RELACIÓN ENTRE LA CALIDAD DEL AIRE INTERIOR Y EXTERIOR DE UN EDIFICIO DE OFICINAS EN EL CENTRO DE MEDELLIN

Santiago Román Pizano (1); Elizabeth Parra Correa (2); Jorge Hernán Salazar (3)
(1) Estudiante de arquitectura, sromanp@unal.edu.co, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Arquitectura, Calle 59 A N 63-20 Edificio 24. Medellín, Colombia.
(2) Arq. Msc. en bioclimática, elparraco@unal.edu.co, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Arquitectura, Calle 59 A N 63-20 Edificio 24. Medellín, Colombia.
(3) Msc. Profesor Titular, email: jhsalaza@unal.edu.co, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Arquitectura, Calle 59 A N 63-20 Edificio 24. Medellín, Colombia.

RESUMEN
Las edificaciones localizadas en el trópico andino están expuestas a climas homogéneos, sin estaciones marcadas y en muchas ocasiones con unas condiciones meteorológicas que les permiten ventilarse de forma natural sin requerir gastos energéticos derivados de la refrigeración o calefacción mecánica. El impacto ambiental de estas edificaciones puede ser bajo, pero en algunos de nuestros centros urbanos los contaminantes en el aire siguen incrementando y, en consecuencia, las enfermedades asociadas a la baja calidad del aire se tornan en argumentos en contra de la conveniencia asociada a la ventilación natural. La presente investigación tiene como objetivo conocer la relación entre la calidad de aire interior y exterior de un edificio de oficinas con una fachada de doble piel diseñado para ventilarse naturalmente y ubicado en el centro de la ciudad de Medellín. Se valoraron las condiciones de calidad de aire adentro y afuera del edificio con respecto a la normativa colombiana y se hicieron registros de material particulado PM2.5 y PM10 durante 50 días continuos para contrastarlos con los registros oficiales de los puestos de monitoreo de la calidad del aire cercanos. Los resultados aportan criterios acerca del desempeño de una fachada de doble piel ante el ingreso de material particulado, identifican la distribución del material particulado en el día, ofrecen lineamientos para la operación y eventual automatización de las ventanas y validan la importancia de la ventilación nocturna en este tipo de edificaciones.

Palabras clave: Calidad del aire, salud, ventilación natural, material particulado.

ABSTRACT
The buildings located in the Andean tropics are exposed to fairly homogeneous climates, without marked seasons and in many cases with meteorological conditions that allow them to ventilate naturally without requiring energy costs derived from mechanical cooling or heating. The environmental impact of these buildings may be low, but in some of our urban centers the pollutants in the air are increasingly abundant and consequently, the diseases associated with low air quality become arguments against the convenience of natural ventilation. The objective of this research is to understand the relationship between indoor and outdoor air quality in an office building with a double skin facade designed to ventilate naturally and is also located in the center of the city of Medellín. The air quality conditions inside and outside the building were evaluated based on the Colombian regulations and records of PM2.5 and PM10 particulate material were made for 50 continuous days to contrast them with the official records of the air quality stations of the nearby buildings. These results provide criteria about the performance of a double skin facade when faced with the entry of particulate material, identifying the distribution during the day, offering guidelines for the operation and automation of the windows as well as validate the importance of night ventilation in these types of buildings.

Keywords: Air quality, health, natural ventilation, particulate material.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia es un país tropical de geografía y regiones climáticas muy diversas que incluyen selvas tropicales, sabanas, estepas, desiertos y áreas montañosas, la ciudad de Medellín, Latitud: 6° 13' 1" Norte Longitud: 75° 34' 1" Oeste, se encuentra a 1.579 metros sobre el nivel del mar, su temperatura promedio es de 21.5 ºC, al medio día la temperatura máxima media oscila entre 26 y 28ºC, en la madrugada la temperatura mínima está entre 17 y 18ºC, la humedad relativa del aire oscila durante el año entre 63 y 73 %, siendo mayor en la época lluviosa del segundo semestre (IDEAM, 2018a) esta condición hace que sea posible tener espacios ventilados naturalmente de forma permanente. A su vez, Medellín con más de 2 millones de habitantes, se encuentra dentro del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), también tiene la centralidad urbana más grande del valle por sus características mixtas como económicas, comerciales e industriales. Estas actividades contienen altos flujos y gastos energéticos dentro de la ciudad, por lo que se generan islas de calor en los sitios más transitados y que a su vez concentran la mayoría de contaminación en la calidad del aire.

El valle está conformado por una cadena montañosa sobre la cordillera central que rodea toda la ciudad, a su vez este eje estructurante genera en su parte más baja el paso del río Medellín de sur a norte. La altura de las montañas alrededor de la ciudad hace que el aire contaminado no se disperse tan rápido, sino que se concentre dentro del valle, por lo que las características topográficas condicionan el entorno para las evaluaciones de calidad de aire.



Figura 1 – Sección urbana del Valle de Aburrá por Medellín. Fuente: AMVA 2019.



Figura 2 – Calidad del aire en el Valle de Aburra. Fuente: Londoño Valencia, James.

El material particulado (PM) es el contaminante atmosférico que plantea un mayor riesgo para la salud de los habitantes de Medellín y su área metropolitana, no solamente por su reconocida capacidad para generar enfermedades cardiorrespiratorias, sino también por su tendencia al ascenso y por las altas concentraciones que se alcanzan en un valle geográfico estrecho y poco ventilado (Bedoya & Martínez, 2009). El material particulado se clasifica de varias maneras, primarios: partículas relativamente grandes que llegan a la atmósfera en la misma cantidad que fueron emitidas y su emisión es directamente de fuentes, y secundarios: son partículas más pequeñas que en su mayoría se crean a partir de la unión de gases emitidos por fuentes, a su vez, dependiendo de como se forman se les puede clasificar como polvo, humo, cenizas

volantes, carbón negro, pulverización, niebla o aerosol y partículas líquidas, con respecto al tamaño de las partículas, se les llama partículas finas o PM2.5 a las partículas con un diámetro aerodinámico de hasta 2.5 micrómetros, mientras que se les dice partículas gruesas o PM10 a las partículas con un diámetro aerodinámico de 10 micrómetros (Velentza, 2016).

El PM10, se produce en gran medida mecánicamente por la ruptura de partículas sólidas más grandes. Así, en áreas urbanas, las partículas gruesas contienen típicamente polvo resuspendido de carreteras y actividades industriales, y material biológico como granos de polen y fragmentos bacterianos. Las partículas gruesas también suelen incluir los materiales de la corteza terrestre, como el polvo arrastrado por el viento de los procesos agrícolas, el suelo descubierto, los caminos sin pavimentar o las operaciones mineras. El tráfico produce polvo de la carretera y turbulencias de aire que pueden volver a arrastrar el polvo hacia la atmósfera. Cerca de las costas, la evaporación del rocío marino también puede producir partículas grandes. También se pueden formar partículas gruesas a partir de la liberación de materiales no combustibles en los procesos de combustión, es decir, cenizas volantes. Las partículas PM2.5, se forman en gran parte a partir de gases, pero los procesos de combustión también pueden generar partículas primarias en este rango de tamaño. Normalmente, estas partículas se originan como partículas ultrafinas producidas por nucleación-condensación de sustancias a baja presión de vapor formadas por vaporización a alta temperatura o por reacciones químicas en la atmósfera (World Health Organization, 2005).

La contaminación atmosférica es el principal riesgo ambiental para la salud en América, la Organización Mundial de la Salud estimó que una de cada nueve muertes en todo el mundo es el resultado de condiciones relacionadas con la contaminación atmosférica (World Health Organization, 2016). A nivel mundial, 7 millones de muertes se atribuyeron a los efectos conjuntos de la contaminación del aire del hogar y del aire ambiente exterior en 2012. Las regiones del Pacífico Occidental y el Sudeste Asiático soportan la mayor parte de la carga con 2.8 y 2.3 millones de muertes, respectivamente, casi 680.000 muertes ocurren en África, unas 400.000 en la región del Mediterráneo Oriental y 131.000 en las Américas de bajos ingresos. El restante de las muertes ocurren en países de altos ingresos de Europa (295.000), América (96.000), Pacífico Occidental (68.000) y Mediterráneo Oriental (14.000), a su vez de estos estudios en 2012, se recolectó que el 36% de las muertes fueron a causa de enfermedades isquémicas del corazón, el 33% a ataques cerebrovasculares, el 17% a enfermedades crónicas pulmonares, el 8% a enfermedades agudas en las vías respiratorias inferiores y el 6% a cáncer de pulmón (World Health Organization, 2014). Las razones por mortalidades de material particulado dependen entonces de enfermedades previas y su tiempo de exposición frente al contaminante, sin embargo, las principales consecuencias son las enfermedades respiratorias, enfermedades cardiovasculares, accidentes cerebrovasculares y cáncer de pulmón. El PM10 tiene consecuencias dañinas como, afectar el tracto respiratorio superior, irritación aguda de los ojos y las vías respiratorias, reducción de la capacidad pulmonar y agotamiento respiratorio y desarrollo de problemas respiratorios y cardiovasculares, mientras que el PM2.5 puede agravar el asma, se asocia al desarrollo de diabetes, bajo peso al nacer, influye en la disminución en el desarrollo cognitivo de los niños (IDEAM, 2018b).

Los niveles de contaminación de calidad del aire en Colombia, históricamente en lo que se refiere a material particulado ha estado por encima de las recomendaciones de la OMS. En el 2005 la Organización Mundial de la Salud, estableció una guía de la Calidad del Aire a nivel global para que cada gobierno establezca sus normativas correspondientes. La guía de Calidad del Aire (AQG) de la OMS, establece que para el material particulado anual de PM2.5 el máximo nivel de concentración es de 10µg/m3, y para el PM10 debe ser de 20µg/m3. No obstante, también se proponen unos objetivos intermedios, que en caso de que los gobiernos no cumplan con la guía, vayan escalando con sus normativas hasta cumplir con los estándares mencionados. El objetivo intermedio 1 (OI-1) establece para el PM2.5 anual una concentración máxima de 35µg/m3 y para el PM10 70µg/m3, el OI-2 establece para el PM2.5 anual una concentración máxima de 25µg/m3 y para el PM10 50µg/m3, y el OI-3 una concentración máxima anual de PM2.5 de 15µg/m3 y para PM10 de 30µg/m3. Cabe aclarar que en las mediciones del PM2.5 el material particulado exterior es por correlación igual de contaminante o menos que el PM10, sin embargo, en el interior de espacios, debido a que son más finas las partículas, el PM2.5 tiene más presencia en aspectos de la vida cotidiana como los gases emitidos en las cocinas o biomasas. Por otro lado, los valores de PM en diferentes rangos de exposición en las personas tienen respuestas distintas dependiendo del tiempo según estudios realizados por la OMS, entre menos se esté expuesto al PM menor es la probabilidad de causar daños respiratorios o cardiovasculares, por lo que en la AQG se proponen unas medidas estándares anuales y diarias.

Tabla 1 – Guía de calidad del aire y objetivos intermedios de PM anuales

Nivel Anual	PM10 $\mu g/m^3$	PM2.5 $\mu g/m^3$	Criterio del nivel
Objetivo intermedio 1 (OI-1)	70	35	Estos niveles están asociados con un riesgo de mortalidad a largo plazo alrededor de un 15% mayor que con el nivel de las AQG.
Objetivo intermedio 2 (OI-2)	50	25	Además de otros beneficios para la salud, estos niveles reducen el riesgo de mortalidad prematura en un 6% aproximadamente [2-11%] en comparación con el nivel del OI-1.
Objetivo intermedio 3 (OI-3)	30	15	Además de otros beneficios para la salud, estos niveles reducen el riesgo de mortalidad en un 6% [2-11%] aproximadamente en comparación con el nivel del OI-2.
Guía de Calidad del Aire (AQG)	20	10	Estos son los niveles más bajos con los cuales se ha demostrado con más del 95% de confianza, que la mortalidad total, cardiopulmonar y por cáncer de pulmón, aumente en respuesta a la exposición prolongada al MP2.5.

Fuente: Guía de la calidad del aire, WHO 2005

La preocupación por la calidad de aire, y mitigar la contaminación en Latinoamérica ha sido un objetivo histórico desde que se empezó a estudiar el tema, las recomendaciones van desde mejorar el monitoreo y la adopción de estándares de calidad del aire, la implementación de estrategia a nivel político, la regulación, la divulgación, los instrumentos, el establecimiento de organizaciones, la implementación de sistemas de supervisión (Green J. & Sánchez, 2013). De igual modo, recientemente son pocos los estudios realizados comparando simultáneamente la calidad de aire exterior e interior de un espacio. La mayoría de los estudios que se han realizado por separado, y aclarando el fin de las investigaciones particulares, en las que los interiores potencializan problemáticas y soluciones a menor o pronta escala, mientras que los estudios exteriores, con un propósito más urbano, de escala mayor y con posibles políticas reguladoras.

Acerca del PM2.5 al interior y exterior de los edificios, se estudió un modelo de análisis ubicado al interior de un edificio en China, en el que se respondieron varios interrogantes sobre de donde proviene la cantidad de concentración de PM2.5 al interior, el porcentaje que entra desde el exterior, y el modelo de análisis que se usó para evaluar los datos (Zheng et al., 2019). Igualmente, los niveles de PM10 y PM2.5 cuando aumentan al exterior también lo hacen al interior de los espacios de vivienda, además las concentraciones de PM10 al interior son menores, por lo que se recomienda a las personas mayores e infantes no durar mucho tiempo expuestos al aire libre, y también las concentraciones de PM2.5 al interior aumentan dependiendo de factores como la temporada de calor del año, los métodos de calefacción al interior y el tipo de ventana (Ścibor et al., 2019). Así también se encuentra un llamado a las políticas del gobierno para reducir el impacto de concentraciones PM2.5 al exterior e interior de viviendas rurales debido a los usos de distintos combustibles fósiles más que todo al interior en las cocinas (Mutahi et al., 2021).

Con respecto a las guías dadas en la AQG, el gobierno colombiano adopta el objetivo intermedio 2 (OI-2) en la resolución 2254 del 1 de noviembre del 2017 y proyecta el objetivo intermedio 3 (OI-3) para el año 2030. Esta resolución pretende mejorar a lo largo de los años e ir bajando en los objetivos hasta alcanzar el primer lineamiento guía, para ello la principal fuente de información será SISAIRE que permitirá el diseño, evaluación y ajuste de las políticas y estrategias nacionales y regionales de prevención y control de la calidad del aire.

Tabla 2 – Niveles máximos permisibles de contaminantes PM en el aire en Colombia

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu g/m^3$)	Tiempo de exposición
PM 10	50	Anual
	100	24 horas
PM 2.5	25	Anual
	50	24 horas

Fuente: Resolución 2254 del 2017

Con base en información tomada del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), en la Figura 3 se presenta el promedio anual de material particulado PM2.5 y PM10 para la ciudad de Medellín desde el año 2008 y con las líneas punteadas se marcan los niveles de concentración límite planteados para el OI-2 de 2017 y el OI-3 2030. Se puede observar que para los dos tamaños de PM durante todos los años graficados se superan los límites tanto de la resolución del 2017 como del 2030, a excepción del 2020 donde los niveles de PM10 se ubican por debajo de los límites de la Res. 2254 de 2017, pero aun así se ubica 13.3 µg/m3 por encima de la meta para el 2030. Esto pone en evidencia la creciente necesidad y pertinencia del desarrollo de investigaciones sobre calidad del aire en Medellín para acercarse al cumplimiento de los objetivos.

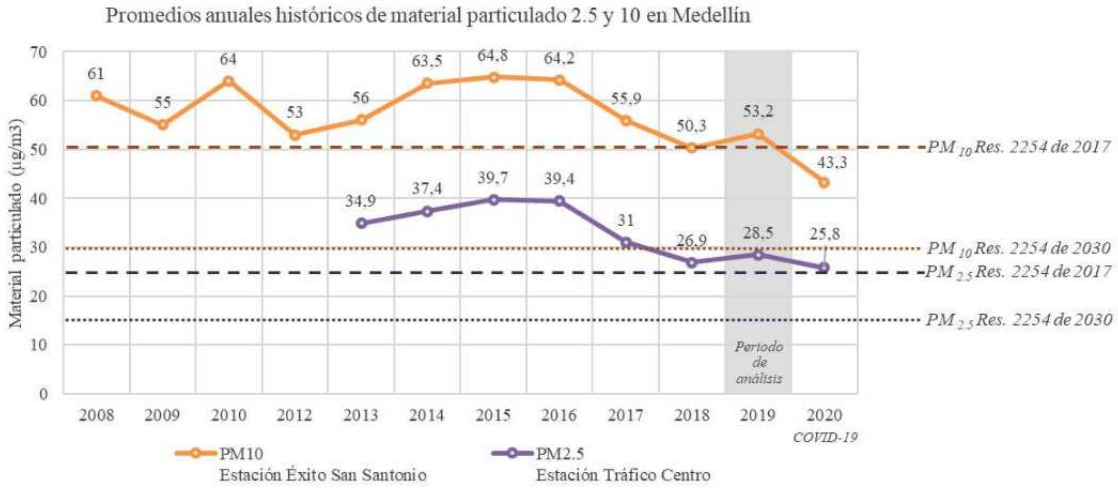

Figura 3 – Promedios históricos de PM en Medellín, en gris el año de análisis en el que se realiza la comparación de PM. Fuente: AMVA

Los niveles de contaminación más altos fueron registrados durante los años 2014, 2015 y 2016 y los niveles más bajos en el 2020, año en el que inició la pandemia del COVID-19 y se establecieron estrictas medidas de confinamiento y pausas obligatorias en el sector comercial que disminuyeron significativamente el tránsito vehicular en la ciudad y las emisiones generadas por la industria. Durante el año 2019 se tomaron las mediciones de calidad del aire que dieron origen a esta investigación, aquí cabe resaltar que este año no es representativo de la condición crítica presentada en el valle durante los últimos años y por tanto los resultados presentados no retratan con precisión la gravedad de la situación. En las figuras Figura 4 y Figura 5 se presentan los niveles de concentración de PM2.5 y PM10 para el año 2019 y se señala el periodo de tiempo en el que se realizaron las mediciones que serán analizadas más adelante.

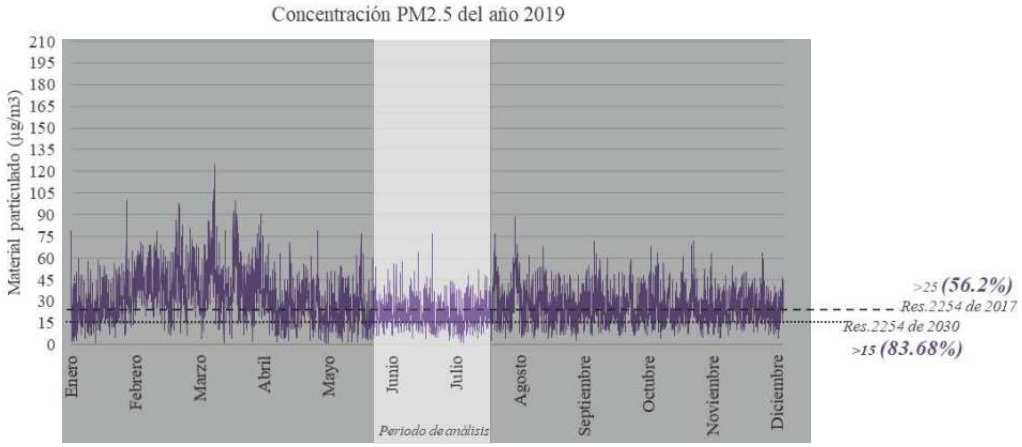

Figura 4 – Concentración anual de PM 2.5 para el 2019 Estación tráfico centro. Fuente: SIATA.

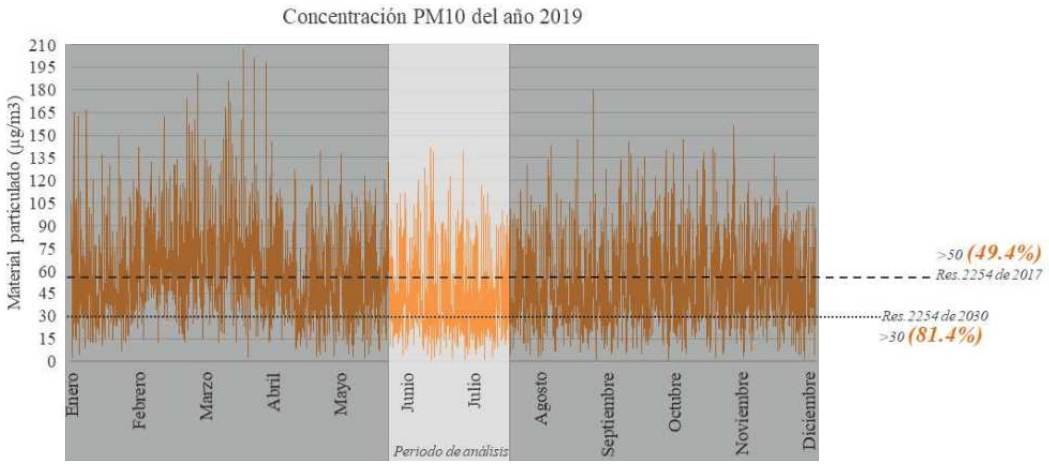

Figura 5 - Concentración anual de PM 10 para el año 2019 Estación Éxito de San Antonio. Fuente SIATA.

Como se evidencia en las anteriores figuras, en el periodo de análisis en el que se realizó este estudio de medición de calidad del aire, comprendido entre el 23 de mayo y el 12 de julio del 2019, se presentan unos niveles medios de concentración de los contaminantes. Cabe señalar que en los meses de febrero y marzo dichos niveles podrían incluso duplicarse. Por tanto, cabe recordar que los resultados de la investigación no representan la condición crítica del valle con respecto al mes ni al año de mayores concentraciones. Actualmente, tomando como referencia los límites planteados en la resolución 2254 de 2017, el 56.2% de los datos superan el límite para PM2.5 y el 49.4% para el PM10. Sin embargo, si se toma los límites proyectados para el año 2030, el 83.68% de los datos superan el límite para PM2.5 y el 81.4% para el PM10, remarcando la pertinencia y prioridad de realizar estudios entorno a la calidad del aire.

2. OBJETIVO

Conocer la relación entre la calidad del aire interior y exterior del edificio de oficinas de la Empresa de Desarrollo Urbano (EDU) ubicado en Medellín, Colombia.

3. MÉTODO

La presente investigación se desarrolló con base en una metodología cuantitativa, en la que se seleccionó un edificio como caso de estudio, se realizaron mediciones a través de sensores y finalmente los datos recolectados por dichos sensores fueron filtrados y procesados.

Se tomó como caso de estudio el edificio de oficinas de la Empresa de Desarrollo Urbano (EDU) que se encuentra localizado en el centro de Medellín, uno de los lugares con mayor tráfico vehicular y una de las centralidades de islas de calor más grandes del AMVA. El edificio propone una doble piel con un cerramiento de calados en concreto al exterior y una fachada vidriada al interior que permite el intercambio de aire, generando una ventilación cruzada y por lo cual ha sido llamado “el edificio que respira”.



Figura 6 – A la izquierda: Localización de las estaciones de monitoreo de calidad de aire exterior respecto al edificio EDU, editado del SIATA. A la derecha: Fotografía del edificio. Fuente: https://www.expoknews.com/edificios-que-respiran/

Para la obtención de los datos de calidad de aire exterior, se ubicaron dos (2) estaciones de monitoreo del SIATA cerca al edificio, la estación Tráfico centro para los datos de PM2.5, y la estación Éxito de San Antonio para los datos PM10, como se puede observar en la Figura 6.

Las mediciones de calidad del aire interior fueron tomadas a través de un sensor laser HK-A5 ubicado en el nivel 8 del edificio de la EDU, ubicado sobre una pared muy cerca del centro del edificio y a una altura de 2.20m con respecto al piso. Se registraron concentraciones de PM2.5 y PM10 cada 3 minutos durante 50 días ubicados entre el 23 de mayo y el 12 de julio del año 2019, obteniendo un total de 24.000 datos. Paralelamente, se ubicó junto a la fachada a 2.20m de altura con respecto al piso, un anemómetro referencia T-DCI-F300-1x3 y un termohigrómetro Data Logger HOBO-U12-012 con los que se registró temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento, que sirvieron como referencia y validación para registrar la operación de las ventanas. En la Figura 7 se presenta una fotografía del espacio donde se realizaron las mediciones y una planta del espacio donde se indica la distribución de los puestos de trabajo y la ubicación de los sensores.

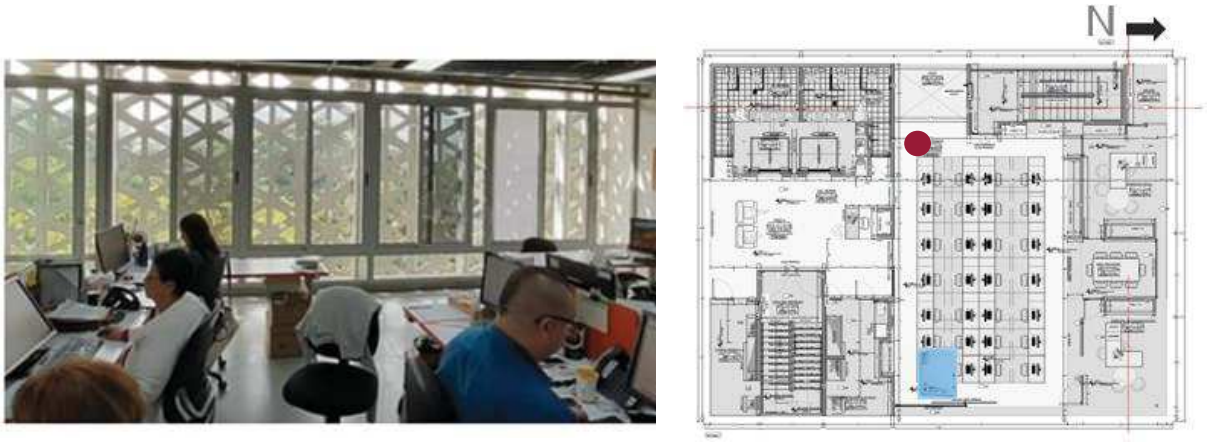

Figura 7 - Izquierda: Interior del espacio medido. Derecha: Planta nivel 8 del edificio de la EDU resaltando la ubicación de los equipos para la medición de calidad de aire (morado) y de velocidad del aire (azul). Fotografía, Grupo EMAT.

El edificio estudiado cuenta con un sistema de ventilación mixto. Es decir, que tiene aire acondicionado de respaldo, centralizado y también ventanas operables que permiten la ventilación natural y son operadas por los usuarios. Por ello no todos los datos de calidad del aire tomados correspondan a una relación directa entre el aire exterior e interior y por tanto se requiere realizar un filtro en el que se conserven únicamente los datos que corresponden a los momentos de ventilación natural. Para realizar esta filtración de los intervalos en que el edificio estaba operando con sus ventanas abiertas y con el equipo de aire acondicionado apagado, se utilizaron dos criterios: condiciones de estabilidad en la temperatura interior, como fácilmente se puede observar cuando un espacio es climatizado artificialmente, aprovechando que el equipo que registró la calidad del aire en el interior incluye mediciones de temperatura y humedad relativa.

Para la filtración también se utilizaron los registros de velocidad de ingreso del aire sobre el plano de las ventanas, medidos con un anemómetro referencia T-DCI-F300-1x3 de ONSET Corporation (ONSET, 2020), para compararlos con la velocidad del viento en el exterior del edificio en ese mismo instante, datos que fueron descargados de la estación meteorológica que se encuentra a 400m de distancia del edificio y codificada como SIATA 202 (SIATA, 2020). Cuando se detectaron velocidades de aire tanto afuera como adentro del espacio se trataba de una condición de ventana abierta. Esta segunda técnica de filtración tuvo en consideración que los umbrales de medida de ambos equipos son diferentes, por lo que se hicieron cortes de la base de datos a 0.1m/s para el interior (anemómetro de hilo caliente) y 0.5m/s para el exterior (anemómetro de aspas). Los datos resultantes de realizar el filtro de estas dos condiciones: temperatura y velocidad de aire, corresponden entonces a los momentos en los que la ventana estuvo abierta.

Chequeos cruzados entre los resultados de filtrar por temperatura o por velocidad de viento permitieron validar los momentos en que el sistema de Aire Acondicionado estuvo apagado y las ventanas permanecieron abiertas. Como resultado del proceso de filtración, de los 24.000 datos recolectados inicialmente, para efectos de esta investigación sólo fueron útiles 13.979 correspondiente al 58.24%. En el proceso de depuración de la base de datos se pudo observar que, por decisión y operación de los usuarios del espacio, el edificio en las horas de la mañana tiende a ventilarse naturalmente y en las horas de la tarde se

alternan los periodos de ventilación natural y aire acondicionado. Por este motivo hay un poco más de registros en el intervalo de la mañana.

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la medición, filtrado y procesamiento de los datos. Las siguientes dos figuras exponen la distribución en el día de las concentraciones de PM2.5 y PM10 al interior y al exterior. Con las líneas punteadas se indican los límites establecidos por la resolución 2254 de 2017 y 2030 con los respectivos porcentajes de datos que superan el límite en cada caso.

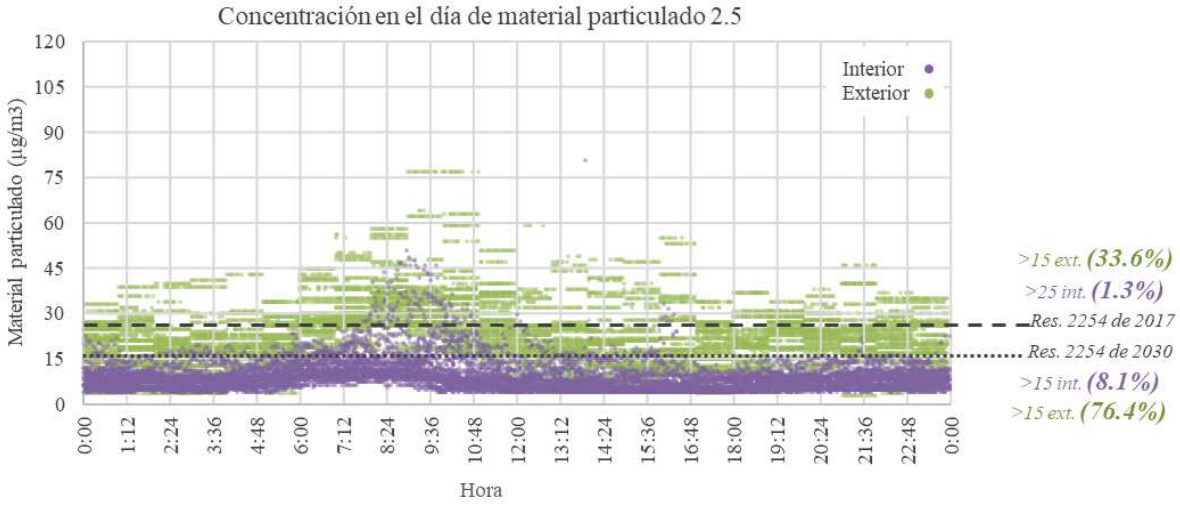

Figura 8 – Concentración diaria de PM2.5 indicando porcentajes que superar los límites propuestos por la Res. 2254 de 2017 y 2030. Elaboración propia.

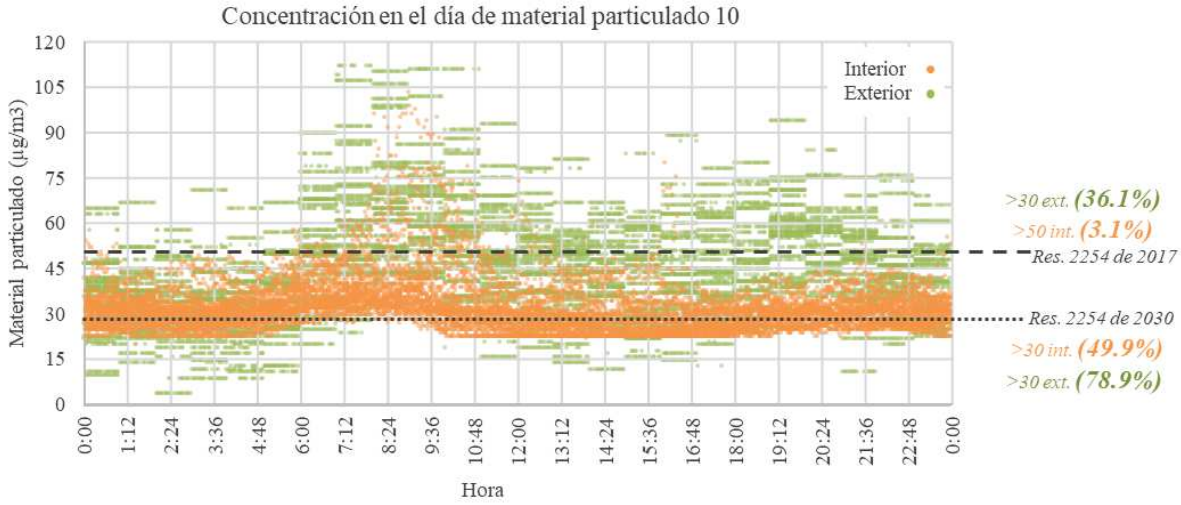

Figura 9 – Concentración diaria de PM10 indicando porcentajes que superar los límites propuestos por la Res. 2254 de 2017 y 2030. Elaboración propia

En las gráficas se evidencia que, durante las madrugadas, cuando el espacio permanece predominantemente cerrado antes del inicio laboral, la correspondiente ocupación del espacio y la apertura de ventanas, las concentraciones de material particulado al interior son semejantes o más bajas que las exteriores, mostrando la ausencia de ventilación nocturna del edificio. Durante el periodo de la mañana, cuando el espacio es predominantemente ventilado de forma natural, se alcanzan las concentraciones más altas de PM al interior con una concentración de 50,8 µg/m3 para el PM2.5 y de 106,3 µg/m3 para el PM10, ambos valores muy por encima de los límites establecidos para la salud humana. En el caso del PM2.5 los niveles presentados superan el límite planteado para el año 2017 en un 1.3% y para el año 2030 en un 8.1%. En el caso del PM 10 los niveles presentados superan el límite planteado para el año 2017 en un 3.1% y para el año 2030 en un 49.9%. Aquí se debe observar que para el periodo de la mañana entre las 6 y las 9 de la mañana casi el 100% de los datos superan el límite planteado para el año 2030.

Las horas de la tarde es el periodo de tiempo en el que se presentan mayores diferencias entre las concentraciones de PM interiores y exteriores, con diferencias hasta de 50 µg/m3 para el PM2.5 y de 75

µg/m3 para el PM10. Aquí se evidencia y tal como se corroboró en los registros de temperatura y humedad mencionados anteriormente, la interferencia del encendido y apagado intermitente del aire acondicionado, donde además de reducir la temperatura y humedad del ambiente se realiza un filtro, renovación y aislamiento con respecto al aire exterior.

Otro factor por considerar es que los límites establecidos como saludables bajo la normativa colombiana es laxa y permisible con respecto a los planteados en otros países. La siguiente tabla presenta el porcentaje de los datos analizados que superan los límites propuestos por diferentes normativas para cada uno de los tamaños de material particulado.

.

Tabla 3 - Puesta en paralelo niveles de exigencia de calidad de aire en diferentes regiones del mundo

País	Límite PM2.5	Superior al límite	Límite PM10	Superior al límite
Colombia 2017	25	**1.3%**	50	**3.1%**
Colombia 2030	15	**8.1%**	30	**49.9%**
Bolivia	10	**26.1%**	20	**99.9%**
Unión Europea	24	**1.5%**	40	**11.7%**
China	15	**8.1%**	40	**11.7%**
Australia	8	**51.4%**	20	**99.9%**
India	40	**0.2%**	70	**0.69%**

Fuente: (Green J. & Sánchez, 2013), (UNEP, 2019), (Ministerio para la Trasmisión ecológica, 2018), (GB 3095, 2012).

Finalmente, la siguiente figura presenta la relación entre las concentraciones interiores y exteriores de todos los datos analizados, para el PM2.5, el 2.3% de los instantes analizados se presentaron concentraciones mayores al interior que al exterior y para el PM10, el 16.8% de los instantes analizados se presentaron concentraciones mayores al interior que al exterior. Cabe recordar que la mitad del tiempo de ocupación del espacio se combinó la ventilación natural y la ventilación mecánica y por tanto se podría esperar que en un edificio de características simulares operado totalmente bajo ventilación natural estos porcentajes incrementarían.

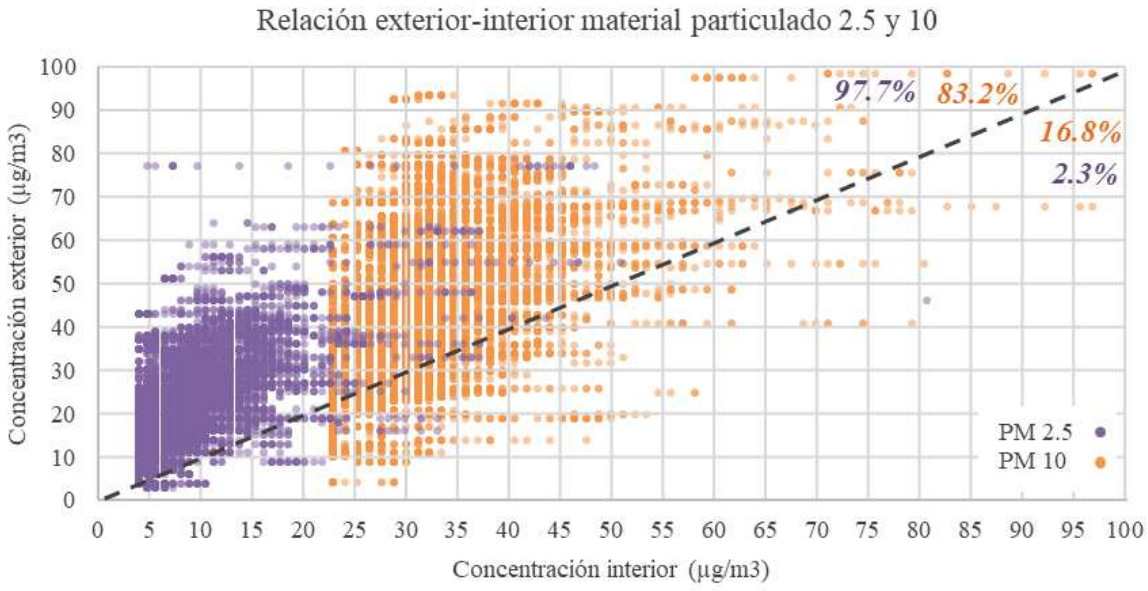

Figura 10 – Relación exterior-interior de PM. Elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

Es de suma importancia popularizar la implementación de mediciones de calidad del aire interior en las edificaciones, con el objetivo de mejorar los procesos de tomas de decisiones durante las etapas de diseño en las que se definen aspectos como, si la edificación será ventilada de forma natural, artificial o mixta o como serán las fachadas especificadas, lo anterior incorporando la calidad del aire del entorno donde se ubicará el edificio como un factor esencial. Además, que conocer los niveles de concentración de material particulado

en el aire podría permitir proponer una operación de las ventas a través de sensores, que se cierren cuando y se acuda a un sistema mecánico cuando las concentraciones sean más altas al interior que al exterior.

Para las edificaciones de uso diurno, como es el caso de un edificio de oficinas, la ventilación nocturna podría ser una estrategia pasiva muy efectiva para iniciar el horario laboral con concentraciones de material particulado más bajas al interior.

Se plantea un foco de prioridad en el material particulado PM10, puesto que presenta mayores concentraciones al interior, supera en mayor medida los limites planteados por la normativa colombiana actual, la doble piel de la fachada arquitectónicas demostró menor capacidad de filtrarlo y tiene las consecuencias más adversas sobre la salud humana.

Para futuras investigaciones y con el objetivo de mejorar la calidad de los datos, se propone seleccionar edificaciones que operen permanentemente con ventilación natural o proponer un método para identificar en que periodos de tiempo específicos se está haciendo uso de sistemas mecánicos o no. Tener registros de mediciones durante periodos continuos de tiempo permitiría definir límites según el tiempo de exposición a los contenientes como se plantea en la normativa, teniendo como periodo de tiempo ideal un año de medición.

La disminución significativa de las concentraciones de material particulado en el aire a razón de las restricciones puestas al tránsito vehicular y funcionamiento del sector industrial a causa de la pandemia del COVID-19, da in indicio claro de las acciones y las medidas que requieres ser tomadas en el AMVA para lograr los objetivos planteados.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Bedoya, J., & Martínez, E. (2009). Calidad del aire en el valle de aburrá Antioquia-Colombia. ***DYNA (Colombia)***, *76*(158), 7–15.

Green J., & Sánchez, S. (2013). La Calidad del Aire en América Latina: Una Visión Panorámica. **In The Clean Air Institute (Ed.)**, *CleanAirInstitute*.https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/contaminacion_atmosferica/La_Calidad_del_Aire_en_América_Latina.pdf

IDEAM. (2018a). Carácterísticas Climatológicas De Ciudades Principales Y Municipios Turísticos. ***Instituto de Hidrología, MeteorologíayEstudiosAmbientales*,**48.http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Características+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Turísticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc

IDEAM. (2018b). ***Informe del estado de la Calidad del Aire en Colombia 2018***. http://www.uasf.edu.pe/includes/archivos_pre/20112/1035_370101_20112_SEPARATA_Calidad_de_Aire.doc

Ministerio para la Trasmisión ecológica. (2018). AIRE EN ESPAÑA 2018. ***Clean Air*,** 208. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/informeevaluacioncalidadaireespana2018_tcm30-498764.pdf

Mutahi, A. W., Borgese, L., Marchesi, C., Gatari, M. J., & Depero, L. E. (2021). Indoor and Outdoor Air Quality for Sustainable Life : A Case Study of Rural and Urban Settlements in Poor Neighbourhoods in Kenya. ***Sustainability***, *13*, 1–18. https://www.mdpi.com/journal/sustainability

Ścibor, M., Balcerzak, B., Galbarczyk, A., Targosz, N., & Jasienska, G. (2019). Are we safe inside ? Indoor air quality in relation to outdoor concentration of PM 10 and PM 2 . 5 and to characteristics of homes. ***Sustainable Cities and Society***, *48*(April 2018), 12. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101537

UNEP. (2019). Summary: Air Pollution in Asia and the Pacific: Science-based Solutions identifies. In ***United Nations Environment Programme (UNEP)***.

Velentza, O. (2016). Particular matters : a threat for human health. ***ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΧΡΟΝΙΚΑ***, 233–245.

World Health Organization. (2005). ***Air Quality Guidelines*.** Druckpartner Moser.

World Health Organization. (2014). Burden of disease from the joint effects of Household and Ambient Air Pollution for 2012. ***WorldHealthOrganization*,***35*(February),7-9. http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/FINAL_HAP_AAP_BoD_24March2014.pdf

World Health Organization. (2016). Preventing disease through healthy environments: A global assessment of the environmental burden of disease. In ***Toxicology Letters*** **(Vol. 259**). World Health Organization. https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2016.07.028

Zheng, H., Xiong, K., Fan, P., & Zhong, Z. (2019). Data Analysis on Outdoor – Indoor Air Quality Variation : Buildings ' Producing Dynamic. ***IEEE Systems Journal*,** *PP*, 1–12. https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2910594

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Empresa de Desarrollo Urbano EDU y el equipo de trabajo de SIATA por facilitar la instalación de los equipos de medida que hicieron posible recopilar los datos de calidad del aire necesarios para realizar esta investigación.