ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA VENTILACIÓN NATURAL EN UN EDIFICIO DE OFICINAS

María Alejandra Orozco Sosa (1); Jorge Hernán Salazar Trujillo (2)
(1) Estudiante de Arquitectura, email: morozcoso@unal.edu.co, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Arquitectura, Calle 59 A N 63-20 Edificio 24. Medellín, Colombia.
(2) 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
En el centro de la ciudad de Medellín se ubica el edificio de la Empresa de Desarrollo Urbano (EDU) en el que se realizan labores de oficina y que fue diseñado para ventilarse naturalmente a través del efecto de termosifón. Aunque el edificio ya se encuentra ocupado, la chimenea solar que complementa el sistema aún no ha sido concluida, por lo que actualmente la ventilación ingresa al edificio únicamente por sus ventanas. Para construir una Línea Base que permitirá realizar comparativos una vez la chimenea solar entre en funcionamiento, se instalaron anemómetros y se emplearon registros de una estación meteorológica cercana. La clasificación de los registros en rangos permitieron identificar tres fechas representativas para evaluar la ventilación actual del edificio ante condiciones de viento bajas, medias y altas. Para cada una de estas tres condiciones se hicieron cálculos de caudales y renovaciones de aire en dos de las plantas del edificio, lo que permitió comparar la eficiencia con que ambas plantas se ventilan. Se comprobó que el edificio efectivamente cumple con los parámetros mínimos de ventilación en oficinas durante una significativa parte del día y se identificaron los periodos en que la ventilación fue insuficiente, óptima o excesiva desde el punto de vista normativo y con una base anual.

Palabras clave: ventilación natural, ventanas, anemómetros, renovación de aire.

ABSTRACT
The building of the Urban Development Company (EDU) is located in Medellín city. The office activities carried out there were designed to ventilate naturally by thermosiphon effect. Although the building is already occupied, the solar chimney needed to complete the system is not concluded yet and currently the ventilation enters the building only through its windows. In order to have a necessary baseline to carry out comparisons once the solar chimney starts operating, anemometers were installed and records from a nearby meteorological station were used. Classification of the records allowed the identification of three representative dates to evaluate the current ventilation of the building under low, medium and high wind conditions. For each of these three conditions, air flow and renewal calculations were made in two of the building's floors, which allowed comparing the efficiency with which both floors are ventilated. It was found that the building actually meets the minimum ventilation parameters in offices during a significant part of the day. The periods in which ventilation was insufficient, optimal or excessive from a regulatory point of view and were identified in an anual basis.

Keywords: natural ventilation, windows, anemometer, air changes.

1. INTRODUCCIÓN
La medición de la ventilación natural es un campo escasamente transitado en el área de la arquitectura bioclimática. Los equipos que se requieren para medir la velocidad del aire en el rango característico de los espacios interiores -anemómetros de hilo caliente- son costosos y requieren un esfuerzo logístico extra con comparación con las mediciones de temperatura, humedad relativa o consumo energético. Posiblemente la complejidad de estudiar un fenómeno ambiental que posee una enorme variabilidad también puede ayudar a explicar su tardía inclusión en la literatura especializada. Ninguno de los libros clásicos de arquitectura bioclimática, incluyen directrices o recomiendan protocolos de medición cuando interesa hacer una

aproximación experimental para los fenómenos de la ventilación natural en edificaciones. Es notorio que incluso libros más modernos y específicamente dedicados al estudio de la ventilación natural de edificaciones BITTENCOURT y CANDIDO (2015), FUENTES y RODRIGUEZ (2004) (TOLEDO, 1999) (YARKE, 2005) también se mantengan en el territorio de las "buenas prácticas arquitectónicas", incluyendo directrices generales acerca de cómo ventilar mejor, pero sin aportes metodológicos para quien necesita una aproximación experimental. Algo similar ocurre incluso con las investigaciones que desarrollan su contenido empleando túneles de viento y modelos reducidos: se presentan los resultados, pero no se exponen los procedimientos necesarios para obtenerlos.

La reciente popularización de los medios computacionales para el estudio de la ventilación en edificaciones, Computational Fluid Dynamics (CFD) evitan las molestias propias del trabajo de campo y han hecho posible que muchas investigaciones acerca de la ventilación natural se hagan de una manera más cómoda, incluso cuando se estudian edificaciones ya construidas y ocupadas (DAEMEI et al. 2018). Una búsqueda realizada en noviembre 2020 en el "International Journal of Ventilation" (Print ISSN: 1473-3315 Online ISSN: 2044-4044) con un periodo de búsqueda entre el año 2010 al 2020 arrojó 266 y 433 artículos sobre los temas "CFD" y "Simulation", respectivamente, mientras que la búsqueda de artículos vinculados al término "air speed" en esta misma revista y periodo apenas arrojó 2 artículos. Claramente los estudios de ventilación natural de edificaciones realizados a partir de mediciones son notablemente mucho menos frecuentes que los realizados empleando simulaciones computacionales.

Ni antes ni ahora parece haber un marcado interés en medir la ventilación de los espacios arquitectónicos, a pesar de la enorme importancia que tiene el tema para la salud y la comodidad de las personas. Algo bien diferente sucede en el campo de la iluminación natural, donde luxómetros, luminancímetros y piranómetros han enriquecido los criterios para valorar la calidad lumínica de los espacios para tomar decisiones de diseño informadas. Hoy los análisis computacionales permiten construir bases de datos con qué calcular métricas dinámicas de desempeño lumínico. Useful daylight illuminance (UDI), Annual Sun Exposure (ASE), Daylight autonomy (DA), entre otros, son herramientas habituales en los estudios de iluminación natural para edificaciones MARDALJEVIC y HESCHONG (2009). El Climate-Based Daylight Modelling (CBDM) es un área de investigación particularmente activa pero en contraprestación, el término "Climate-Based Ventilation Modelling" (CBVM) aún no registra una sola entrada en las bases de datos de Mendeley o Scopus. Una búsqueda abierta en Google y Scholar Google en noviembre de 2020 tampoco arrojó un solo resultado; sencillamente el término aún no ha sido acuñado.

La demanda computacional que requiere un análisis de la ventilación natural realizado con CFD es altísima y por eso las predicciones de desempeño de la ventilación natural con base anual aún son cosa del futuro. Cruzar datos meteorológicos con los resultados de miles de simulaciones de ventilación natural es una tarea inabordable con los recursos de que dispone, a la fecha, un taller de arquitectura o un equipo de expertos en asesoramiento bioclimático. Por esta razón los estudios de ventilación natural todavía se realizan a partir de velocidades medias y otra serie de simplificaciones similares donde se usan datos estáticos para producir resultados instantáneos, los cuales se consideran representativos de un comportamiento diario o anual.

A pesar de que este análisis de la ventilación natural a partir de datos climáticos generales todavía es lo habitual, la consideración de los Factores Humanos está haciendo necesario análisis con mayor resolución y detalle (GARCIA et al. 2018) (EMAT, 2020). La mejor referencia encontrada que aporta una aproximación metodológica para el estudio anual de la ventilación en la arquitectura es el proyecto CLIMA+ (ARSANO, 2017), método propuesto para predecir el potencial de ventilación natural a partir de archivos climáticos y simulaciones genéricas. Sin embargo, por su escala macro el proyecto no considera las complejidades asociadas a la forma del volumen a ventilar, las características de su fachada o el contexto del emplazamiento. Para edificaciones no climatizadas ubicadas en la franja ecuatorial es muy necesario contar con una evaluación realista de su ventilación natural. Conocer la efectividad con que una edificación se ventila naturalmente, según cambie la dirección y velocidad del viento a lo largo del día en las diferentes temporadas del año, sólo parece posible a partir de una medición anual continuada, lo cual rara vez es viable.

Esta investigación estuvo orientada a determinar los momentos de la jornada laboral en que la ventilación natural en un edificio de oficinas resulta insuficiente, óptima o excesiva sin necesidad de recurrir a una aproximación exclusivamente experimental, dado que en nuestro caso medir un año continuo implicaba una importante molestia a los empleados y un notorio esfuerzo logístico. Esto hizo necesario desarrollar una alternativa menos costosa para determinar el desempeño actual de la ventilación del edificio usando los registros de velocidad de ingreso de aire medidos durante unos pocos meses para luego cruzar esta información con las bases de datos de la red meteorológica local (SIATA, 2020). A pesar de la

generalizada tendencia a simular y predecir los desempeños de aquello que se diseña, no fue posible encontrar referentes metodológicos ni referencias bibliográficas para combinar mediciones de velocidad de ingreso de aire en edificaciones ocupadas con registros climáticos obtenidos en las estaciones meteorológicas cercanas.

2. OBJETIVO

Analizar el desempeño de la ventilación natural del edificio de oficinas de la Empresa de Desarrollo Urbano (EDU) ubicado en Medellín, Colombia, con el propósito de determinar si el edificio efectivamente se ventila dentro de los rangos establecidos por la normatividad nacional. Se trata de una edificación ya construida, lo que permitió medir y comparar la ventilación en dos de sus plantas y además, estimar el desempeño anual de la edificación a partir de un cruce de datos entre la red meteorológica local y las mediciones de velocidad de ingreso de aire por sus ventanas.

3. METODO

La ciudad de Medellín está localizada en un profundo valle interandino (Latitud: 6.217, Longitud: -75.567, Latitud: 6° 13' 1" Norte, Longitud: 75° 34' 1" Oeste) con una altitud de 1.580 msnm. Las montañas que rodean la ciudad superan en más de 1000m el nivel del fondo del valle y en consecuencia, el viento es muy suave, el 23% del tiempo menor a 1.5m/s y muy variable (entre 0.5m/s y 3.5m/según la hora del día) (IDEAM, 2017). No obstante, las particulares condiciones climáticas del Trópico Andino hacen posible que, a pesar de tan escaso viento, buena parte de las edificaciones en la ciudad no requieran climatización artificial durante muchas horas del día. La temperatura media de la ciudad es 22.1°C (IDEAM, 2020) y por ello, la mayor parte de los edificios en la ciudad carecen de aire acondicionado manteniendo unas condiciones térmicamente agradables durante muchas horas al día.

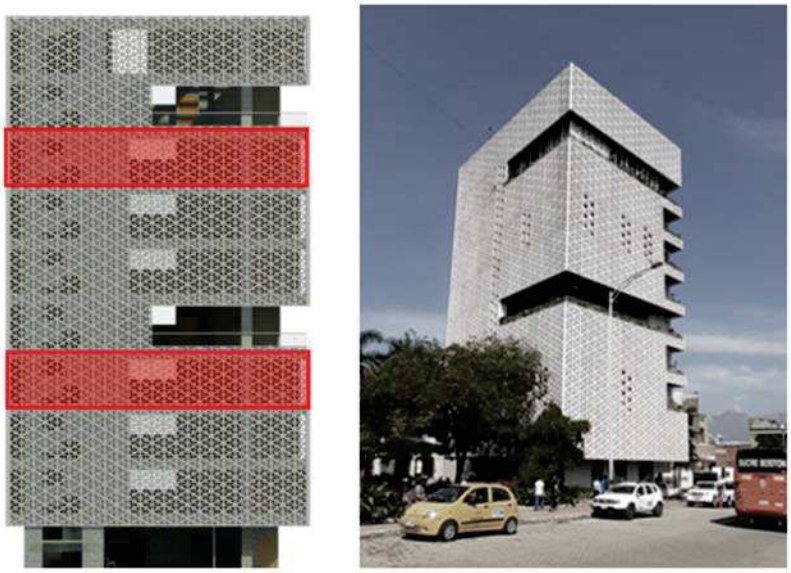

Figura 1 - Sede de la Empresa de Desarrollo Urbano (EDU), edificio de doble piel diseñado por la propia institución. Se resaltan las plantas del cuarto y octavo piso donde se midió la velocidad de ingreso del aire.

El edificio sede de la Empresa de Desarrollo Urbano (EDU) está localizado en el centro de la ciudad de Medellín y fue diseñado bajo el concepto del "edificio que respira", con una asesoría donada por expertos de la Facultad de Diseño GSD de la Universidad de Harvard, entre ellos el ingeniero Salmaan Craig. El edificio alberga una amplia diversidad de actividades: en su interior hay archivos, gerencias, salas de reunión, talleres de diseño y taquillas de atención al público. Por este motivo la configuración de sus plantas es diversa y difícilmente comparables entre sí, con excepción de las plantas 4 y 8, que tienen idéntica distribución y una ocupación similar, Figura 1. La fachada del edificio es singular: una piel interior con ventanas corredizas convencionales pero recubiertas con una segunda piel construida con prefabricados en GRC (Glass Reinforced Concrete) de color blanco y un patrón de geometría triangular muy tupido.

Actualmente en el edificio no se emplean estrategias de enfriamiento nocturno ni se aprovecha el beneficio que puede aportar su masa térmica, las cuales fueron dos de sus premisas de diseño. El edificio fue diseñado para la mayor parte de sus espacios se ventilaran a través de sus ventanas, pero con el apoyo de una

chimenea solar, hace casi tres años que el edificio está ocupado y en normal funcionamiento, pero la chimenea solar aún no ha entrado en operación. Durante este tiempo la ventilación ha dependido mayoritariamente de sus ventanas, pero cuando la chimenea solar entre en funcionamiento, será necesario ejecutar además los dispositivos de fachada que hacen posible la ventilación natural del edificio sin riesgo de que la lluvia ingrese. A la fecha, la práctica actual es que las ventanas se abran al inicio de la jornada laboral y se cierren al final de la jornada, permaneciendo cerradas durante toda la noche, Figura 2.

La presencia de una fachada de doble piel aumenta las incertezas para estimar la ventilación natural de una edificación. Como el edificio está construido y ocupado, se aprovechó la oportunidad para instalar anemómetros en sus ventanas y medir la efectividad real con la que se están ventilando los pisos 4 y 8. Los datos fueron empleados para construir una Línea Base para realizar comparativos de ventilación una vez la chimenea solar entre en funcionamiento, momento en que se comenzará a explotar todo el potencial de ventilación natural que posee la edificación.

En la ventana oriental de las plantas 4 y 8 se instalaron anemómetros referencia T-DCI-F300-1x3 producidos por ONSET Corporation y para el almacenamiento de los datos se emplearon Data Logger HOBO-U12-012 (ONSET, 2020). La sensibilidad de este equipo es muy alta y permite medir ráfagas a partir de 0.15m/s con un nivel de precisión de ± 1%. Los equipos se instalaron a 2.20m de altura con respecto al piso, teniendo precaución de alinear el medidor con la dirección perpendicular al plano de la fachada, Figura 3. La altura de la instalación obedece a los resultados de mediciones preliminares, en las que se pudo notar que por la sensibilidad del equipo una instalación a una menor altura generaba mediciones erróneas por cuenta del movimiento de las personas al pasar junto a las ventanas. Se realizaron mediciones continuas durante cuatro meses, con registros cada 3 minutos, lo que representa 20 datos/hora o 480 datos/día por punto. En la etapa de procesamiento estos registros se promediaron por bloques para reducir la frecuencia a 4 datos/hora y aminorar la elevada oscilación características de este tipo de mediciones, similarmente a como se procesan los datos de velocidad de viento en las estaciones meteorológicas.



Figura 2 - Fachada interior con ventanas corredizas de operación manual y una segunda piel de paneles prefabricados de GRC (Glass Reinforced Concrete) blanco y un patrón triangular homogéneo para todas las orientaciones.



Figura 3- Planta del octavo piso. Se resalta la ubicación del anemómetro sobre la fachada oriental.

Para evitar la intrusión de fauna y prevenir una inundación ante una eventual tormenta nocturna durante las noches y los fines de semana las ventanas permanecieron cerradas. Al inicio de cada jornada laboral, de lunes a viernes en el horario entre las 7:00 y las 19:00 horas, las ventanas corredizas de los pisos 4 y 8 se abrieron de nuevo para obtener un área de ventilación de 0.92m² por planta durante el resto del día. La colaboración del personal que labora en el edificio hizo posible esta simplificación logística, para no tener que registrar minuto a minuto el área de apertura de las ventanas. Es de resaltar que las posibilidades de ventilación del edificio son mayores, dado que cada planta dispone de 3m² en vanos cuando las ventanas se abren por completo, pero la apertura se restringió a un 13% para no tener que cerrar y volver a abrir ventanas cada vez que hubiera lluvia. Además, la experiencia de uso indicaba que con las ventanas completamente abiertas eran frecuentes las molestias con la papelería por un exceso de velocidad de aire. Por esta razón hay que recordar que cuando se registraron condiciones de ventilación natural por debajo del umbral deseable, todavía se disponía de un 87% de área de ventilación no aprovechada.

La ciudad de Medellín presenta una variabilidad climática notoria: en un mismo día puede llover y nuevamente brillar el sol muchas veces y en consecuencia, los patrones de ventilación tampoco son muy estables. Por este motivo se descartó el procesamiento de los datos empleando promedios, dado que en Medellín no es muy representativo hablar de un "día típico". Un análisis de la dispersión de los datos de velocidad de viento exterior ratificó la inconveniencia de promediar los registros de velocidad de viento para construir un "día típico de viento" como el que publica el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en el Atlas de Viento de Colombia [op cit]. La contrapropuesta metodológica fue calcular la velocidad media diaria del viento exterior en el horario laboral (7:00 a 19:00) para seguidamente procesar los resultados y seleccionar tres días típicos (P25, P50 y P75) en vez de sólo uno. Figura 4. Este procedimiento de clasificación y análisis de datos permite afirmar que una cuarta parte del mes (aproximadamente una semana) las condiciones de ventilación fueron iguales o mayores a la que se presentó el día de ventilación alta. Simétricamente, también se puede afirmar que hubo otra cuarta parte del mes con unas condiciones de ventilación menores o iguales a la que se presentó el día de ventilación baja.

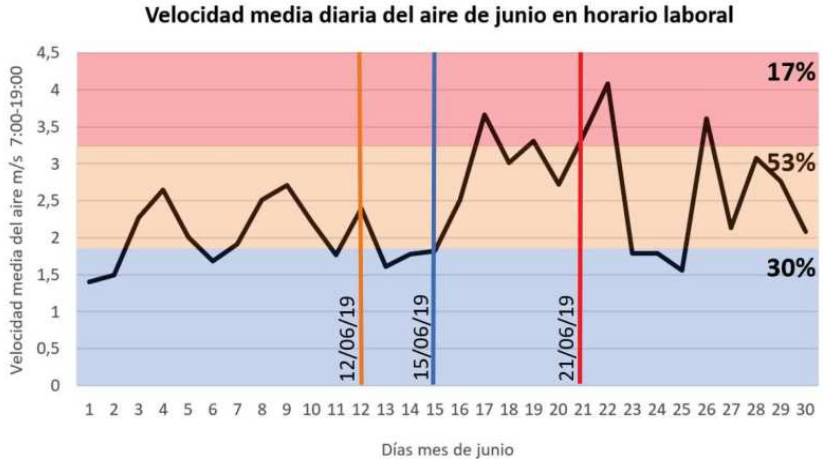

Figura 4 - Velocidad media diaria del viento durante el mes de junio 2019 en el horario laboral (7:00 a 19:00). Se señalan los tres días representativos de las condiciones de ventilación del mes: alta, media y baja correspondientes a los percentiles 25, 50 y 75. Los códigos de color se corresponden con los de las figuras 5 y 8.

Para evaluar la velocidad de aire exterior se usaron los registros de la estación meteorológica código 202 del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA) ubicada en Latitud: 6.24215, Longitud: -75.5743, ubicada a 400m de distancia del edificio. Antes de procesar estos registros de la estación meteorológica se recortaron las series entre las 7:00 y las 19:00 horas y se descartaron los días que tuvieran series discontinuas tanto en los registros de la estación meteorológica, como en los datos medidos en las planta 4 y 8. Los resultados del proceso de filtración y ordenación de los datos de velocidad de viento exterior para junio de 2019 se orientaron a identificar tres fechas representativas para realizar el análisis y comparaciones entre las plantas 4 y 8. Las condiciones de ventilación alta se presentaron el día 21/06/2019, las de ventilación media el 12/06/2019 y las de ventilación baja el 15/06/2019. Identificadas estas tres fechas se procedió a seleccionar los registros de velocidad de ingreso del aire por las ventanas del edificio para estas mismas fechas, los cuales fueron procesados de forma horaria.

Las comparaciones de ventilación natural en unidades de velocidad (m/s) no son muy ilustrativas porque una velocidad de ingreso del aire puede representar una ventilación abundante o escasa, según el volumen del espacio ventilado y el tiempo durante el cual dicha velocidad se mantuvo. Por este motivo cada registro de velocidad de ingreso del aire (v) se multiplicó por el tiempo en minutos entre registros y el área de la apertura (a), transformando así la velocidad del aire en caudales (Q) mediante un modelo básico de ventilación natural (1).

$$Q = va \qquad (1)$$

Las dimensiones de los dos espacios evaluados son 8.2m 12.5m y una altura libre de 3.0m, para un volumen de ventilación de 314.5m3, cifra que corresponde a una renovación de aire por hora. Esta constante fue empleada para transformar los caudales instantáneos (m3/min) en renovaciones horarias y comparar los niveles de ventilación de las dos plantas del edificio, hora a hora, ante las condiciones de ventilación para los tres días de análisis empleando diagramas tipo "box plot", visualizando así la evolución horaria de la ventilación natural de cada una de las plantas analizadas.

La técnica de análisis por percentiles y los diagramas de cajas y bigotes aportaron importantes elementos de análisis y facilitaron muchas comparaciones acerca de la manera como se ventila un espacio, pero no respondió por completo la pregunta acerca de la planta que mejor se ventila. Como cualquier otra comparación, responder esta pregunta obliga a establecer primero un umbral que permita clasificar los registros en niveles de ventilación "suficiente" e "insuficiente". La normativa nacional (REPÚBLICA DE COLOMBIA, 1979) (ICONTEC, 2003) determina que para los espacios de oficina en Colombia se deben asegurar como mínimo 8 renovaciones de aire por hora. Es necesario resaltar que se trata de una cifra relacionada con calidad del aire, no confort y apropiada para el diseño de sistemas de aire acondicionado, no de edificaciones ventiladas naturalmente. De hecho, 8 renovaciones por hora casi siempre resultan insuficientes para asegurar condiciones de bienestar térmico en Medellín. Al parecer, es también un nivel de ventilación muy bajo para las condiciones de ventilación que se estiman deseables ante la actual situación de pandemia, pero todavía falta mucha evidencia médica para determinar el número de renovaciones de aire por hora que harían un recinto seguro desde el punto de vista epidemiológico. Para no especular acerca del tema y sólo a manera de referencia comparativa, en todos los diagramas y análisis se resaltaron los resultados que superan este umbral normativo de 8 renovaciones/hora.

Usando el umbral de 8 renovaciones/hora se computó el tiempo diario en que la renovación del aire fue lo suficientemente elevada como para superar el nivel mínimo establecido en la norma. Los resultados de estas sumatorias sí fueron suficientes para comparar la eficiencia de ventilación de diferentes espacios con respecto a un espacio que durante la totalidad del tiempo de uso supera las condiciones de renovación de aire de referencia. Es preciso resaltar que el procedimiento descrito permite obtener resultados útiles para comparar los niveles de ventilación diaria, pero dificulta hacer análisis de simultaneidad dado que la información está demasiado consolidada, lo que enmascara situaciones instantáneas que podrían enriquecer el análisis. Con este propósito se elaboraron también diagramas de dispersión que hicieron posible comparar las renovaciones instantáneas entre los pisos 4 y 8. Con este tipo de diagramas fue posible comparar la frecuencia con que un piso se ventila mejor que el otro. Los valores porcentuales de sus cuadrantes aportan información que complementa los análisis de ventilación horaria realizados a partir de diagramas tipo "box plot".

4. RESULTADOS

La evolución horaria de la ventilación natural durante los tres días de referencia para los pisos 4 y 8 del Edificio de la EDU permitió verificar que durante las primeras horas del día (y sin importar lo muy ventilado que vaya a ser el resto del día), ambos espacios de oficina se ventilan muy poco. Esto se corresponde con la experiencia del lugar: rara vez hay viento en Medellín antes de las 10:00am, cosa que los registros ratifican. Es importante resaltar que durante esta franja horaria los beneficios potenciales de la chimenea solar son máximos, dado que el tiro natural que ofrecerá esta solución arquitectónica permitiría compensar la ausencia de viento matutina que caracteriza la ciudad. Figura 5.

Las diferencias relativas, hora a hora, entre las dos plantas evaluadas son notorias y es posible observar cómo el piso 4 está sometido a unas ráfagas de aire más pronunciadas que en el piso 8. Es muy posible que esto tenga relación con la altura de los techos de las edificaciones vecinas, condición que el piso 8 no tiene porque supera la altura media de las edificaciones del resto del sector, pero serían necesarias mediciones en otros puntos y alturas para enriquecer esta observación.

Los diagramas horarios en los que se comparan los niveles de renovación de aire obtenidos para los pisos 4 y 8 del edificio de la EDU permitieron demostrar que en una franja significativa de la jornada laboral se presentaron condiciones de ventilación natural por encima de la norma, pero hay una simplificación implícita en el modelo numérico empleado y que es pertinente resaltar aquí. Cuando se hicieron los cálculos de renovación de aire y se dividió el caudal de ingreso por el volumen de cada planta, se asumió que el aire que ingresa a cada oficina se distribuye homogéneamente por el piso, lo cual es falso. En realidad los puestos de trabajo ubicados más cerca de las fachadas disfrutan de unas condiciones de renovación de aire por encima de lo aquí expresado, a la vez que los lugares alejados de las ventanas experimentaron unas condiciones de renovación de aire menores. Significa esto que si bien la metodología permite efectivamente cuantificar los niveles de ventilación de cada planta, no tiene un poder de resolución suficiente para evaluar puestos de trabajo individuales.

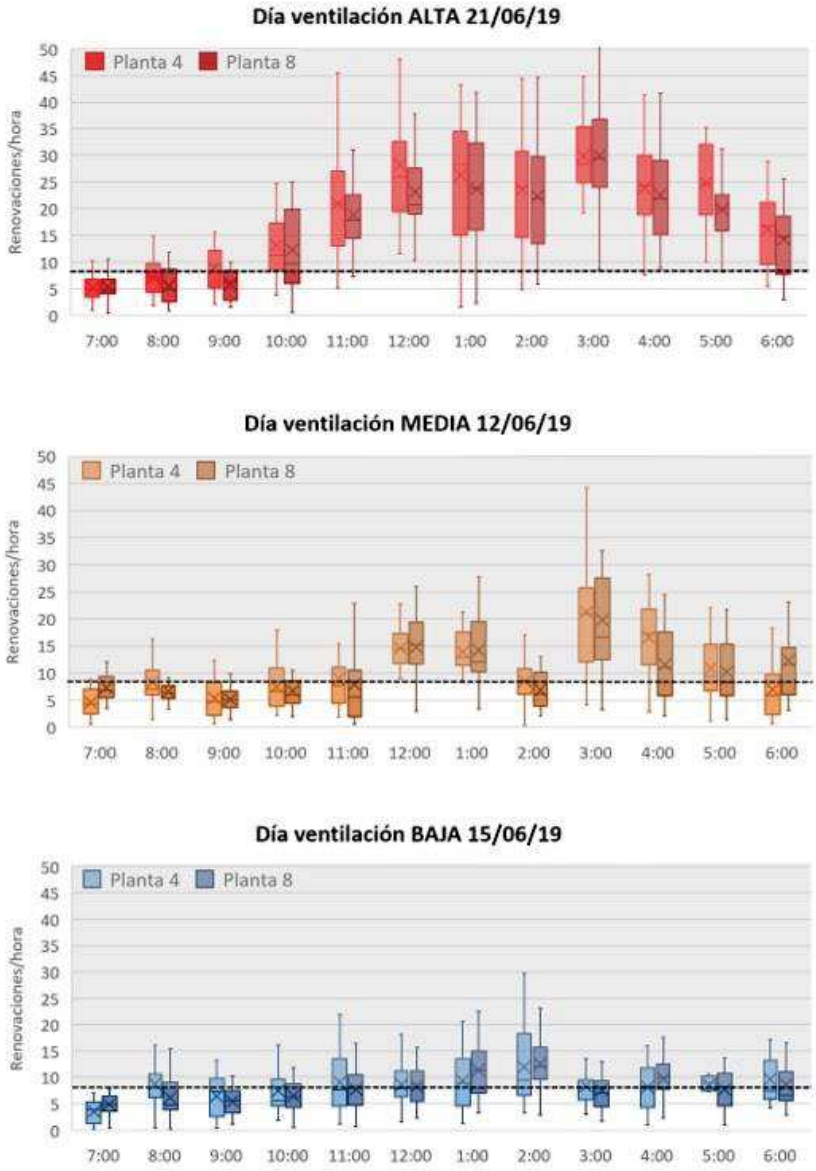

Figura 5 - Comparación de las renovaciones de aire por hora en las oficinas de plantas 4 y 8 del edificio sede de la EDU ante tres condiciones de ventilación exterior.

Las comparaciones en el desempeño de ventilación diaria se simplificaron mucho una vez se totalizó el tiempo en que cada planta mantuvo unas condiciones de ventilación por encima de lo exigido por norma. Contrariamente a lo esperado, las diferencias relativas entre un día de ventilación alta y un día de ventilación baja no son muy significativas. Vale aclarar que un valor de eficiencia del 100% corresponde a un espacio que durante todo el tiempo del análisis (las 12 horas comprendidas entre las 7:00 y las 19:00 horas) siempre permanece ventilado por encima del valor de referencia. Con respecto a los resultados de la izquierda en la

Figura 6, (día de ventilación alta), 1 de cada 4 días del mes tendrá una ventilación aún mejor y que para los resultados de la derecha, (día de ventilación baja) 1 de cada 4 días del mes tendrá una ventilación peor. Las barras del medio se pueden interpretar como la ventilación típica para junio de 2019.

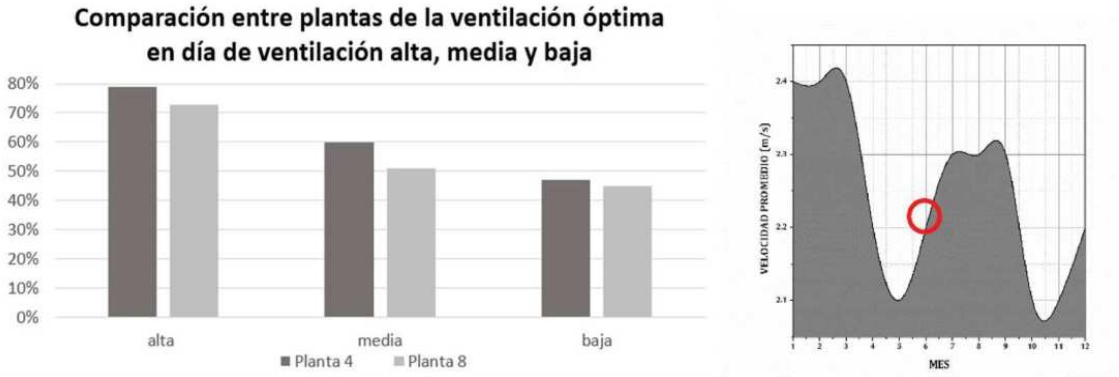

Figura 6 - Izquierda: Eficiencia de ventilación natural de los dos pisos del edificio de la EDU en las tres fechas de análisis de junio. La eficiencia del 100% corresponde a un espacio que durante todo el tiempo de uso supera los niveles de renovación de aire de referencia. Derecha: Promedio mensual de velocidad de viento en Medellín. Se resalta junio, con una velocidad media cercana al promedio anual. Fuente: Atlas del Viento de Colombia (IDEAM, 2017).

Los diagramas de barras permiten una comparación global del desempeño de cada una de las dos plantas evaluadas, pero como cualquier cifra que haya sido totalizada, se enmascaran valores que podrían enriquecer el proceso de análisis. Para comparar de una forma más detallada la eficiencia de ventilación de los pisos 4 y 8 se procedió a hacer diagramas de dispersión con sus correspondientes totalizaciones por cuadrantes, figura 7. En este tipo de diagramas se puede notar que a medida que la velocidad del viento aumenta, los niveles de ventilación de ambos pisos se equilibran. Por este motivo la tendencia de los puntos rojos es una línea diagonal más marcada que cuando el viento es más suave, en cuyo caso el piso 4 tiende a ligeramente mejor ventilado que el piso 8. Esta circunstancia posiblemente tenga relación con las condiciones de turbulencia generadas por las edificaciones vecinas, pero no fue posible encontrar una explicación definitiva a esta observación.

Los rectángulos negros resaltan los intervalos en que ambos pisos superaron los cambios de aire requeridos por norma: 92%, 56% y 38% de la jornada laboral. Son resultados para días con ventilación alta, media y baja, pero estos porcentajes pueden resultar un poco abstractos. Como la jornada laboral evaluada es de 12 horas, los tres porcentajes se pueden transformar en 11h 2´, 6h 43´ y 4h 34´, lo que responde plenamente la pregunta acerca del tiempo diario en que el edificio satisface simultáneamente en ambas plantas evaluadas, las condiciones de ventilación establecidas en la norma. En el caso de que se desee hacer evaluaciones particularizadas para sólo una planta, bastará con sumar los valores porcentuales que superan los valores de referencia y hacer las correspondientes conversiones. Por su parte, los tres rectángulos grises resaltan los intervalos en que la ventilación de ambas plantas estuvieron simultáneamente por debajo de los valores mínimos que establece la norma. Las cifras de los cuadrantes superior izquierdo corresponden al tiempo en que la ventilación de la octava planta fue mejor que la de la cuarta y simétricamente, el cuadrante inferior derecho corresponde al tiempo en que la ventilación de la cuarta planta fue mejor que la de la octava planta. Como se puede observar, esta segunda condición es un poco menos frecuente en días de ventilación baja y mucho más frecuente en días de ventilación media.

En junio se presentan en Medellín las velocidades más cercanas a la media anual, lo que ofrece cierta representatividad anual a los resultados aquí presentados. No obstante, para generalizar los resultados a todo el año conviene filtrar los registros horarios de viento durante todo un año a partir de las velocidades de referencia correspondientes a los días de ventilación alto, media y baja (1.8m/s, 2.5m/s y 2.7m/s). Los resultados presentados en la figura 8, permiten visualizar, hora a hora, el comportamiento anual del viento durante 2019. Los totales son muy útiles para valorar el comportamiento anual del edificio. Como se puede observar, durante el 56% del horario laboral las condiciones de ventilación natural del edificio corresponden a las que se presentan con unas condiciones de viento medio y sólo un 20% del tiempo (concentrado mayoritariamente en las tardes de junio a agosto), se presentaron condiciones de ventilación alta.

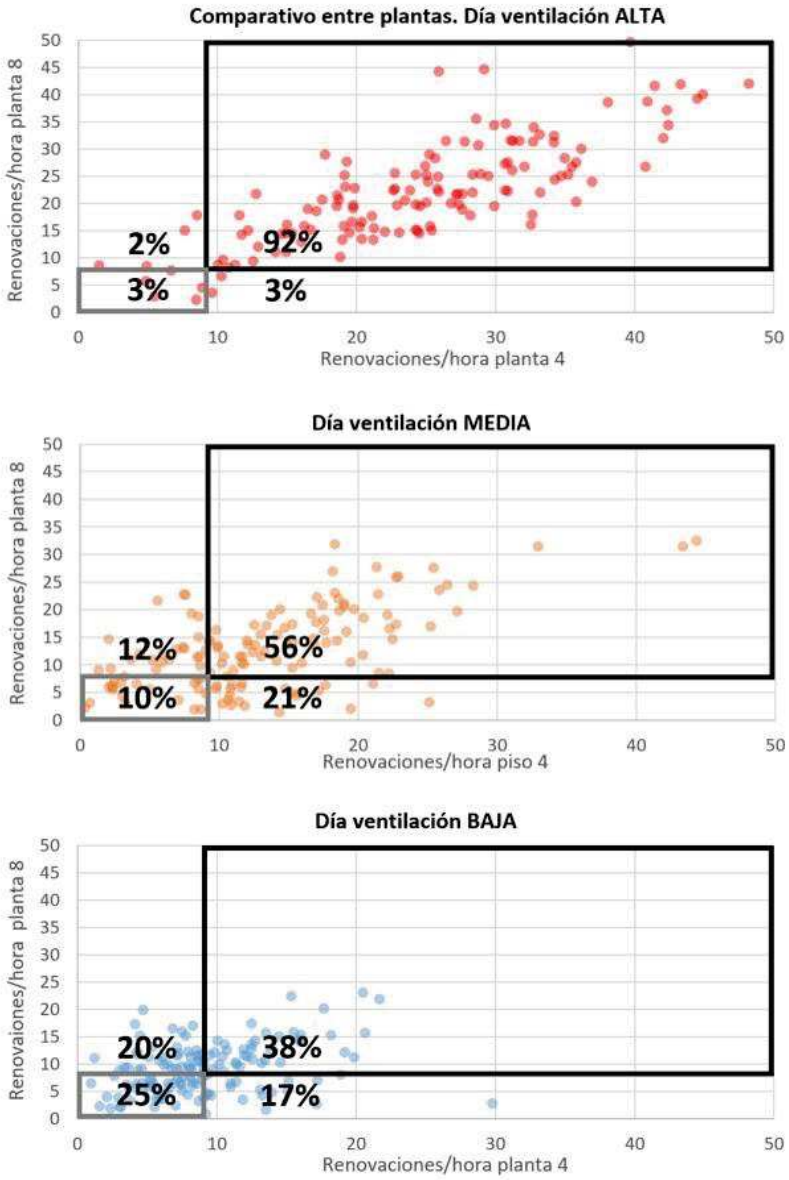

Figura 7 - Comparación de la eficiencia de la ventilación natural en las dos plantas del edificio de la EDU para tres condiciones de viento. En las abcisas la renovación del aire en el piso 4 y en las ordenadas el mismo valor para el piso 8.

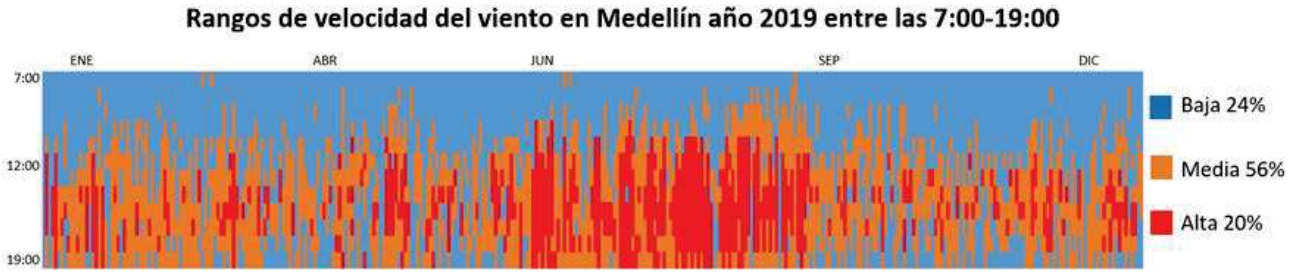

Figura 8 - Rangos de velocidad de viento (SIATA 202 año 2019 horario laboral). En las abcisas cada uno de los 365 días del año, en las ordenadas horas laborales. Los códigos de color se corresponden a los niveles de ventilación alto, medio y bajo.

5. CONCLUSIONES

La metodología desarrollada permite estimar la ventilación anual de una edificación sin necesidad de realizar una campaña de medición durante un año completo. Filtrar registros meteorológicos de ventilación a partir de unas velocidades de aire exterior que se consideren representativas, para seguidamente analizar las condiciones de renovación de aire al interior de una edificación en esos mismos días, es un método sencillo que permite valorar cuantitativamente la eficiencia de la ventilación natural de un edificio.

El diseño de las fachadas y el tamaño de las ventanas del edificio de la EDU es adecuado para que la renovación de aire en el interior del edificio supere las 8 renovaciones por hora durante cerca de media jornada, en especial en el periodo comprendido entre las 11:00 am y el final del día. Antes de esta hora las condiciones de ventilación casi nunca satisfacen los mínimos de ventilación exigidos, situación que se explica por la baja velocidad del viento que se registra a esas horas en ese sector de la ciudad de Medellín. Esto ratifica la necesidad de poner en operación la chimenea solar, dado que durante estas horas la ventilación cruzada es prácticamente nula.

En los días de ventilación baja, que corresponden al 25% del mes de junio y al 24% de todo el año, la ventilación natural en la cuarta planta superó el 47% del tiempo las 8 renovaciones por hora, mientras que la octava planta lo superó durante un 45% del tiempo. Esto demuestra que ante condiciones de viento leves las dos plantas se ventilan prácticamente igual. Durante estos periodos será conveniente abrir más las ventanas, a pesar de las eventuales ráfagas molestas que puedan ingresar al edificio. Complementariamente, cuando las condiciones de ventilación en la ciudad son altas (25% del mes de julio y 20% del año), la renovación del aire en el edificio supera los valores de ventilación establecidos en la norma durante casi todo el tiempo laboral (92% del tiempo equivalentes a 11h 6´).

Filtrar los registros meteorológicos por rangos de velocidad permite construir mapas temporales de ventilación, útiles para que operadores y propietarios puedan hacer una mejor gestión de las infraestructuras a su cargo. Una siguiente etapa de este mismo proyecto está enfocada en darle una aplicación predictiva a este tipo de herramientas, para hacer estimativos de base anual acerca de la ventilación probable de un proyecto arquitectónico en fase de diseño.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ARSANO, Alpha Yacob. "**C L I M A +: An Early Design Natural Ventilation Prediction Method**". Thesis Master of Science in Architecture Studies. Massachusetts Institute of Technology. Boston, 2017.

BITTENCOURT, Leonardo; CANDIDO, Christina. **Introducción a la Ventilación Natural**. Maceió: Edufal, 2015.

DAEMEI, A. OSMAVANDANI, P. NIKPEY, M. "Study on Vernacular Architecture Patterns to Improve Natural Ventilation Estimating in Humid Subtropical Climate". **Civil Engineering Journal**, 2018, Vol. 4. No. 9. Pp. 2097- 2110

FUENTES, Víctor; RODRIGUEZ, Manuel. **Ventilación Natural, Cálculos básicos para Arquitectura.** México: Universidad Autónoma Metropolitana, 2004.

GARCIA, A. BOLAÑO, M. MEDINA, D. ARANGO, J. (2018). **Evaluación integrada de iluminación natural, ventilación y ruido en tres aulas infantiles de Medellín. Colombia**. MACDES 2018. Quinto Congreso Internacional en Medio Ambiente Construido y Desarrollo Sustentable. Habana, Cuba.

GARCÍA, A. GALLEGO, Valentina. HERNÁNDEZ, Priscila. (2018). **Los calados como elementos moduladores del viento y el ruido. Variaciones sobre geometrías piramidales y porcentajes de apertura en muros calados**. MACDES 2018, La Habana, Cuba.

Grupo EMAT. (2020). **Perforated blocks efficiency from natural ventilation perspective in warm-humid climates**. PLEA 2020. Coruña, España.

ICONTEC - INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. NTC 5183: **Ventilación para una calidad aceptable del aire en espacios interiores**. 2003.

IDEAM. **Atlas de Viento de Colombia**. Bogotá, Colombia. 2017. ISSN: 978-9588067964. Disponible en Web: www.siata.gov.co.

IDEAM. **Boletín Climatológico de Colombia**. Bogotá, Colombia. [ref. 15/12/2020]. Disponible en Web: www.ideam.gov.co.

MARDALJEVIC, J; HESCHONG, L. "Daylight metrics and energy savings". **Lighting Research + Technology**, 2009, 0: pp. 1-23

ONSET Corporation. Product Catalog. [Ref. 15/122020]. Disponible en: www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u12-012/.

REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ministerio de Trabajo. **Resolución 2400 de 1979**.

SIATA. **Red de Alerta Temprana del Valle de Aburrá**. [en línea]. Medellín, Colombia. [ref. 15 de diciembre 2020].

TOLEDO, Eustáquio. **Ventilacao Natural das Habitacioes**. Maceió: Edufal, 1999.

YARKE, Eduardo. **Ventilación Natural de Edificios. Fundamentos y métodos de cálculo para aplicación de Ingenieros y Arquitectos**. Buenos Aires: Editorial Nobuko, 2005.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Empresa de Desarrollo Urbano EDU por permitir la instalación de los equipos de medida que hicieron posible recopilar los datos de velocidad de aire necesarios para realizar esta investigación.