “nubes” de bajo costo en hogares o lugares de trabajo, que miden la cantidad de material particulado en su entorno y envían una señal para efectos de recolección de datos y análisis de la calidad del aire. Este proyecto ha permitido tener un panorama de la distribución de contaminantes en el territorio y a su vez ha aportado al avance local de la tecnología, al uso de los datos por parte de colectivos ambientales y al despertar de la conciencia ambiental de los ciudadanos del Valle de Aburrá, así como personalizar a la comunidad sobre la importancia de su entorno y la incidencia que tienen actividades cotidianas con la calidad del aire (Área metropolitana del Valle de Aburrá, 2021).

Por otro lado, se encuentra el proyecto de CanAirIO, enfocado en ciencia ciudadana que utiliza estaciones móviles y fijas de calidad del aire para medir algunas variables como PM_{2.5}, CO₂, y otros indicadores de aire con teléfonos celulares y tecnología de bajo costo basado en mediciones a interiores, busca construir una red ciudadana y un mapa de calidad del aire que permita saber qué se está respirando y cómo se puede mejorar la calidad de vida (CanAirIO, 2021). El proyecto busca incentivar el uso y la instalación de los equipos de bajo costo mediante talleres de educación en donde se explica la instalación, el funcionamiento y la interpretación de los datos.

6.3 Marco teórico

Las teorías de la **calidad del aire** varían según los autores, sin embargo, la mejor manera para establecer que exista o no calidad del aire ha sido mediante la ausencia o presencia de agentes nocivos en el aire o atmósfera. Es decir, la calidad del aire estará vinculada con la presencia o no de contaminantes en sus componentes, los cuales deberían ir de la mano con los porcentajes establecidos por la Organización Mundial de la Salud al establecer lo que es el aire puro o limpio, o al menos bajo límites que no generen riesgos a la salud de las personas. El aire puro se encuentra compuesto de oxígeno (21%), nitrógeno (78%) y otros gases en menor proporción (Castillo Landa, M. C., 2014).

La **calidad del aire interior** como lo expresa Sáez Cifre, E. en el 2017, se determina mediante tres factores: agentes biológicos, agentes químicos y agentes físicos. A mayor concentración de agentes biológicos y químicos menor será la calidad del aire y muchos de estos agentes se crearían en el interior de los edificios, puesto que, a una menor ventilación, mayor exposición a contaminantes. Los agentes físicos también influyen en la calidad del aire, como la ventilación, la temperatura o la humedad (que, por supuesto, siempre será menor cuanto mayor sea la ventilación). Cuando se habla de calidad del aire en interiores, esta depende de la contaminación atmosférica exterior, pero no es el único factor que determina dicha calidad. Algunos contaminantes del aire interior proceden del exterior, pero la mayoría se liberan dentro, mediante actividades como la limpieza, quema de combustibles para cocinar o producir calor, el mobiliario y los materiales de construcción también pueden emitir contaminantes (Sáez Cifre, E. 2017).

Según los resultados obtenidos por Pérez en el documento de “Contaminación microbiológica del aire al interior y el síndrome del edificio enfermo”, la humedad y la falta de ventilación pueden aumentar aún más la contaminación del aire interior. El aire puede ver afectada su calidad al contaminarse por esporas de hongos, bacterias, virus, partículas y sustancias químicas diversas, a causa de una ventilación deficiente, o a un sistema de climatización mal diseñada o con escaso mantenimiento. En cuanto a los contaminantes procedentes del exterior, se pueden encontrar gases nocivos industriales o derivados del tránsito de vehículos o aire contaminado desechado al exterior que vuelve a entrar a través de las tomas del aire acondicionado (Sáez Cifre, E. 2017).

Para poder determinar la calidad del aire en diversos espacios, se utilizan equipos de medición que son capaces de captar las partículas como material particulado y arrojar información fácil de interpretar, para ello se han comenzado a utilizar los EBC por su facilidad y principalmente bajos costos. Sin embargo, el desafío se encuentra en poder tener datos válidos y confiables que puedan ser considerados referentes, por lo que se hace necesario su **calibración** para encontrar la tendencia en comparación con equipos que siguen procedimientos avalados (Caro, S. D., et al., 2021). La forma más popular de tales ajustes de datos se basa en una instalación de campo con un grado de referencia o investigación-instrumento de calificación. Durante este "periodo de entrenamiento", la relación entre los datos brutos del sensor y la referencia se establecen los datos y el algoritmo de corrección de datos es desarrollado. En algunos casos, los modelos lineales simples son suficientes para ajustar los datos sin procesar, en otros casos, se necesitan ecuaciones lineales múltiples o métodos multiparamétricos que incluyan covariables como humedad y temperatura para obtener resultados más cercanos al equipo de referencia (Badura, M., et al., 2019).

6.4 Marco conceptual

La **calidad del aire** es un sistema cíclico influenciado por tres factores: las emisiones de contaminantes, el clima y la administración pública. El objetivo de la calidad del aire es lograr que el aire que respiran las personas sea un aire limpio, por esto, los ciudadanos deben saber cuál es el aire que respiran, y por ende la información acerca de qué tan limpio o contaminado está debe encontrarse disponible para toda la ciudadanía (Hernández, 2013). También, la calidad del aire hace referencia al estado en que se encuentra la atmósfera al nivel de la troposfera para poder garantizar la salud pública y una buena calidad de vida, este estado depende de la composición del aire y de la presencia o ausencia de sustancias y de su nivel de concentración al cual se manifiestan como tóxicas o nocivas para la salud humana y el ambiente, así como de los factores climáticos y físicos de una región específica (Alemany, 2004).

Con el fin de determinar la calidad del aire en lugares específicos como ciudades o distritos, se conformaron los **Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire**, un conjunto de equipos de medición de calidad del aire instalados sistemáticamente para generar y verificar información (Moya Frank & Ledesma, 2003). El propósito más importante del **monitoreo de la calidad** del aire es generar la

información necesaria a científicos, legisladores y planificadores urbanos para gestionar en pro del recurso aire y así mejorar el ambiente. Para llevar a cabo el monitoreo, se utilizan diversos equipos, ya sean analizadores, monitores o sensores que se ubican en un espacio físico confinado denominado estación de monitoreo o espacio adaptado para su funcionamiento. Un grupo de estaciones conforman una red de monitoreo de la calidad del aire que, integrada con las estaciones de meteorología y el centro de recibo y transmisión de datos, suministran la información a los usuarios (Góngora, 2020). Se establece un **Período de Medición**, el cual consiste en el lapso durante el cual se capta la muestra de emisión, que es expelida por un ducto o chimenea, para determinar las concentraciones de los contaminantes bajo análisis (Moya Frank & Ledesma, 2003).

Sin embargo, la red de monitoreo se ha visto condicionada por los altos costos que tienen los equipos de medición, debido a ello los **equipos de bajo costo (EBC)** han tomado fuerza ya que tienen la particularidad de que su precio debe ser inferior a un valor máximo, este límite puede variar entre los \$100.00 y los \$500.00 dólares e incluso menos, son una gama de sensores que sus ventajas de precio y tamaño, los posiciona como los más usados en el mercado actual en diferentes áreas de la industria y más recientemente en el área de monitoreo de calidad del aire (Navarrete, G. G., & Soto, K. G. R. 2019). Son sensores utilizados para el entendimiento de las problemáticas de calidad del aire que enfrentan los entornos urbanos, además de que sirven como fuentes de diagnóstico para el diseño de medidas y políticas dirigidas a reducir la contaminación atmosférica en grandes ciudades (Molina, 2017).

Las principales funciones que desarrollan estos EBC es la medición de parámetros como humedad, temperatura y **material Particulado 10 y 2.5 (PM-10 y PM-2.5)**; el material cuyo diámetro aerodinámico es igual o menor que 10 micrones y 2.5 micrones, respectivamente y que por su pequeño tamaño son las fracciones de partículas suspendidas de mayor importancia para la protección de la salud (Suárez, 2012). Este parámetro es esencial ya que es indicio de contaminación, y según la EPA la presencia del material particulado en el aire puede estar demarcada por procesos naturales, como incendios forestales, ciclones, polinización de las plantas, pero también por procesos de tipo antropogénico que involucran principalmente la quema de combustibles o la incineración de cualquier otro tipo de sustancia, se incluye además las aspersiones y fertilización en el ámbito agrícola. Las partículas pueden ser directamente emitidas de la fuente, como partículas primarias o formarse como contaminantes secundarios cuando reaccionan algunos gases en la atmósfera (Gonzalez, 2015).

Debido a las consecuencias que pueden traer estos contaminantes para la salud humana, se han determinado los **límites de Calidad del Aire**, los cuales representan la concentración máxima de un contaminante en el aire, aceptable para proteger la salud y el ambiente (Suárez, 2012). En Colombia, dentro de los contaminantes críticos de la calidad del aire se encuentran el PM2.5 Y el PM10. Para cada uno de estos se establece un límite máximo permisible de acuerdo con un tiempo de exposición, el cual indica la concentración máxima o el nivel de inmisión de los contaminantes. Por último, para la determinación de afectaciones a la salud usualmente se toma en cuenta el **Tiempo de Exposición**, que hace referencia al lapso de duración de un episodio o evento (Fraume Restrepo, 2006). En salud, la duración y concentración de una exposición ambiental es determinante para observar un efecto de corto plazo en la población. En este punto, la entrada de una dimensión temporal (cantidad de horas diarias) a un indicador de exposición ambiental puede mejorar el entendimiento de la respuesta poblacional de corto plazo, ya que se relaciona consistentemente al concepto de dosis poblacional, entendida como el tiempo de exposición a una determinada concentración que genera un efecto observado en la población (Muñoz, 2009).

6.5 Marco normativo

Para el desarrollo de la investigación se tuvo en cuenta diferentes normativas enfocadas a límites máximos permisibles de calidad del aire y a su vez las responsabilidades y funciones del ministerio del medio ambiente, donde se establece que se deben coordinar actividades de vigilancia, se consideró oportuno incluir unas referencias sucintas a las normativas referidas a este ámbito dado que los resultados de la investigación pueden ser tomados en cuenta por los responsables de la gestión ambiental del distrito para adoptar algunas medidas que pudieran contribuir al bienestar de la población.

Tabla 1 Normatividad calidad del aire en Colombia.

Acto Normativo	Declarado por	Descripción relacionada con el proyecto
Ley 1712 de 2014	Congreso de Colombia	<p>Establece la protección de los derechos a la salud y al medio ambiente sano estableciendo medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes de fuentes móviles.</p> <p>Art 1°. Objeto. Establece medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes al aire provenientes de fuentes móviles que circulen por el territorio nacional, haciendo énfasis en el material particulado, con el fin de resguardar la vida, la salud y goce de un ambiente sano.</p>
Resolución 2254 de 2017	Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial	Art 1 2 8 Establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional.
Resolución 2154 de 2010	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Adopta el protocolo de monitoreo y seguimiento de la calidad del aire.

Resolución 610 de 2010.	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Art 4°. Niveles Máximos Permisibles para Contaminantes Criterio. Art 6°. Procedimientos de Medición de la Calidad del Aire. El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial adoptará a nivel nacional el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, el cual será elaborado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).
-------------------------	---	--

Decreto 979 de 2006	Presidente de la República	Art 2°. De los niveles de prevención, alerta y emergencia por contaminación del aire. Los niveles de prevención, alerta y emergencia son estados excepcionales de alarma que deberán ser declarados por las autoridades ambientales competentes ante la ocurrencia de episodios que incrementan la concentración y el tiempo de duración de la contaminación atmosférica.
---------------------	----------------------------	---

Ley 99 de 1993 (Ley General Ambiental de Colombia)	Congreso de Colombia	Art 5°. Funciones del ministerio del medio ambiente, donde se establece que se debe coordinar actividades de vigilancia por parte de las entidades correspondientes para controlar las emisiones de contaminantes del aire, así como el cuidado de otros recursos como el agua y suelo
--	----------------------	--

Constitución
Política de
Colombia (1991)

Presidencia de la
República

Art 79°. Todas las personas tienen derecho a gozar
de un ambiente sano.

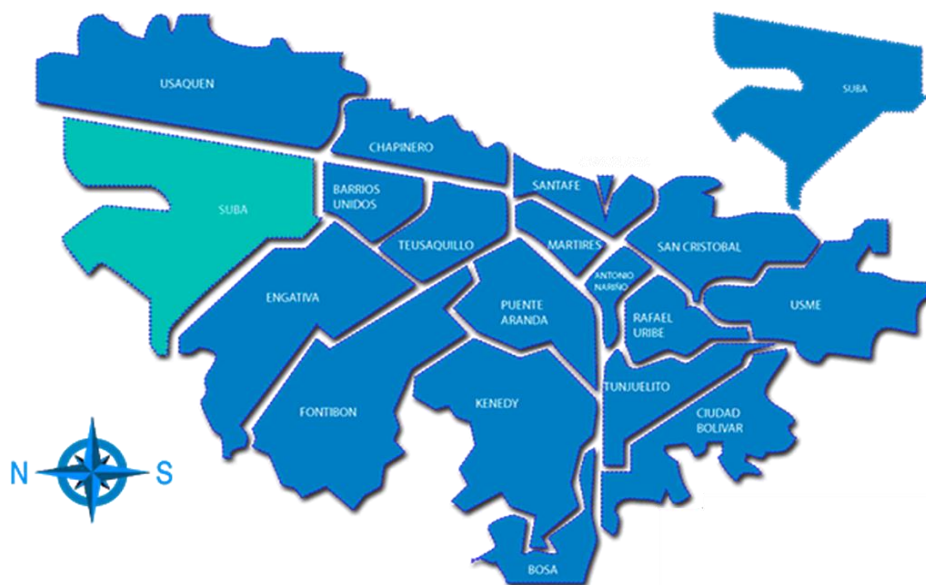
Fuente: Autora, 2021.

6.6 Marco geográfico

6.6.1 Localización geográfica

La toma de datos se registró en el interior de una vivienda de la localidad de Suba, más específicamente en el barrio Puente Largo, ubicado en el noroccidente de la ciudad de Bogotá, resaltando que en el área se presentan gran cantidad de parques aledaños a la vivienda, se encuentra en una zona residencial con poca afluencia de tráfico y casi nulo paso de tráfico pesado. Sin embargo, cabe resaltar que la información pertinente a esta área no se tuvo en cuenta para el estudio.

Figura 1 Localidad de suba

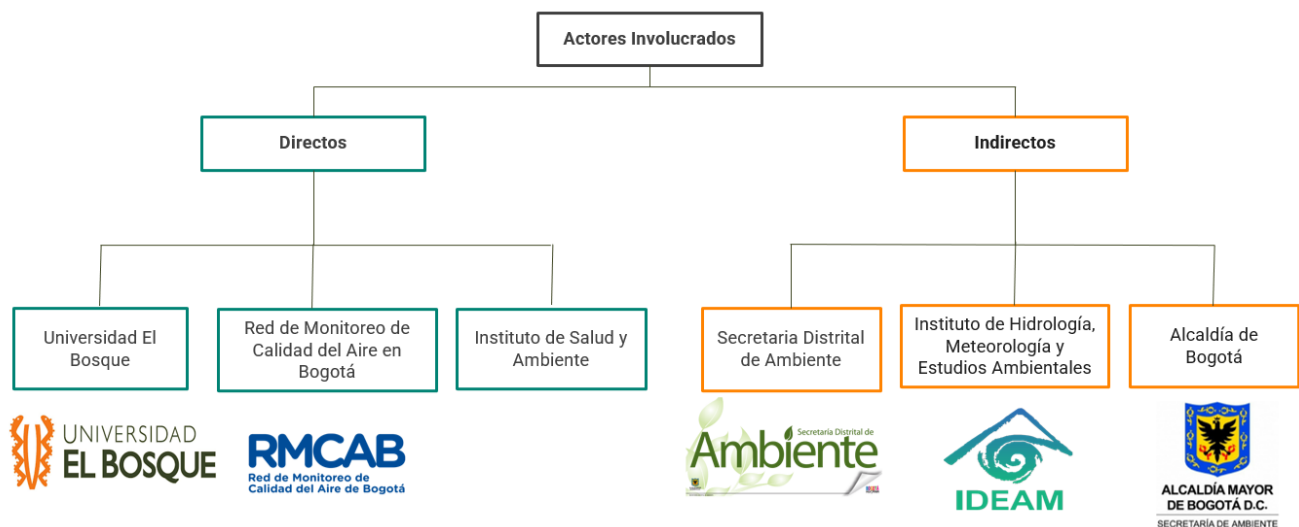


Fuente: Secretaría Distrital de Integración Social, 2018

6.7 Marco institucional

A continuación, se presentan los actores que estuvieron involucrados en el desarrollo del presente trabajo, algunos de ellos con participación directa e indirecta como se encuentran plasmados en la figura 2.

Figura 2. Organigrama de actores involucrados en la realización del proyecto



Fuente: Autora, 2022.

IDEAM.

El IDEAM es una institución pública de apoyo técnico y científico al Sistema Nacional Ambiental, que genera conocimiento, produce información confiable, consistente y oportuna, sobre el estado y las dinámicas de los recursos naturales y del medio ambiente, que facilite la definición y ajustes de las políticas ambientales y la toma de decisiones por parte de los sectores público, privado y la ciudadanía en general.”

Secretaría Distrital de Ambiente.

Es una autoridad de la administración central de Bogotá, Colombia, que promueve, orienta y regula la sustentabilidad ambiental dentro del perímetro urbano del Distrito Capital. Es la entidad rectora de la

política ambiental distrital, que tiene como fin, promover y orientar políticas, planes y programas que permitan la conservación, protección y restauración del ambiente.

Red de monitoreo de Calidad del Aire en Bogotá (RMCAB)

A través de la RMCAB, se recolecta información sobre la concentración de contaminantes de origen antropogénico y natural y el comportamiento de las variables meteorológicas que regulan la distribución de los mismos en la atmósfera bogotana.

Universidad El Bosque.

Es una universidad privada ubicada en Bogotá, Colombia, fundada en 1977, sujeta a inspección y vigilancia por medio de la Ley 1740 de 2014 y la ley 30 de 1992 del Ministerio de Educación de Colombia. Su sede principal se encuentra ubicada al nororiente de la ciudad, en la localidad de Usaquén, pero que, a su vez, cuenta con un segundo campus ubicado en la sabana de Bogotá.

Instituto de Salud y Ambiente.

El Instituto hace parte de la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad El Bosque y está compuesto por un grupo interdisciplinario con interés en el análisis de la relación entre la salud y el ambiente en contextos urbanos y rurales, mediante la formulación y ejecución de proyectos de investigación básica y aplicada. El Instituto cuenta con el Observatorio en Sistemas de Información Geográfica (SIG) en Salud y Ambiente “OSSA” y con el semillero de investigación “Tecnologías de la Información Geográfica aplicadas a la Salud, el Ambiente y la Economía Circular - TeGeS”.

7. Metodología

En este apartado, se describe el diseño metodológico que se formuló para la investigación. Teniendo en cuenta el enfoque, alcance, método, técnicas e instrumentos que puede tener cada actividad planteada dentro de los objetivos. En primer lugar, el enfoque que tuvo la investigación fue mixto; debido a que contiene elementos tanto cuantitativos como cualitativos de manera teórico-práctica. El enfoque cuantitativo se emplea de tal manera que permita cumplir principalmente el segundo objetivo planteado en el proyecto, en donde se validaron los equipos de bajo costo utilizando métodos estadísticos como la

regresión lineal simple y múltiple, a partir de equipos de referencia, y se tomarán datos sobre la concentración de material particulado PM10 y PM2.5, humedad y temperatura.

Mientras que el método cualitativo, se utilizó para el cumplimiento de los objetivos uno y tres, en donde para el objetivo uno, se determinaron aspectos importantes a tener en cuenta, pros y contras de métodos estadísticos utilizados en diversos estudios, comparación del desempeño de los modelos planteados y facilidades de implementación. Para el objetivo tres, se plantearon medidas y aspectos importantes que surgieron durante el desarrollo del proyecto de manera experimental y también algunas recomendaciones que se encontraron en la revisión sistemática, que se espera ayuden en próximos proyectos.

En cuanto al alcance del proyecto, se considera que este se encaminara hacia el alcance correlacional y descriptivo de la investigación. Inicialmente es correlacional ya que busca explorar los resultados de procesos estadísticos, y descriptivo, debido a que permite mostrar con precisión las dimensiones del fenómeno estudiado, sus objetivos y sujetos involucrados, de manera que permite medir y recolectar datos pertinentes, a cerca de la concentración del contaminante PM10, PM2.5 humedad y temperatura (Sampieri, 2013).

Tabla 2. Componentes metodológicos (Por objetivo)

Componente	Consolidar una revisión bibliográfica para definir el método de calibración de las mediciones de los EBC a utilizar.	Validar sensores de bajo costo para la medición de material particulado (PM 10 - PM 2.5, porcentaje de humedad relativa y temperatura media) con el equipo de referencia Aeroqual.	Determinar la influencia de factores ambientales y de diseño a incluir en próximos estudios con los EBC evaluados.
Método	Deductivo		
Enfoque	Mixto		
Alcance	Correlacional	Correlacional/Descriptivo	Descriptivo

Unidad de Análisis		Medición de un contaminante criterio como el PM2.5-PM10, humedad y temperatura		
Recolección de información	Técnicas	Validación	Revisión sistemática	Documentación
	Instrumentos	EBC	Excel	Tabla de retención documental
Organización, sistematización y análisis	Técnicas	Documentación	Documentación	Documentación
	Instrumentos	Tabla de retención documental/ computador	Excel	Documento
Interpretación	Técnicas	Documentación	Comparación	Evaluación de alternativas
	Instrumentos	Tabla de retención documental	Tablas de comparación	Documentación

Fuente: Autora, 2022.

Las variables e indicadores que se plantean como aspectos necesarios en la investigación, se encuentran especificados en la Tabla 3. junto con la técnica a implementar y el instrumento a utilizar, teniendo en cuenta que como dimensión única se optó por dimensión aire.

Tabla 3. Variables e indicadores de la investigación.

Dimensión	Variable	Aspecto	Indicador	Técnica	Instrumento
Aire	Calidad del aire	Estado actual	Concentración de PM	Concentración de PM	Aeroqual-EBC
	Tiempo	Frecuencia	Días de medición	Días de medición	Calendario
	Datos	Cantidad de datos válidos	Cuantificación de datos	Análisis de datos	Excel
	Humedad	Ambiental	Porcentaje	Medición	EBC
	Temperatura	Ambiental	Grados °C	Medición	EBC

Fuente: Autora, 2022.

7.1 Actividades por objetivo

7.1.1 Objetivo específico 1

Metodología para la validación: Inicialmente, se realizó una revisión sistemática de los métodos utilizados para la validación y calibración de EBC, de forma específica se crean 27 ecuaciones de búsqueda (que a su vez, hacen uso de operadores lógicos) con ayuda de la matriz de revisión sistemática que integraba los operadores lógicos con las palabras clave “Calidad del aire”, “Calidad del aire en interiores”, “métodos de validación”, “métodos de calibración”, “equipos de bajo costo”, entre otras,

creada los integrantes (Lorena Martínez, Manuela Cuenca y Esteban Parra) del Semillero de Investigación TeGes de la Universidad El Bosque, cada una de ellas fue dispuesta en tres bases de datos (Science direct, scopus, web of science) en búsqueda de artículos científicos, en idioma inglés y español, con un rango de años entre el 2017 y 2021. Posteriormente se realizó la depuración de los artículos mediante el uso del gestor de referencias Rayyan y se determinaron palabras de exclusión e inclusión, que permitieron que la filtración de información fuera más eficiente y puntual.

Se obtuvo un total de 1.763 artículos, de los cuales, se seleccionaron 38 artículos según la afinidad con los objetivos planteados y las herramientas a disposición para realizar la revisión de los métodos de calibración para equipos de medición de calidad de aire de bajo costo. Con el fin de poder suministrar y entender de mejor manera cada uno de los artículos escogidos, se estandarizaron aspectos a coloca en la matriz como título, variables estudiadas, desventajas y ventajas del método, supuestos, recomendaciones, metodología, equipo de referencia, entre otras. Mensualmente se realizaron reuniones, en donde se socializaban los artículos, se determinaban aspectos importantes y se discutían artículos complejos o con información relevante para la investigación, de esta manera cada uno de los integrantes que conformaron la revisión sistemática se contextualizaba con los demás artículos, generando un espacio de mayor comprensión y de manera sencilla.

7.1.2 Objetivo específico 2

Manejo de los equipos: Descripción del manejo y partes del equipo en donde se tuvo en cuenta las variables como capacidad de almacenamiento de datos, duración de batería, mantenimiento de los equipos, funciones básicas de la pantalla inicial de cada uno de los dispositivos. Se asistió al entrenamiento técnico para el manejo de los equipos de referencia dictado por la empresa San Ambiente S.A.S.

Instrumento de referencia: El sensor de calidad del aire Aeroqual Serie 500 (ver Figura 3), permite un levantamiento preciso en tiempo real de los contaminantes comunes del aire exterior, todo en un monitor de mano ultra portátil. Se utiliza para estudios de calidad del aire a corto plazo y para realizar comprobaciones de los “puntos calientes” de contaminación. Los monitores tienen un diseño modular y se componen de dos componentes principales, un monitor y un sensor (cabezal), los monitores pueden estar conectados a la red y/o a batería y estar montado de forma permanente o utilizados como unidades

portátiles. El cabezal del sensor se calibra antes de la entrega y no normalmente necesita ser recalibrado durante su vida útil (Aeroqual, 2020).

Figura 3. Equipo de referencia Aeroqual



Fuente: Air quality sensor, Aeroqual- Página oficial.

Mediciones: Se realizaron las mediciones durante dos semanas (del 18 de marzo al 1 de abril del 2022) en donde se dispusieron dos EBC (ver Figura 4) y el equipo de referencia Aeroqual en el mismo lugar en espacio interior, con el fin de poder tener condiciones similares, se pusieron a una altura de 50cm sobre el nivel del suelo (ver Figura 5), se realizó la descarga de información diariamente y se tuvo en cuenta variables como PM 10, PM 2.5, humedad y temperatura.

Figura 4. Equipo de bajo costo



Fuente: Autora, 2022

Figura 5. Disposición de los equipos para las mediciones



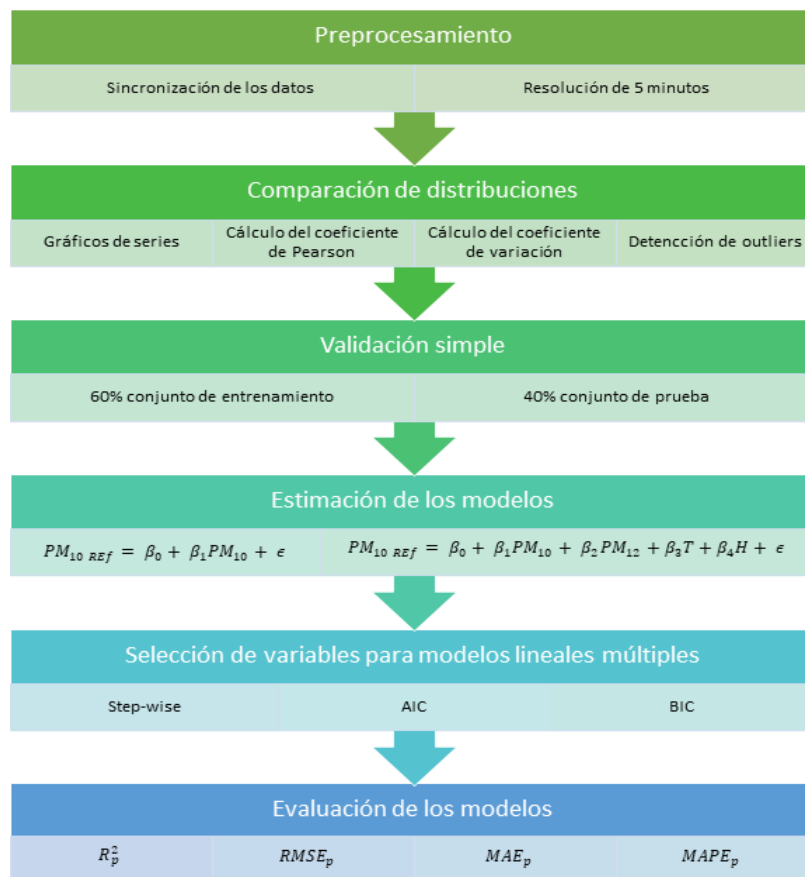
Fuente: Autora, 2022.

Análisis de los datos: Posteriormente se tabularon los datos arrojados y mediante la metodología (ver Figura 6) establecida por el equipo de estudiantes del programa de estadística de la Universidad (Karen Torres y David Rojas) se realizó el análisis de los mismos. La metodología se creó de acuerdo a las necesidades del proyecto, la cual se dividió en 6 fases que se cumplieron de manera cronológica. El procesamiento de la información fue la fase que demandó más trabajo dentro del cronograma, en esta se realizó la sincronización del tiempo en que fueron tomados los datos para los tres equipos (dos EBC y el equipo de referencia Aeroqual), agrupándose las mediciones cada 5 minutos, teniendo en cuenta el valor

más cercano al minuto cerrado. Es importante mencionar, el análisis estadístico realizado demanda que se estandarice el tiempo y la falta de sincronización en el tiempo en que se realizaron las mediciones se presentó principalmente en los EBC.

La segunda fase, consistió en la comparación de las distribuciones de la frecuencia de los datos mediante gráficos de series, cálculo del coeficiente de Pearson para determinar la medida de dependencia lineal entre las variables, cálculo de coeficiente de variación, en donde se compara el conjunto de datos teniendo en cuenta el valor de la media aritmética y la detección de Outliers o datos atípicos. En la tercera y cuarta fase, se realizó la validación simple y se estimaron los modelos a implementar tanto para la regresión lineal simple como para la múltiple. Finalmente, para la fase cuatro y cinco, se seleccionaron las variables a incluir en cada uno de los modelos por aparte para poder realizar la comparación y evaluación de los mismos.

Figura 6. Metodología utilizada para la validación y calibración de los EBC



Fuente: Estudiantes de estadística Karen Torres y David Rojas Universidad el Bosque, 2022

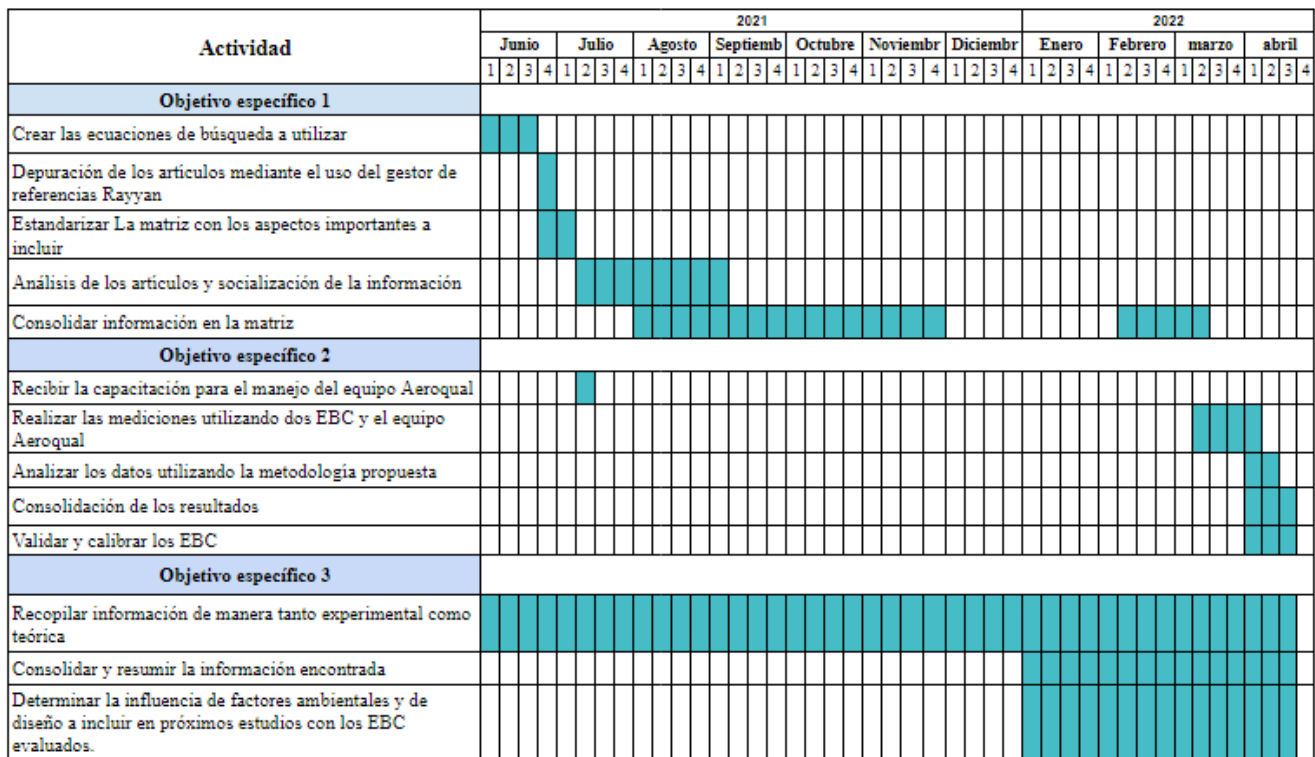
7.1.3 Objetivo específico 3

Se recopiló información de manera tanto experimental como teórica durante el tiempo de desarrollo del proyecto, proporcionando datos importantes aun cuando el proyecto en marcha no lo requirió, para ello se fue consolidando la información y resumiendo, de tal manera que al culminar el proyecto se contará con un indicio claro de cuáles eran los aspectos a mejorar, recomendaciones, deficiencias o fallas en el primer modelo de calibración, algunas variables y recomendaciones a incluir, también se buscó estandarizar la metodología de tal manera que contará con un orden cronológico (de principio a fin del proyecto).

7.2 Plan de trabajo

Se elaboró un plan de trabajo donde a través de un cronograma se establecieron las actividades necesarias para dar cumplimiento a los objetivos propuestos, se determinó un tiempo de ejecución por actividad de acuerdo a las necesidades, capacidad de ejecución y la presencia de eventualidades que retrasan la ejecución de estas.

Figura 7. Cronograma de actividades



Fuente: Autora, 2022.

8. Resultados

8.1 Consolidar una revisión bibliográfica para definir el método de calibración de las mediciones de los EBC a utilizar.

La calibración consiste en establecer un modelo matemático que describa la relación entre los datos de los EBC y las mediciones de referencia, a partir de la revisión sistemática, se realizó junto con el grupo de trabajo del semillero de investigación “TeGes”, un análisis más detallado de cada uno de los artículos con el fin de poder ser interpretados correctamente, se plasmó la información de manera organizada y puntual en el **anexo 1**. Al realizar dicho análisis, se descartaron nuevamente 7 artículos por su escasa incidencia en los objetivos planteados al no dar respuesta a el problema de investigación, a partir de ello, se encontró que los métodos mayormente utilizados para la calibración fueron la regresión lineal (LR), la red neuronal artificial (RNA), la regresión de vector de apoyo (SVR) y un modelo de Random Forest (RF). En general, todas las técnicas de aprendizaje automático descritas anteriormente, pueden tener en cuenta efectos múltiples y desconocidos, lo que puede significar una predicción más precisa de los resultados en función de los datos y de los parámetros de entrada.

Se determinó que el método a utilizar por fácil funcionalidad y utilidad es la LR simple y múltiple, ya que a su vez permite identificar si los factores ambientales medidos como la temperatura ambiente y la humedad relativa tienen influencia significativa sobre los datos de PM10 y PM2.5. También, se tuvo en cuenta que, este método arroja el coeficiente de determinación R^2 , con el cual es posible interpretar el modelo (un mayor R^2 refleja un aumento en la precisión predictiva del modelo de regresión) y luego del procesamiento de los registros como medida parcial de cuánto coinciden los datos de los EBC con las mediciones de referencia según el modelo de regresión que presentaba el mayor R^2 .

La mayoría de los trabajos revisados informaron el valor R^2 como métrica principal para realizar la comparación entre las mediciones de los EBC con las mediciones de referencia. Sin embargo, se evidenció que otros parámetros estadísticos, como el sesgo medio normalizado (MNB), el error medio normalizado (MNE) y el error cuadrático medio (RMSE), también son muy importantes para evaluar la relación entre EBC y el equipo de referencia y solo algunos estudios informan sobre la incertidumbre de la medición.

En cuanto a la influencia de variables meteorológicas como humedad relativa y temperatura, estas se tuvieron en cuenta para más de la mitad de los estudios realizados, se encontró que la mayoría de las calibraciones se llevaron a cabo durante pruebas en campo, y se evidenció un número limitado de

experimentos de calibración basados en laboratorio. Mediante modelos lineales se obtuvieron excelentes resultados en cuanto a la relación del PM con la humedad y la temperatura, sin embargo, se debe tener en cuenta que cuando los datos de humedad relativa son mayores a 75%, se recomienda que se explore el crecimiento de las partículas en el desarrollo de modelos.

8.2 Validar sensores de bajo costo para la medición de material particulado (PM 10 - PM 2.5, porcentaje de humedad relativa y temperatura media) con el equipo de referencia Aeroqual

Con el fin de reducir los errores que se presentan en las mediciones de los sensores de bajo costo para material particulado se debe realizar la calibración a partir de un modelo que permite asignar las mediciones del equipo de bajo costo a una referencia más precisa que en este caso se obtuvo con el equipo Aeroqual.

Resumen de los datos de los equipos de bajo costo y el de referencia

Se realizó un resumen de cada una de las variables para los dos EBC y el equipo de referencia, en donde se visualizó de manera ordenada el mínimo, máximo, el promedio y la cantidad de NA's que hace referencia a datos faltantes (los cuales fueron eliminados posteriormente). Los resultados se contemplan en las siguientes tres tablas.

Tabla 4 Resumen para el equipo de bajo costo 52

Fecha	PM10 (ug/m3)	PM2.5 (ug/m3)	Humedad	Temperatura
Min. :2022-03-18 22:29:37	Min. : 0.000	Min. : 0.00	Min. :21.96	Min. :23.12
1st Qu.:2022-03-22 19:39:12	1st Qu.: 5.000	1st Qu.: 5.00	1st Qu.:35.05	1st Qu.:25.39
Median :2022-03-25 19:28:39	Median : 8.000	Median : 8.00	Median :39.42	Median :26.12
Mean :2022-03-25 17:07:51	Mean : 9.158	Mean : 8.68	Mean :38.60	Mean :26.61
3rd Qu.:2022-03-28 16:34:35	3rd Qu.: 11.000	3rd Qu.: 10.00	3rd Qu.:42.22	3rd Qu.:27.47
Max. :2022-04-01 14:07:17	Max. :472.000	Max. :433.00	Max. :45.93	Max. :36.95
NA's :8	NA's :5	NA's :5	NA's :8	NA's :8

Fuente: Estudiantes Karen Torres y David Rojas de estadística Universidad el Bosque, 2022

Tabla 5. Resumen para el equipo de bajo costo b9

Fecha	PM10	PM2.5	Humedad	Temperatura
Min. :2022-03-18 22:31:18	Min. : 0.00	Min. : 0.000	Min. :32.07	Min. :24.02
1st Qu.:2022-03-24 08:56:42	1st Qu.: 6.00	1st Qu.: 6.000	1st Qu.:36.30	1st Qu.:25.73
Median :2022-03-27 16:55:40	Median : 9.00	Median : 9.000	Median :38.77	Median :26.43
Mean :2022-03-27 17:27:47	Mean : 10.56	Mean : 9.799	Mean :38.43	Mean :26.73
3rd Qu.:2022-03-31 05:39:29	3rd Qu.: 13.00	3rd Qu.: 12.000	3rd Qu.:40.29	3rd Qu.:27.51
Max. :2022-04-03 09:56:49	Max. :479.00	Max. :414.000	Max. :43.92	Max. :38.83
NA's :11	NA's :8	NA's :8	NA's :11	NA's :11

*Fuente: Estudiantes Karen Torres y David Rojas de estadística
Universidad el Bosque, 2022*

Tabla 6. Resumen para el equipo de referencia Aeroqual

Fecha/hora	PM10 (ug/m3)	PM2.5 (ug/m3)	Humedad	Temperatura
Min. :2022-03-18 21:45:00	Min. : 0.0	Min. : 0.000	Min. :15.70	Min. :18.10
1st Qu.:2022-03-22 16:32:45	1st Qu.: 7.0	1st Qu.: 5.000	1st Qu.:48.40	1st Qu.:20.50
Median :2022-03-26 10:48:30	Median : 9.0	Median : 7.000	Median :54.80	Median :21.90
Mean :2022-03-26 10:35:15	Mean : 10.8	Mean : 8.712	Mean :52.87	Mean :22.82
3rd Qu.:2022-03-30 04:42:15	3rd Qu.: 12.0	3rd Qu.: 10.000	3rd Qu.:60.00	3rd Qu.:23.80
Max. :2022-04-02 22:40:00	Max. :613.0	Max. :569.000	Max. :67.70	Max. :45.80
NA's :14	NA's :12	NA's :12	NA's :14	NA's :14

*Fuente: Estudiantes de estadística Karen Torres y David Rojas
Universidad el Bosque, 2022*

Series de tiempo y mediciones

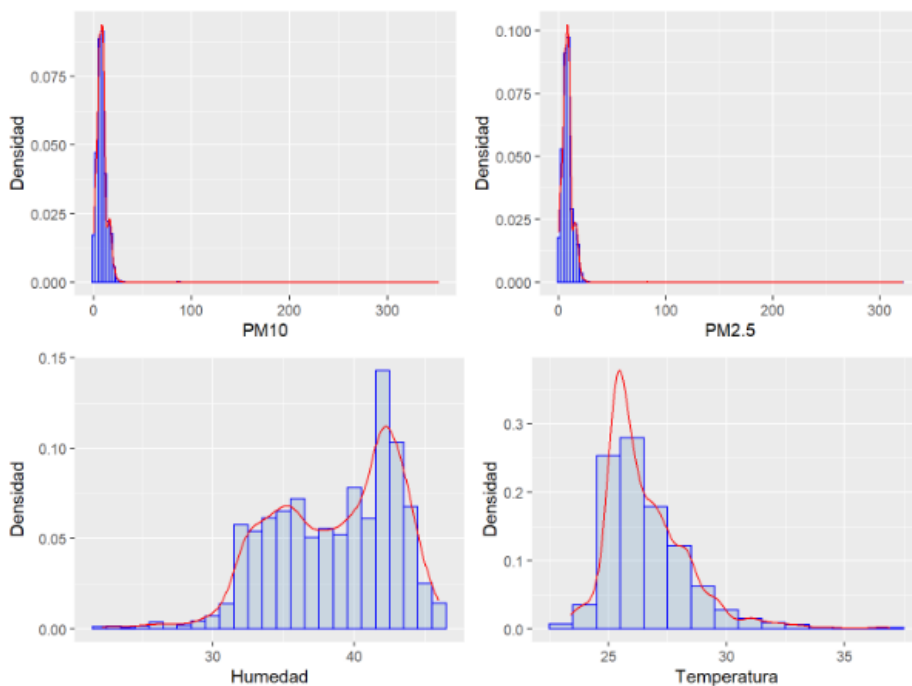
Se tomó como referencia el equipo Aeroqual el cual arroja series de tiempo con minutos cerrados, por otro lado, los EBC presentaron desfases en los segundos, los cuales se acomodaron y se redondearon para obtener datos homogéneos y realizar una mejor comparación entre sí. Se encontró que los EBC no toman datos de manera constante minuto a minuto, por lo que se determinó que la forma más adecuada para las series de tiempo era una resolución de 5 minutos para que los datos estén presentes en los tres equipos y no se presentaran datos faltantes.

Distribución de los datos (EBC)

Se presenta la distribución de las cuatro variables registradas (PM10, PM2.5, humedad relativa y temperatura ambiente) en las mediciones con los dos EBC y sus respectivos histogramas, que dan una mejor idea de la distribución de estos datos. Se presentaron valores atípicos, principalmente para el EBC52 que provocaron desajustes importantes en la distribución de los registros de material particulado, por lo tanto, se tomó la decisión de eliminarlos del estudio.

Figura 8. Distribución de los datos (EBC 52)

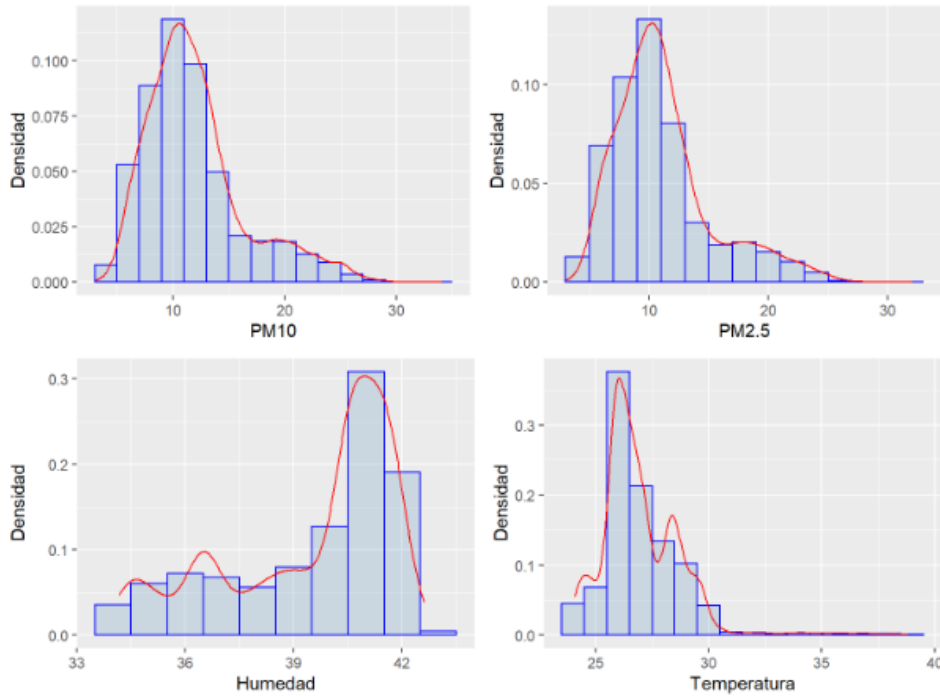
EBC 52



*Fuente: Estudiantes de estadística Karen Torres y David Rojas
Universidad el Bosque, 2022*

Figura 9. Distribución de los datos (EBC B9)

EBC B9



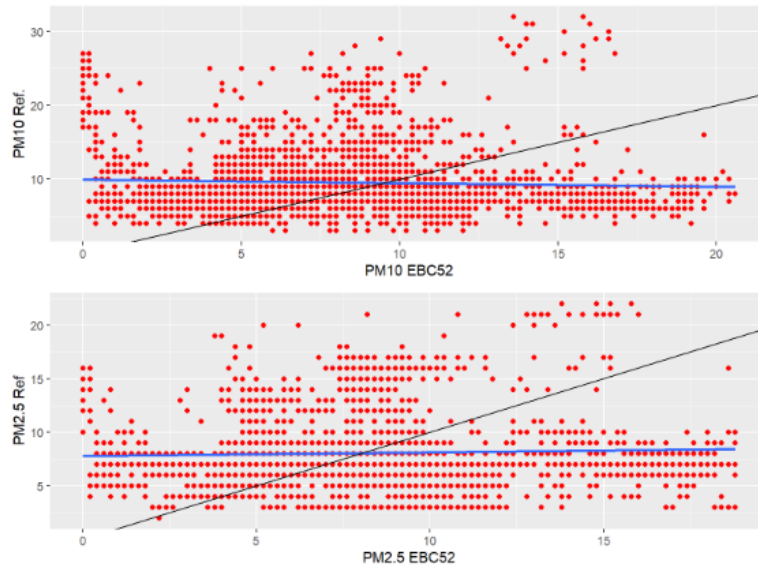
Fuente: Estudiantes de estadística Karen Torres y David Rojas
Universidad el Bosque, 2022

Relación entre mediciones de PM entre EBC y Equipo de Referencia

Se plantean los siguientes gráficos de puntos entre las mediciones de material particulado de los EBC y el equipo de referencia, esto permite conocer de manera previa como es el desempeño de las mediciones de los EBC. En este caso, la línea de color negro es la situación ideal, es decir, los datos deberían ser iguales a esta función, y la línea azul corresponde a la recta de la regresión lineal entre las dos variables, donde la medición de referencia (mediciones del equipo Aeroqual) es la variable de respuesta. Las rectas de regresión obtenidas en el EBC52 difieren de las rectas “ideales”, mientras que para el EBC B9 no presentan una diferencia marcada.

Figura 10. Relación entre mediciones de PM entre EBC 52 y Equipo de Referencia

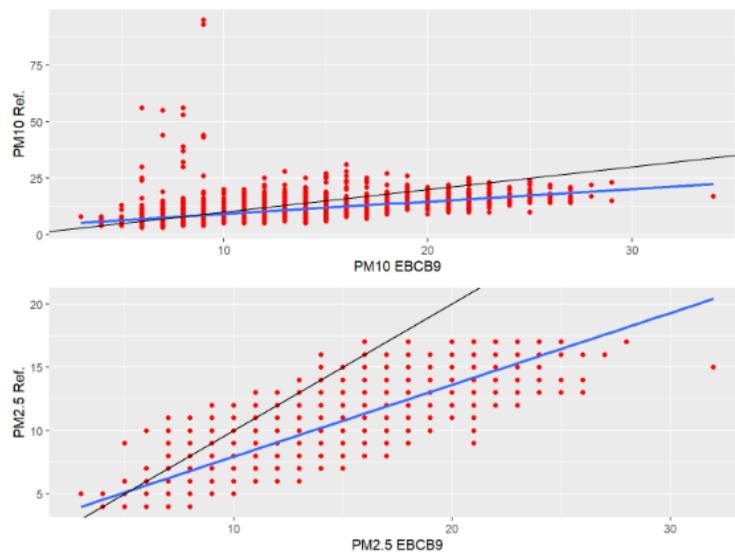
EBC 52



Fuente: Estudiantes de estadística Karen Torres y David Rojas
Universidad el Bosque, 2022

Figura 11. Relación entre mediciones de PM entre EBC y Equipo de Referencia

EBC B9



Fuente: Estudiantes de estadística Karen Torres y David Rojas
Universidad el Bosque, 2022

8.3 Determinar la influencia de factores ambientales y de diseño a incluir en próximos estudios con los EBC evaluados.

a. Influencia de factores ambientales como humedad y temperatura

Uno de los criterios considerados en la revisión sistemática, fue la influencia de la humedad y la temperatura como criterio de muestreo, para lo cual, se encontró que en más de la mitad de los artículos revisados presentaban datos e incluían estos factores ambientales. Se evidenció que la regresión lineal y el ajuste de las regresiones mejoraba cuando se adicionan las variables meteorológicas dentro de las ecuaciones y esto generaba un coeficiente de correlación R^2 más alto. De acuerdo con lo reportado por los sensores de bajo costo, durante el periodo de medición, los equipos fueron expuestos a temperaturas entre 23°C y 36°C y humedades relativas entre 23% y 64.5%. Es importante mencionar que las temperaturas registradas por los EBC deben ser objeto de estudio en estudios posteriores dado que de manera descriptiva se aprecia un desfase en estas mediciones si se comparan con las temperaturas registradas por el equipo de referencia.

b. Influencia del material de la carcasa

Como primera instancia, se encontró que el material con el que se realiza la carcasa del EBC tiene bastante influencia en los resultados que arrojan los equipos. En un estudio realizado en el Instituto de Salud y Ambiente de manera previa a este, se diseñó el prototipo inicial de los equipos de bajo costo con una carcasa en MDF (por sus siglas en inglés Medium Density Fibreboard), y se encontró que los datos arrojados eran sobreestimados, principalmente el tema de temperatura y humedad, el cual aumentaba casi el doble de la temperatura real.

Por tal razón, se tuvo que ajustar y cambiar el material de la estructura por PLA (ácido poliláctico) color verde, un biopolímero termoplástico, material que, a temperaturas relativamente altas, se vuelve deformable o flexible, se derrite cuando se calienta y se endurece cuando se enfría lo suficiente, de fácil manipulación por impresión 3D e inyección. Sus propiedades estructurales lo hacen resistente con un punto de elasticidad que evita que se rompa con facilidad y el uso de este material evidenció mejoras significativas en los resultados. Adicional a ello, cabe resaltar su costo de impresión, que no sobrepasa los 80.000 COP y por lo tanto se convierte en un material ideal para la estructura del EBC (datos suministrados por el estudiante Daniel García del programa de Diseño Industrial).

Figura 12. Material MDF (Izquierda) y PLA (Derecha)



Fuente: Autora, 2022

c. Estructura de ventilación de la carcasa de los equipos de bajo costo

Teniendo en cuenta el material a utilizar, se ensambló un primer prototipo y se puso en funcionamiento mediante la toma de datos, sin embargo, se encontró que el equipo se recalentaba y esto producía anomalías en los resultados, también se evidenciaron algunas fallas en el sistema electrónico lo que ocasionó una interrupción en la toma y registro de datos. A raíz de esta situación, se realizó un nuevo diseño con entradas de aire de manera más orgánica y un mejor flujo, la estructura permite que tenga un flujo de aire interno de entrada y salida representado por orificios tanto en la parte frontal como en la parte trasera. Finalmente, con este nuevo diseño se realizó las mediciones del presente estudio.

Figura 12. Estructura final del EBC con las entradas de ventilación



Fuente: Daniel Garcia, 2021

d. Posicionamiento del sensor de humedad y temperatura del equipo de referencia

En cuanto al equipo de referencia Aeroqual, se tuvo inconvenientes con la toma de datos continua del sensor de humedad y temperatura, se determinó que la mejor manera para mitigar la falta de datos, era poner en un correcto posicionamiento el sensor, de tal manera que no quedara por fuera de la superficie y se evitará al máximo el contacto de objetos externos con el sensor, de igual manera, se debe estar revisando constantemente si se reflejan los datos en tiempo real en la pantalla y de no estar reportando, se debe desconectar y conectar nuevamente el cable que conecta al sensor con el equipo.

e. Altura de posicionamiento para recolección de la información

Durante la revisión bibliográfica, se encontró que, en la mayoría de estudios, se sugería ubicar los equipos a una altura promedio entre 0.5-1.5 metros del nivel del suelo, debido a que no se recomendaban ubicarlos a la altura del suelo. Aunque se encontraron estudios en los cuales no especificaron la altura, y en otros se especificaron mayores alturas como referencia.

f. Carga y descargar de datos de los EBC y del equipo de referencia (Aeroqual)

Al realizarse la capacitación para el manejo del equipo de referencia, se especificó que la cantidad de datos que puede almacenar la memoria, era de aproximadamente 36 horas, por lo que la descarga de información de manera confiable y con el fin de poder asegurar la recolección completa de los datos, se debe realizar la descarga de información cada 24 horas. En cuanto a los EBC, estos tienen una capacidad de retención de la información mucho mayor debido a que esta depende del tamaño de la SD card, actualmente se cuenta con una SD card de 16GB con capacidad de almacenamiento aproximado de 2083.33 días o 125000 muestras como mínimo. Además, que la información se esta almacenando en un servidor (ver Figura 17) y se cuenta con una plataforma web que permite visualizar los datos obtenidos y que fue diseñada por el estudiante Gendelfav Izquierdo del programa de Ingeniería Electrónica. En esta plataforma, se almacenan en una base de datos la información recolectada por ambos EBC, mediante un protocolo web que permite enviar y clasificar la información de cada dispositivo. Esta puede ser descargada en línea sin necesidad de tener contacto con los equipos, sin embargo, debido a fallas que se presentaron durante el muestreo, se recomienda realizar la descarga de información diariamente para evitar pérdidas de datos.

Figura 13. Servidor utilizado para la descarga de información de los EBC



Fuente: Autora, 2022

g. Batería y conectividad de los EBC y el equipo de referencia (Aeroqual)

Al igual que la memoria del Aeroqual, la batería tiene una durabilidad de 36 horas, por lo que se sugiere tener el equipo conectado a corriente durante todo el tiempo de medición y con la batería puesta, esto ya que en caso de que se presente un inconveniente con temas de energía, no se dejen de suministrar los datos. En cuanto a los EBC, estos necesitan estar conectados a la corriente eléctrica durante todo el tiempo de medición debido a que no cuentan con una batería propia, se recomienda la utilización de tomas separadas que proporcione en cada uno de los equipos la energía suficiente y de esta manera asegurar el continuo funcionamiento.

h. EBC defectuoso

A pesar de las pruebas realizadas previas a la puesta en marcha de los EBC, se encontró que existe la posibilidad de que algunos componentes de los equipos estén defectuosos de fábrica o se vayan deteriorando con el tiempo. Al realizar la prueba con los dos EBC que se encuentran a disposición, se evidencia que el equipo B52 presenta un sesgo de error más elevado y un R^2 menor a 0.5 en comparación con el equipo B9, el cual tiene una correlación más alta con el equipo de referencia y por lo tanto un R^2

mayor a 0.8. Esto determina que se debe contar con la disposición de un mayor número de EBC de los que se requieren en la medición ya que como se evidencia en estudios con un número mayor de equipos, las probabilidades de que estos salgan defectuosos en ocasiones son elevadas.

i. Periodo de medición y series de tiempo

En la revisión bibliográfica realizada, no se evidencio ningún periodo de medición establecido o estricto en el cual se basarán los autores, lo que se debe a que el periodo de medición que se emplea es de acuerdo a cada proyecto, a sus objetivos y las capacidades que tiene cada equipo de bajo costo. Sin embargo, se recomienda realizar el muestreo y la recolección de datos por al menos dos semanas consecutivas las 24 horas del día. A nivel estadístico, entre más datos registrados, los resultados serán más certeros, teniendo en cuenta a su vez que, al realizar la sincronización de los datos para el ajuste de los modelos tanto del equipo de referencia como de los equipos de bajo costo, estos tienden a reducirse.

j. Recopilación de datos del sitio de medición

Debido a la estructura exterior (carcasa) actual de los EBC, las mediciones se deben realizar en espacios interiores en donde factores meteorológicos como lluvia y temperaturas extremas no afecten la funcionalidad de los equipos. Con el fin de poder relacionar e interpretar si las características del entorno afectan o se ven involucradas en los parámetros de PM10 y PM2.5, se recomienda realizar un análisis y una recopilación de información que incluya, material del entorno a evaluar, tipo de piso, ubicación de avenidas principales, cantidad de personas en el lugar de estudio, si se encuentran mascotas durante el periodo de medición, entre otros aspectos que se crean tiene influencia en el estudio. Por otra parte, se recomienda llevar un registro en el que se consoliden actividades que generen partículas como horario de la cocción de alimentos, apertura de ventanas, horas de limpieza, entre otros.

9. Análisis y discusión de resultados

9.1 Consolidar una revisión bibliográfica para definir el método de calibración de las mediciones de los EBC a utilizar.

El modelo de regresión lineal, tanto simple como múltiple es una de las técnicas más utilizadas para la calibración de los datos de ECB frente a una medida de referencia (Karagulian, et al., 2019), ya que

permite incluir el uso de covariables meteorológicas como humedad y temperatura que mejoran la calidad de la calibración, a pesar de ello, también se encontraron diversos estudios en los cuales no recomiendan el uso de LR como método de calibración y establecen otros métodos como más efectivos y recomendables mediante el uso de técnicas de aprendizaje supervisado como las redes neuronales artificiales (ANN), el bosque aleatorio (RF), la máquina de vectores de soporte (SVM), y soporte de regresión de vectores (SVR). Sin embargo, el rendimiento de la regresión lineal como modelo de referencia es eficiente y no se descarta como método de calibración en ninguno de los estudios revisados.

Por otra parte, en cuanto al coeficiente de determinación R^2 mediante la cual se comparan los datos de los EBC con los datos de los equipos de referencia, se evidencia que a comparación de los otros métodos, para la regresión lineal, los datos son más dispersos, sin embargo se encuentran valores altos de R^2 superiores a 0,95 y en ocasiones para la regresión lineal múltiple se encontraron valores de R^2 menores a 0,7. Esto se debe, principalmente a que cuando los valores de humedad relativa tiene un umbral superior a 75% el crecimiento de las partículas incrementa (Idrees, Z., & Zheng, L. 2020) y por lo tanto, los resultados obtenidos no son los reales, este efecto es más notorio para PM10 que para PM2.5, por lo que, al obtener cifras de humedad relativa altas, se recomienda la utilización de modelos más robustos que distingan de manera más precisa la incidencia de este factor ambiental sobre el contaminante criterio. Se resalta que, el rango de las mediciones y muestreo también es un factor que incide sobre el R^2 , el cual puede aumentar (dando resultados mejores) cuando aumenta el rango de mediciones, no obstante, dado que los EBC tienden a verse afectados por el deterioro, en los estudios de campo con largas duraciones temporales, existe mayor probabilidad de informar un R^2 más bajo (resultados desfavorables), que periodos de tiempo medios.

9.2 Validación de las mediciones de los sensores de bajo costo para la medición de material particulado (PM 10 - PM 2.5, porcentaje de humedad relativa y temperatura media) con el equipo de referencia Aeroqual

Se realizó un resumen de las distintas medidas y datos arrojados de los EBC frente a las medidas del equipo de referencia, con el fin de poder realizar un análisis más adecuado de los datos. Se evidencia que las mediciones de material particulado del EBC 52, son significativamente superiores a las mediciones de referencia, lo que generó dificultades en el ajuste de los modelos. Por otro lado, para

el EBC B9 no se dan estas notorias diferencias, por lo que es posible afirmar que las diferencias evidenciadas en EBC52, se deben a problemas o defectos de fábrica para este equipo.

A su vez, se evidencia que existen datos atípicos para el equipo de referencia en cuanto a la temperatura, lo se supone, se debe a un recalentamiento interno del equipo que se ve reflejado en un alza de temperatura que supera los 40°C, datos completamente sobreestimados de la temperatura ambiente que puede estar presente en la ciudad de Bogotá.

Tabla 7. Resumen de los datos arrojados por los EBC52 frente a las medidas del equipo de referencia (en amarillo resaltan las mediciones del equipo de referencia).

EBC52

Fecha	Fecha.1	PM10	PM10.1	PM2.5	PM2.5.1
Min. :2022-03-18 22:31:00	Min. :2022-03-18 22:31:00	Min. : 0.000	Min. : 3.000	Min. : 0.000	Min. : 2.000
1st Qu.:2022-03-22 19:27:45	1st Qu.:2022-03-22 19:27:45	1st Qu.: 5.200	1st Qu.: 7.000	1st Qu.: 5.000	1st Qu.: 6.000
Median :2022-03-25 19:39:00	Median :2022-03-25 19:39:00	Median : 8.000	Median : 8.000	Median : 7.600	Median : 7.000
Mean :2022-03-25 17:09:42	Mean :2022-03-25 17:09:42	Mean : 9.153	Mean : 9.486	Mean : 8.675	Mean : 8.008
3rd Qu.:2022-03-28 16:35:48	3rd Qu.:2022-03-28 16:35:48	3rd Qu.: 10.800	3rd Qu.:11.000	3rd Qu.: 10.200	3rd Qu.: 9.000
Max. :2022-04-01 10:55:00	Max. :2022-04-01 10:55:00	Max. :352.000	Max. :32.000	Max. :321.200	Max. :22.000

Humedad	Humedad.1	Temperatura	Temperatura.1
Min. :22.16	Min. :15.90	Min. :23.41	Min. :18.10
1st Qu.:35.03	1st Qu.:38.58	1st Qu.:25.40	1st Qu.:20.70
Median :39.41	Median :59.00	Median :26.13	Median :21.30
Mean :38.58	Mean :51.33	Mean :26.61	Mean :24.25
3rd Qu.:42.20	3rd Qu.:60.20	3rd Qu.:27.48	3rd Qu.:28.90
Max. :45.91	Max. :63.10	Max. :36.90	Max. :45.70

*Fuente: Estudiantes de estadística Karen Torres y David Rojas
Universidad el Bosque, 2022*

Tabla 8. Resumen de los datos arrojados por los EBC-B9 frente a las medidas del equipo de referencia (en amarillo resaltan las mediciones del equipo de referencia).

EBCB9

Fecha	Fecha.1	PM10	PM10.1	PM2.5	PM2.5.1
Min. :2022-03-18 22:33:00	Min. :2022-03-18 22:33:00	Min. : 3.00	Min. : 3.0	Min. : 3.00	Min. : 4.000
1st Qu.:2022-03-24 06:29:21	1st Qu.:2022-03-24 06:29:21	1st Qu.: 9.00	1st Qu.: 7.0	1st Qu.: 8.00	1st Qu.: 7.000
Median :2022-03-27 11:23:30	Median :2022-03-27 11:23:30	Median :11.00	Median : 9.0	Median :10.00	Median : 8.000
Mean :2022-03-27 10:39:02	Mean :2022-03-27 10:39:02	Mean :12.04	Mean :10.3	Mean :11.22	Mean : 8.653
3rd Qu.:2022-03-30 21:08:21	3rd Qu.:2022-03-30 21:08:21	3rd Qu.:14.00	3rd Qu.:12.0	3rd Qu.:13.00	3rd Qu.:10.000
Max. :2022-04-02 22:38:00	Max. :2022-04-02 22:38:00	Max. :34.00	Max. :95.0	Max. :32.00	Max. :17.000
	Humedad	Humedad.1	Temperatura	Temperatura.1	
	Min. :34.17	Min. :23.70	Min. :24.08	Min. :18.80	
	1st Qu.:37.89	1st Qu.:49.90	1st Qu.:25.87	1st Qu.:20.80	
	Median :40.50	Median :60.20	Median :26.56	Median :21.50	
	Mean :39.48	Mean :55.83	Mean :26.97	Mean :22.68	
	3rd Qu.:41.27	3rd Qu.:61.60	3rd Qu.:28.17	3rd Qu.:23.80	
	Max. :42.61	Max. :64.50	Max. :38.83	Max. :42.10	

Fuente: Estudiantes de estadística Karen Torres y David Rojas Universidad el Bosque, 2022

Modelos de regresión lineales simple

Se entrenaron y validaron dos modelos de regresión lineales simples para cada equipo de bajo costo, representados en la Figura 20. Los modelos simples para el EBC 52 no se ajustaron de manera correcta, ya que el R^2 tienen valores muy bajos cercanos a 0, lo cual estaría indicando que la variabilidad de las variables respuesta no están siendo bien explicadas por las variables independientes. Para los modelos del equipo EBC B9 sus respectivas métricas obtuvieron valores con coeficientes de variación más adecuados, el modelo PM2.5 de referencia se obtuvo un R^2 de 0.721, lo que indica un resultado con mejoras evidentes, aunque no es el esperado, sin embargo, para el modelo PM10 de referencia el R^2 (0.232) no es muy bueno y los valores del error cuadrático medio (RMSE) son elevados.

Tabla 9. Resultados de los modelos finales simples para el EBC 52 y B9

Resultados modelos para EBC_52			Resultados modelos para EBC_B9		
	RMSE	Rsquared		RMSE	Rsquared
PM2.5 Ref	3.517	0.002	PM2.5 Ref	1.527	0.721
PM10 Ref	4.659	0.002	PM10 Ref	4.554	0.232

*Fuente: Estudiantes de estadística Karen Torres y David Rojas
Universidad el Bosque, 2022*

Modelos de regresión lineales múltiples

Para la selección de variables en los modelos lineales múltiples se utilizó la metodología *Forward*, la cual comienza con el modelo nulo y se van agregando variables una a una, al final se escogió el modelo que tuvo el menor RMSE. Este procedimiento se realizó para cada uno de los equipos y sus respectivas variables de respuesta (PM10 y PM2.5 del equipo de referencia). Para el EBC 52, se encontró que los modelos tampoco obtuvieron resultados muy buenos, para el PM2.5 la única variable significativa fue la humedad y para el PM10 el mejor modelo incluyó todas las variables independientes. Sin embargo, el R^2 continuó estando por debajo de 0.5.

En el caso de EBC B9 el modelo para el PM10 de referencia incluyó solamente la variable PM2.5, pero no se obtuvieron resultados muy buenos, ya que el R^2 es de tan solo 0.232 y el RMSE es bastante alto. Por otro lado, para el modelo con el PM2.5 de referencia se seleccionaron las variables PM10 y PM2.5, este modelo obtuvo mejores resultados como se evidencia en la Figura 21.

A partir de ello, se seleccionó un modelo para el PM10 y uno para el PM2.5 (subrayados con amarillo en la Figura 21) que fueron aquellos modelos que obtuvieron mejores resultados en comparación con el equipo de referencia y el R^2 arrojado.

Tabla 10. Resultados de los modelos finales múltiples para el EBC 52 Y B9

Resultados modelos múltiples para EBC_52			Resultados modelos múltiples para EBC_B9		
	RMSE	Rsquared		RMSE	Rsquared
PM2.5 Ref	3.511	0.006	PM2.5 Ref	1.517	0.725
PM10 Ref	4.655	0.005	PM10 Ref	4.555	0.232

Fuente: Estudiantes de estadística Karen Torres y David Rojas
Universidad el Bosque, 2022

La corrección por el modelo de regresión lineal múltiple incluyendo los dos parámetros de humedad y temperatura, refleja una mejora no muy significativa de resultados de coeficiente de variación y del error cuadrático medio. Es preciso mencionar que, aunque los resultados fueron mejores para la corrección considerada con la regresión lineal múltiple, esta no alcanza las expectativas necesarias para considerar una correcta calibración y en consecuencia una validación.

9.3 Determinar la influencia de factores ambientales y de diseño a incluir en próximos estudios con los EBC evaluados.

La influencia de variables meteorológicas como la humedad y la temperatura deben tenerse en cuenta debido a que como evidencian diversos artículos, cuando se incluyen estos factores dentro de los modelos estadísticos, el sesgo tiende a disminuir al igual que los errores de medición, la inclusión de estas variables genera un análisis más completo de factores que no se pueden controlar y que en la mayoría de casos son determinantes para la calidad del aire.

Para el caso de la temperatura atmosférica y su relación con el PM, cuando estas presentan valores menores a 20°C se pueden presentar rangos de error más altos, lo que se ve directamente relacionado con la humedad, una relación inversa en la cual al disminuir la temperatura la humedad tiende a aumentar. La variable de humedad está mayormente relacionada con el PM que la temperatura, ya que de acuerdo con diversas investigaciones, una de las razones por las cuales la humedad relativa tiene una especial incidencia en errores reportados por el sensor, principalmente en rangos de humedades mayores a 70% u 80%, es debido a que humedades tan altas contribuyen al incremento por hinchamiento de las partículas (aumento del diámetro de la partícula), lo que conlleva a un recuento erróneo y sobreestimación de los

datos. Otro factor que incide, es la estructura y equipamiento del sensor, como son sensores de bajo costo con una estructura poco robusta, es que no se cuenta con un sistema de secado de partículas antes del ingreso al equipo lo que produce, un conteo tanto de partículas de aerosol como de niebla, suponiendo una sobreestimación de la medición (Roncancio Valbuena, L. X. 2019).

Estos factores de humedad y temperatura, también están relacionados, como se mencionó anteriormente con el material y la estructura de la carcasa, se evidenció que al tomar mediciones con el equipo utilizando la carcasa hecha en madera MDF, los resultados principalmente de temperatura rondaban los 40°C, una temperatura completamente atípica para la ciudad de Bogotá. Esto se debe a que el MDF (madera) por sus características físicas y propiedades térmicas, tiene un calor específico y una conductividad térmica baja, adicional a ello, su estructura con poca ventilación generaba incidencia en el recalentamiento del sensor y un registro de datos erróneo.

En lo que respecta a la corrección por humedad y temperatura, se pudo identificar que hasta cierto punto se puede corregir la medición por estos dos parámetros y que esta corrección tiende a ser específica por cada lugar y por el cada equipo de bajo costo que se tiene. Sin embargo, se deben tener en cuenta siempre estos factores cuando se desea realizar validación y calibración de EBC.

10. Conclusiones

- La regresión lineal y el ajuste de las regresiones mejoró cuando se adiciona las variables meteorológicas como humedad relativa y temperatura ambiente dentro de la regresión, sin embargo, se pueden presentar mayores inconvenientes en el rendimiento de los EBC y causar sobreestimaciones significativas en las concentraciones de PM10 y PM2.5 especialmente a temperaturas bajas (por debajo de 20%) y a humedades relativas altas (superiores al 65%).
- Los resultados obtenidos luego de la calibración fueron aceptables para el caso de PM2.5 y pueden funcionar en el caso de una red de sensores de bajo costo en ambientes no muy contaminados, no obstante, es necesario antes de la implementación de estos sensores encontrar una mejor ecuación de corrección para de esta manera garantizar la calidad de los datos.
- A pesar del rendimiento razonable de uno de los sensores, es preciso recalcar que aún se presentan errores en los resultados arrojados por lo EBC y la probabilidad de encontrar inconsistencias a la hora de ser utilizados en estudios sigue siendo alta.

- Considerando el bajo costo de los equipos, la utilidad, inmediatez y facilidad de manejo que tienen, lleva a concluir que estos tienen un potencial significativo para complementar la de red de monitoreo de calidad del aire en ciudades como Bogotá para espacios interiores, aumentando la resolución espacio temporal de los datos, cubriendo zonas que en la actualidad las estaciones de monitoreo distrital no cubren en su totalidad y brindando información puntual de sitios de interés, como casas, hospitales, parqueaderos, colegios, proyectos específicos, entre otros.
- Como proyecto preliminar a un macroproyecto, se tienen resultados enriquecedores que servirán como base para la implementación a gran escala de estos EBC, abriendo diversas aplicaciones para el campo de la investigación y su implementación en espacios interiores.

11. Recomendaciones

- Debido a los resultados obtenidos mediante la calibración con regresión lineal, tanto simple como múltiple, se recomienda utilizar otro método que involucre sistemas no lineales, y de esta manera poder comparar los resultados y determinar si las asociaciones son más cercanas al equipo de referencia. A su vez, para obtener un mejor rendimiento se pueden realizar la calibración con una cantidad mayor de datos y realizarse tanto antes como después de la instalación de los EBC.
- Se debe continuar trabajando en los resultados de los datos arrojado por los equipos de bajo costo, enfatizando en los temas de humedad y temperatura, ya que son factores que inciden en el material particulado de manera significativa y al tener una sobreestimación de estos factores ambientales, los resultados no serán óptimos.
- Se recomienda continuar con la interdisciplinariedad de las diferentes áreas de investigación y del conocimiento que se utilizó en este proyecto de investigación (ingeniería electrónica, estadística y diseño industrial), ya que esto permite obtener mejores resultados y poder explotar el potencial que se tiene con estos EBC de una forma más efectiva, se evidencio un trabajo en equipo productivo en el cual los diferentes campos de acción generan aportes y se consolida un trabajo más completo y sustentado.

12. Referencias Bibliográficas.

Aeroqual. Outdoor Air Quality Test Kit (Starter). Estados Unidos. Recuperado de <https://www.aeroqual.com/product/outdoor-portable-monitor-starter-kit>

Alemanya E. Lopez A, 2004, *Dispersión de Contaminantes en la Atmosfera*, Editor Alfaomega, vol 2, (10), Mexico. Pag 36.

Badura, M., Batog, P., Drzeniecka-Osiadacz, A., & Modzel, P. (2019). Regression methods in the calibration of low-cost sensors for ambient particulate matter measurements. *SN Applied Sciences*, 1(6), 1-11.

Banco Mundial (BM) (2018). *Prioridades Ambientales para la Reducción de la Pobreza en Colombia: un análisis ambiental del país para Colombia*. Versión en español: Editorial Mayol.

Barreto Rincón, H. A., & García Vega, L. (2017). Selección del punto de medición y muestreo para la caracterización de material particulado más representativo de la ciudad de Bogotá y sus inmediaciones, como inicio de la primera fase del proyecto de investigación 002 (2015-2016) de la Universidad ECCI.

Caballero, Magally, & Ml. Cartín, Victor. (2007). Calidad del aire en dos centros hospitalarios y ocho clínicas veterinarias en Costa Rica. *Revista Costarricense de Salud Pública*, 16(30), 17-26. Retrieved April 05, 2021, from http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-14292007000100003&lng=en&tlng=es

Caro, S. D., Montero, E. Y. A., Consuegra, A. D. S. A., & Montero, A. S. (2021). *EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SENSOR DE BAJO COSTO PARA MEDIR LA CALIDAD DEL AIRE*. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería.

Castillo Landa, M. C. (2014). *Análisis del diseño de la política de la calidad del aire de la Municipalidad Metropolitana de Lima: 2010-2012*.

Che, W., Frey, H. C., Fung, J. C. H., Ning, Z., Qu, H., Lo, H. K., Chen, L., Wong, T. W., Wong, M. K. M., Lee, O. C. W., Carruthers, D., Cheung, F., Chan, J. W. M., Yeung, D. W., Fung, Y. H., Zhang, X., Stocker, J., Hood, C., Hohenberger, T. L., ... Lau, A. K. H. (2020). PRAISE-HK: A personalized real-time air quality informatics system for citizen participation in exposure and health risk management. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101986. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101986>

Chojer, H., Branco, P. T. B. S., Martins, F. G., Alvim-Ferraz, M. C. M., & Sousa, S. I. V. (2020). Development of low-cost indoor air quality monitoring devices: Recent advancements. *Science of The Total Environment*, 727, 138385.

Chow, J. C., Watson, J. G., Shah, J. J., Kiang, C. S., & Loh, C. Lev-On, M., Lents, JM, Molina, MJ, and Molina, LT 2004. Critical review discussion: Megacities and atmospheric pollution. *Journal of Air Waste Management Assoc*, 54(10), 1226-1235.

Colombia. Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 2254. (2017). Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. Bogotá: Diario Oficial de Colombia, 12 de Noviembre de 2017.

Collingwood, S., Zmoos, J., Pahler, L., Wong, B., Sleeth, D., & Handy, R. (2019). Investigating measurement variation of modified low-cost particle sensors. *Journal of aerosol science*, 135, 21-32.

CanAirIO. (5 de julio de 2021). CanAirIO documentation. Recuperado de <https://canair.io/docs/index.html>

EEA, 2019, Air quality in Europe — 2019 report, EEA Report No 10/2019, European Environment Agency.

Fischer García, F. L. (2020). Análisis espacial del material particulado en relación con la percepción de la calidad de vida en tres localidades de Bogotá-Colombia.

Franceschi, F., Cobo, M., & Figueredo, M. (2018). Discovering relationships and forecasting PM10 and PM2.5 concentrations in Bogotá, Colombia, using artificial neural networks, principal component analysis, and k-means clustering. *Atmospheric Pollution Research*, 9(5), 912-922.

Franco, J. F. (2012). Contaminación atmosférica en centros urbanos. Desafío para lograr su sostenibilidad: caso de estudio Bogotá. *Revista EAN*, (72), 193-204.

Fraume Restrepo, N. J. (2006). *Diccionario ambiental*.

Frankel, N., & Gage, A. (2009). *Fundamentos de monitoreo y evaluación*, Cursillo autodirigido. *Recuperado el*, 15

Góngora Torres, Maher Jerania.(2020). "Consideraciones técnicas en el diseño de un sistema de vigilancia de calidad del aire para la Zona Metropolitana de Bucaramanga."

Gonzalez Velandia, Tomas Felipe.(2015). "Determinación de la calidad del aire en la Universidad Libre seccional Bogotá sede Bosque Popular."

Global Burden of Disease Risk Factor Collaborators (2017). Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioral, environmental and occupational, and metabolic risks or

clusters of risks for 195 countries and territories, 1990–2017: a systematic analysis for the GBD Study 2017.

Hernández, A. (2013). Hoja metodológica del indicador Índice de Calidad del Aire - ICA (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Idrees, Z., & Zheng, L. (2020). Low cost air pollution monitoring systems: A review of protocols and enabling technologies. *Journal of Industrial Information Integration*, 17, 100123.

Jovašević-Stojanović, M., Bartonova, A., Topalović, D., Lazović, I., Pokrić, B., & Ristovski, Z. (2015). On the use of small and cheaper sensors and devices for indicative citizen-based monitoring of respirable particulate matter. En *Environmental Pollution* (Vol. 206, pp. 696–704). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.08.035>

Karagulian, F., Barbieri, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., ... & Borowiak, A. (2019). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*, 10(9), 506.

Kizel, F., Etzion, Y., Shafran-Nathan, R., Levy, I., Fishbain, B., Bartonova, A., & Broday, D. M. (2018). Node-to-node field calibration of wireless distributed air pollution sensor network. *Environmental Pollution*, 233, 900-909.

Korc, M., & Sáenz, R. (1999). Monitoreo de la calidad del aire en América Latina. *Korc Marcelo E*, 1-22.

Molina, C. M. Análisis de la contaminación en mega ciudades mexicanas mediante la utilización de redes de sensores de bajo costo de calidad del aire.

Muñoz, Franz, and Marilia Sá Carvalho. "Efecto del tiempo de exposición a PM10 en las urgencias por bronquitis aguda." *Cadernos de Saúde Pública* 25 (2009): 529-539.

Moya Frank, & Ledesma, R (2003). Normas Ambientales de Calidad del Aire y Control de Emisiones.

Navarrete, G. G., & Soto, K. G. R. (2019). SENSORES DE BAJO COSTO PARA EL MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE. *EPITEMUS*, 13(27), 30-37.

Organización Panamericana de la Salud (OPS) (2005). Evaluación de los Efectos de la Contaminación del Aire en la Salud de América Latina y el Caribe. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsea/fulltext/contaminacion/indice.pdf>

Qin, X., Hou, L., Gao, J., & Si, S. (2020). The evaluation and optimization of calibration methods for low-cost particulate matter sensors: Inter-comparison between fixed and mobile methods. *Science of The Total Environment*, 715, 136791.

Roncancio Valbuena, L. X. (2019) Evaluación del desempeño de sensores de bajo costo como complemento para el monitoreo de la calidad del aire de Bogotá y como herramienta para la determinación del grado de exposición de una población caso de estudio. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.

Sáez Cifre, E. (2017). Análisis de la calidad de aire interior en función de la tipología de ventilación. Aplicación al prototipo E3 (edificación eco-eficiente) de la UPV.

Secretaría Distrital de Ambiente (SDA, 2011). Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá, Alcaldía Mayor de Bogotá.

Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA) (2009) Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá 2008. Alcaldía Mayor de Bogotá. Disponible en: <http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/pdf/InformeAnual/Informe2008.pdf>

Solá, X. G., Crump, D., Berenguer, M. J., Hoffmann, D., Wynder, E. L., ... & Flannigan, B. CALIDAD DEL AIRE INTERIOR RIESGOS GENERALES. Enciclopedia de la salud y seguridad en el trabajo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 1, 44-1.

Suárez, C. A. A. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10. *Revista luna azul*, (34), 195-213.

Sloan Brittain, O., Wood, H., & Kumar, P. (2020). Prioritising indoor air quality in building design can mitigate future airborne viral outbreaks. *Cities & Health*, 1-4.

TSI. (2019). DUSTTRAK DRX AEROSOL MONITOR 8533. Minnesota. recuperado de <https://tsi.com/products/aerosol-and-dust-monitors/dust-monitors/dusttrak-drx-aerosol-monitor-8533/>

United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT) (2011). State of the World's Cities 2010-2011: Bridging the Urban Divide. Disponible en: <http://www.unhabitat.org/pmss/listItemDetails.aspx?publicationID=2917>

United Nations Population Division (UN) (2010). World Urbanization Prospects: The 2009 Revision. Disponible en: http://esa.un.org/unpd/wup/Documents/WUP2009_Highlights_Final.pdf

Villanueva, L. F. A. (2015). Gobernanza y gestión pública. Fondo de cultura Económica.

Vicuña, D. L. (2014). Gobernanza estratégica para la gestión de la calidad del aire en el estado de baja california.

Wang, Y., Du, Y., Wang, J., & Li, T. (2019). Calibration of a low-cost PM2. 5 monitor using a random forest model. *Environment international*, 133, 105161.

13. Anexos

13.1 Anexo 1: Revisión sistemática