

Confort térmico en vivienda social multifamiliar de clima cálido en Colombia

Thermal comfort in multi-family social housing in a warm climate in Colombia

Walter Giraldo-Castañeda

Universidad del Valle. Cali (Colombia)
Facultad de Artes Integradas, Escuela de Arquitectura
Departamento de Tecnología de la Construcción

Jorge Daniel Czajkowski

Universidad Nacional de La Plata. La Plata (Argentina)
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable

Analia Fernanda Gómez

Universidad Nacional de La Plata. La Plata (Argentina)
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable

Walter Giraldo-Castañeda

Arquitecto, Universidad del Valle. Cali (Colombia).
Doctor en Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de La Plata. La Plata (Argentina).
Magíster en Arquitectura y Urbanismo. Universidad del Valle. Cali (Colombia).
Profesor asistente, Universidad del Valle, e investigador con énfasis en arquitectura bioclimática, confort térmico, iluminación natural, ventilación natural y eficiencia energética.
<https://scholar.google.com/citations?user=62LRvHoAAAAJ&hl=en>
<https://orcid.org/0000-0002-8542-6689>
walter.giraldo@correounivalle.edu.co

Jorge Daniel Czajkowski

Arquitecto, UNLP, La Plata (Argentina).
Doctor en Ingeniería, UNLP, La Plata (Argentina).
Investigador independiente, CONICET, y director, Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable, UNLP.
Profesor Titular UNLP Cátedra Instalaciones I y II, Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
<https://scholar.google.es/citations?user=HN3vinAAAAJ&hl=es>
<https://orcid.org/0000-0001-8857-7880>
jdczajko@gmail.com

Analia Fernanda Gómez

Arquitecto, UNLP, La Plata (Argentina).
Investigador adjunto, CONICET, y miembro, Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable, UNLP.
Profesor titular, UNLP, Cátedra Instalaciones I y II, Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
<https://scholar.google.com.ar/citations?user=egw4WHsAAAAJ&hl=es>
<https://orcid.org/0000-0001-7057-354X>
anygomez@gmail.com

Giraldo-Castañeda, W., Czajkowski, J. D. y Gómez, A. F. (2021). Confort térmico en vivienda social multifamiliar de clima cálido en Colombia. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 23(1), 115-124. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2021.2938>



<http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2021.2938>

Resumen

El consumo energético residencial en Colombia se incrementó en el 30% entre 2010 y 2018, debido, en parte, al gasto destinado a la climatización activa de viviendas de interés social (VIS). Investigaciones sobre VIS unifamiliares reportaron sensaciones térmicas “muy calurosas” con el modelo PMV-PPD en clima cálido. El objetivo de la presente investigación es complementar el estado del arte evaluando el ambiente térmico de una VIS multifamiliar con 2 diferentes modelos de confort: 1) el PMV-PPD y 2) el adaptativo. La metodología tuvo 2 fases: 1) monitoreo a un ambiente VIS y 2) valoración mediante los dos modelos mencionados. Los resultados indicaron insatisfacción térmica por exceso de calor con ambos modelos en horas diurnas, muy similar a lo reportado en el estado del arte para tipología unifamiliar; sin embargo, también se encontró un ahorro del 35% en energía dedicada a la climatización si se lo valora con el modelo adaptativo. Se evidenció la ausencia de protección solar en vanos, y los altos valores de temperatura del aire y de la media radiante indicaron que el aislamiento térmico de la envolvente vertical de estas edificaciones es insuficiente para brindar confort térmico. Se proponen mejoras pasivas para mejorar la habitabilidad de estas viviendas y su inclusión obligatoria en el Reglamento 0549, para reducir el consumo energético y su impacto ambiental.

Palabras clave: Arquitectura bioclimática; construcción sostenible; ASHRAE 55; Modelo PMV-PPD; modelo adaptativo

Abstract

Residential energy consumption in Colombia increased by 30% between 2010 and 2018, due, in part, to spending on active air conditioning of social interest housing (VIS). Research on single-family VIS reported “very hot” thermal sensations with the PMV-PPD model in hot weather. The objective of the present research is to complement the state of the art by evaluating the thermal environment of a multifamily SIV with two different comfort models: 1) the PMV-PPD and 2) the adaptive model. The methodology had two phases: 1) monitoring of a VIS environment, and 2) assessment using the two models mentioned above. The results indicated thermal dissatisfaction due to excess heat with both models during daytime hours, very similar to what has been reported in the state of the art for single-family typology. However, a 35% saving in energy dedicated to air conditioning was also found if evaluated with the adaptive model. The absence of solar protection in openings was evidenced, and the high values of air temperature and mean radiant temperature indicated that the thermal insulation of the vertical envelope of these buildings is insufficient to provide thermal comfort. Passive improvements are proposed to ameliorate the habitability of these dwellings and their mandatory inclusion in Regulation 0549, to reduce energy consumption and its environmental impact.

Key words: Bioclimatic architecture; sustainable construction; ASHRAE 55; PMV-PPD model; adaptive model

Recibido: septiembre 03 / 2019

Evaluado: octubre 22 / 2020

Aceptado: diciembre 16 / 2020

Introducción

El presente artículo de investigación corresponde a uno de los capítulos iniciales de la tesis doctoral en Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina, titulada: *Optimización del confort térmico en clima ecuatorial con tecnologías pasivas en fachadas: el caso de las viviendas de interés social de Cali*, realizada por el autor principal bajo la tutoría de los dos coautores, en una comisión de estudio docente otorgada por la Universidad del Valle, de Cali, Colombia. La tesis está vinculada al proyecto de investigación *Estrategias de adaptación al cambio climático en edificios y ciudades*, y evalúa el confort térmico de las VIS colombianas de clima cálido. Además, la mencionada tesis propondrá y evaluará soluciones constructivas de tipo pasivo, con el fin de mejorar la habitabilidad y, a la par, reducir el consumo energético destinado a climatización. Por su parte, el principal aporte de este artículo es la valoración experimental del confort térmico de las VIS colombianas de tipología multifamiliar en clima cálido, valoración no llevada a cabo aún en el estado del arte.

El fenómeno del calentamiento global requiere ser atendido imprescindiblemente por medio de un cambio paradigmático en la industria de la construcción; dicho cambio debe favorecer la eficiencia energética en las edificaciones para evitar la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) generados en la producción de electricidad, ya sea por la quema de combustibles fósiles o por las grandes hidroeléctricas.

En Colombia, la demanda energética ha tenido un crecimiento cercano al 30% desde 2010 hasta 2018 (Sistema Intercomunicado Nacional, 2018); la mayor parte de esa demanda está destinada a climatizar activamente las VIS (International Energy Agency, s. f.; Giraldo et al., 2015), con lo que se ha requerido aumentar la infraestructura de grandes hidroeléctricas, las cuales han impactado de manera negativa el medio ambiente (Revista *Dinero*, 2019).

Las VIS son construidas para garantizar el derecho a la vivienda de los hogares con menores ingresos; además, cumplen con todas las normas urbanísticas (Planeación Municipal, Alcaldía de Santiago de Cali, 2014), arquitectónicas (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Colombia, 2011) y de construcción (MINVIVIENDA, 2000; Ministerio de Minas y Energía, 2009; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010; Ministerio de Minas y Energía, 2013), sin sobrepasar un costo para su construcción de 135 salarios mínimos mensuales, equivalentes a USD 36.000 (TRM a 27 de junio de 2018) (Congreso de Colombia, 1997). Según el Departamento Nacional de Estadística (DANE, 2017), las VIS constituyen un porcentaje importante del entorno construido en Colombia, pues equivalen al 49% de las viviendas; pese a ello, es opcional que este tipo de edificaciones cumpla con el Reglamento de Construcción Sostenible, contenido en la Resolución 0549 de 2015 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2015), la cual aconseja la reducción del consumo energético en el 20% en relación con una línea base definida por el gobierno.

En el país se distinguen 2 tipologías de VIS: 1) la *multifamiliar*, o de apartamentos, y 2) la *unifamiliar*, o de casas. En cantidad, la tipología multifamiliar predomina, con el 68%, sobre la tipología unifamiliar, que representa solo el 32% (DANE, 2017). En el componente constructivo hay gran variedad de sistemas disponibles (Echeverry Campos y MetroVivienda, 2000); sin embargo el 99% de ellos están basados en materiales de alta densidad como la mampostería en concreto, la arcilla y los sistemas industrializados, como *outinord* o *contech* (García López et al., 2016), que consisten en muros macizos de concreto reforzado con espesores que van desde 8 cm hasta 12 cm. Dichos sistemas constructivos tienen alta transmitancia térmica, lo cual es negativo para el desempeño térmico de las construcciones en climas cálidos. Esta afirmación se hace respecto a que 10 cm de muro en concreto equivalen a 4,16 W/m²K, en comparación con los 10 cm de muro en el sistema de poliestireno expandido de alta densidad, que equivalen a 0,05 W/m²K.

Tomando como base la clasificación climática del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) incluida en el anexo 2 del Reglamento 0549 de 2015 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2015), más del 80% del territorio colombiano presenta clima cálido, clasificación en la que se encuentran ciudades tan importantes como Cali, Barranquilla, Cartagena y Buenaventura, entre otras. Para este tipo de clima Olgyay (1998), Givoni (1976) y Santamouris y Asimakopoulos (2001) señalan que se requiere aplicar, principalmente, las estrategias de control solar y ventilación natural para alcanzar el confort térmico; no obstante, cuando estas recomendaciones no se consideran en el diseño arquitectónico ni en la construcción, es casi imposible alcanzar el confort térmico de forma pasiva, como en el caso de las VIS de Cali, Colombia (Giraldo y Herrera, 2017).

De acuerdo con la norma ISO 7730 (International Organization for Standardization, 2005), el confort térmico es el estado mental en el que se expresa satisfacción con el ambiente térmico, y por tal razón las circunstancias requeridas para alcanzarlo no son iguales para todos; sin embargo, mediante investigaciones de laboratorio y de campo se han podido establecer estadísticamente las condiciones en las que la mayoría de las personas son térmicamente confortables.

Las principales variables que influyen en el confort térmico son: la *temperatura del aire* (T_{air}), la *humedad relativa* (H_r), la *velocidad del aire* (V_{air}), la *temperatura media radiante* (T_{mr}), el *nivel de vestimenta* (Clo) y la *tasa metabólica* (Met). Pioneros en el tema, como Olgyay (1998), Givoni (1976) y Fanger (1970), propusieron modelos para valorar el confort con dichas variables.

El modelo de Fanger es muy utilizado por incorporar todas las variables ya mencionadas, en dos índices: 1) el *Predicted Mean Vote* (PMV), que indica la sensación térmica en una escala de 7 valores que va desde -3, o "muy frío", a +3, o "muy caluroso", y 2) el *Predicted Percentage Dissatisfied* (PPD), que señala el porcentaje de personas insatisfechas en el ambiente. En este modelo, la situación ideal de confort térmico es un valor PMV de 0, o "Neutro", y un PPD no mayor que el 20%. Este modelo ha sido adoptado en estándares internacionales como: ISO 7730, desde 1984, y el ASHRAE Standard 55, desde 1992 (American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioned Engineers [ASHRAE], 2017). También ha sido adoptado en el ámbito nacional en el Reglamento 0549 de Construcción Sostenible (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2015). Es ampliamente



This article is available in English on the website of *Revista de Arquitectura (Bogotá)*
<http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2021.2938>

Thermal comfort in multi-family social housing in a warm climate in Colombia

aceptado para evaluar ambientes con climatización mecánica, porque numerosas investigaciones han encontrado discrepancias; sobre todo, en edificios ventilados naturalmente, en los cuales los ocupantes expresan satisfacción térmica en un rango más amplio (Carlucci et al., 2018; Forgiarini Rup et al., 2015). Por lo expuesto, el modelo adaptativo fue incluido en versiones posteriores de las mismas normas.

En particular, el modelo de Fanger establece un rango de confort estático para la T_{air} entre 21 °C y 25 °C, sin considerar el clima evaluado; en contraste el modelo adaptativo considera confortables, incluso, 3,5 °C por encima y por debajo de la T_{air} media del clima evaluado.

El modelo adaptativo tiene como parámetro de evaluación la *temperatura operativa* (T_{op}), que es una ponderación entre la T_{air} y la T_{mr} . Por ejemplo, para un clima con 25 °C de T_{air} media, como Cali, la situación ideal es que su T_{op} se encuentre en ese mismo valor; sin embargo, están dentro del rango de aceptabilidad valores entre 29° C y 22 °C.

Brindar confort térmico de forma pasiva en las viviendas tiene una ventaja innata, y es la del bienestar y la salubridad (Ormandy y Ezra-ty, 2012; Kaushik et al., 2020); sin embargo, hay otras, como la económica y la sostenible. La ventaja económica está dada por los costos ahorrados en consumo energético, que son muy bien recibidos, especialmente, por la comunidad de viviendas sociales; mientras, la sostenible se da por la disminución del calentamiento global, pues al reducirse el consumo energético también se reducen las emisiones de GEI, pues se estima que la mitad de la energía producida en el mundo es consumida por los hogares, y de esa mitad, cerca del 40% se dedica a dispositivos activos de climatización (United Nations Commission on Human Settlements, ONU, 2011).

Gamboa et al. (2011) evaluaron el confort térmico en VIS de Cali. En el ámbito urbano se concluyó que este podría mejorarse potenciando microclimas que reduzcan el fenómeno de la isla de calor urbana mediante paisajismo. En el ámbito arquitectónico, por medio de encuestas y monitoreos, determinaron que la insatisfacción térmica es generalizada en la tipología unifamiliar, en la cual registraron sensaciones térmicas “muy calurosas” y un PPD que llegó hasta el 100%. Mediante termografías, revelaron altos niveles de temperaturas superficiales en las envolventes, como cubiertas y fachadas, que alcanzan hasta 49 °C. Finalmente, los autores demostraron, con la aplicación de una barrera radiante instalada bajo la cubierta, que es posible alcanzar el confort de manera económica en esta tipología.

Iturre (2013) trabajó con las VIS de Buenaventura, de clima cálido húmedo. Su trabajo identificó, mediante monitoreos y encuestas en más de 200 viviendas, que en el 53% de ellas se utilizaba constantemente climatización mecánica para lograr confort durante el día y parte de la noche. Según el autor, esto se debe, principalmente, al

calor ganado por la cubierta y por su baja resistencia térmica. Además, el autor encontró ausencia de ventilación cruzada, alta absortividad y baja resistencia térmica en los muros de fachada. La solución teórica propuesta para mejorar tal condición consistió en mejorar la resistencia térmica de la cubierta, cambiar el color de los muros de fachada para reducir la absortividad y generar ventilación cruzada creando nuevos vanos.

Igualmente, Barona (2016) determinó el comportamiento térmico de los dos sistemas constructivos de fachada más utilizados en las VIS de Cali: mampostería estructural con bloques de arcilla cocida y muros macizos de concreto reforzado. Dicho estudio se llevó a cabo en viviendas unifamiliares construidas en municipios aledaños a Cali, como Candelaria y Jamundí, los cuales comparten las mismas características climáticas. Mediante monitoreo y cálculos matemáticos, Barona determinó las condiciones térmicas de las viviendas y evaluó el confort térmico mediante el índice de Fanger. Se concluyó que las sendas envolventes verticales no poseen la capacidad suficiente para aislar térmicamente el calor irradiado por el sol y brindar confort térmico, ya que la sensación térmica más común fue la “muy calurosa”, lo cual significa un porcentaje de insatisfechos superior al 90%.

Por último, Giraldo et al. (2015) llevaron a cabo un análisis de simulación computacional con un modelo multifamiliar VIS con una envolvente de concreto reforzado de 0,08 m de espesor. Los autores identificaron que desde las 10:00 hasta las 21:00 la sensación térmica presentada en un apartamento se encuentra fuera de los rangos de confort. Proponen también algunas soluciones, que consisten en el aumento de la resistencia térmica de la envolvente, y protección solar a las ventanas. Estas mejoras significaron una reducción del 60% de la carga térmica en el interior del apartamento; además, representaron en la construcción inicial tan solo un sobre costo del 16%, el cual se puede recuperar en 3 años de funcionamiento.

Los trabajos experimentales de Gamboa et al. (2011), Iturre (2013) y Barona (2016), realizados todos en clima cálido, coinciden en señalar insatisfacción térmica en las VIS unifamiliares construidas con los sistemas de mampostería de ladrillo o concreto, lo cual permite generalizar este desempeño. En contraste, para la tipología multifamiliar, tan solo se cuenta con el estudio computacional hecho por Giraldo et al. (2015); por lo tanto, es necesario continuar el análisis térmico de la tipología VIS multifamiliar, entre otras cosas, porque supera ampliamente en cantidad a la unifamiliar en todo el país, y su ganancia térmica es muy diferente. En la tipología unifamiliar la carga térmica recibida por la cubierta es notablemente mayor, debido a que esta constituye la mayor área de la envolvente; mientras, en la tipología multifamiliar el calor ganado por la cubierta afecta únicamente a las unidades habitacionales del nivel más alto. En los bloques de múltiples apartamentos la mayor área de la envolvente corresponde a las fachadas, las cuales abarcan la totalidad de los apartamentos.

Así mismo, estos trabajos han evaluado el confort térmico mediante el modelo PMV-PPD, a pesar de que dichas viviendas son ventiladas naturalmente. El presente trabajo propone evaluar el confort térmico con ambos modelos: el PMV-PPD, para tener la misma escala valorativa de los estudios anteriores, y también el adaptativo, para tener valoraciones más precisas y confrontar resultados desde el punto de vista de la eficiencia energética y la sostenibilidad.

Por lo tanto, el objetivo principal planteado en este trabajo es evaluar el nivel de confort térmico brindado por un ambiente de la tipología multifamiliar de la VIS de Santiago de Cali, Colombia, donde se presenta un clima cálido seco, mediante un monitoreo de campo y uso comparativo de los modelos PMV-PPD y adaptativo.

Metodología

Edificación experimental

El edificio escogido para el presente estudio es un bloque de cinco niveles de apartamentos perteneciente al conjunto residencial Calicanto, localizado al sur de la ciudad de Santiago de Cali, entre las calles 42 y 45 y las carreras 95 A y 96 A. El sistema constructivo de dicha edificación es de mampostería reforzada de bloques estructurales de arcilla cocida a la vista con revoque y pintura en el interior; tiene, además, una relación de ventana pared del 30% y un aspecto en planta 1:1,7. El ambiente monitoreado corresponde a la alcoba principal de un apartamento de 56 m² ubicado en la esquina suroeste del cuarto nivel de la edificación.

La figura 1 contiene a la izquierda la planta arquitectónica del cuarto nivel, donde se señala, mediante sombreado, la ubicación del apartamento en el edificio. Mientras, a la derecha se muestra la distribución arquitectónica del apartamento, en la cual se señala, también con un sombreado, el dormitorio de interés, el cual tiene dimensiones intramuros de 2,7 m x 3,0 m. En la figura 2 se muestra una vista exterior del bloque de apartamentos; se indica, con línea discontinua de color negro, la unidad de vivienda analizada.

Obtención de datos

En la obtención de datos se procuró seguir la norma ISO 7726 (International Organization for Standardization, 2002). Las variables ambienta-

les, como T_{air} , H_r , V_{air} y T_{mr} , fueron adquiridas mediante sensores, mientras que para las variables personales, como Clo y Met , se determinó un perfil dinámico de acuerdo con las costumbres de los ocupantes.

Para obtener la T_{air} y la H_r , un termohigrómetro digital con almacenamiento de datos (*data logger*) registró cada hora estas variables en frente de la cama, a una altura de 1,1 m. Este sensor fue protegido de la radiación mediante una cajilla perforada de aluminio pulido.

Los datos de V_{air} fueron obtenidos mediante un anemómetro de hilo caliente posicionado en el área operable de la ventana corrediza de doble panel. Con este equipo se tomó constantemente la velocidad del aire y se elaboró un promedio de estos registros cada hora. Durante la medición, la ventana fue operada libremente a voluntad de los ocupantes, pero la puerta permaneció cerrada.

Por su parte, la T_{mr} se obtuvo registrando cada hora las temperaturas superficiales de los seis planos que conforman la habitación, con un termómetro infrarrojo, para posteriormente ser calculada mediante la siguiente fórmula, propuesta por Dunkle (1963), y posteriormente seguida por ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating):

$$T_{mr} = \sqrt[4]{\sum_n f_p \epsilon (t_i + 273,15)^4} - 273,15$$

Donde:

t_i = temperatura de la superficie i en °C.

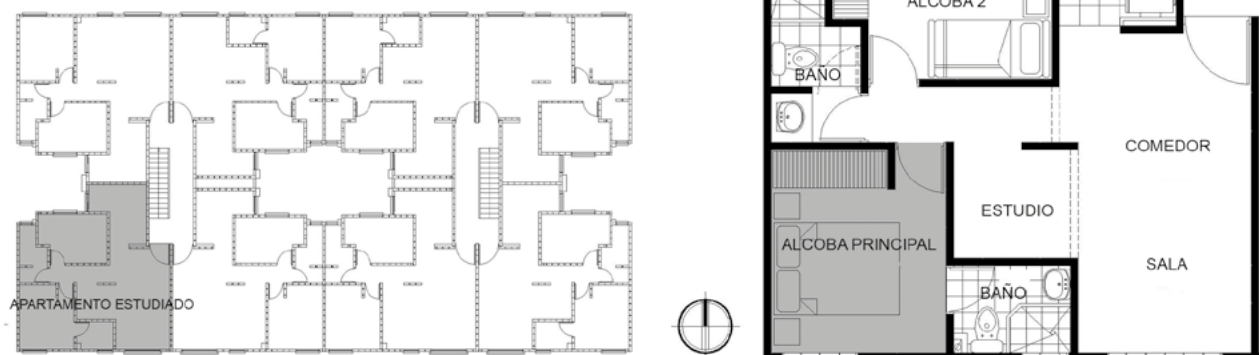
f_p = factor de vista entre el punto central de la habitación y la superficie

ϵ = emisividad del material.

La figura 3 muestra una vista interior del dormitorio, con un esquema de la instalación de los sensores, y en la tabla 1 se relaciona cada variable con el instrumento utilizado para su medición y sus especificaciones.

Por último, la tasa metabólica (Met) y el nivel de vestimenta (Clo) se determinaron mediante la observación de los hábitos cotidianos de los

Figura 1. Edificación experimental. Plantas arquitectónicas: cuarto nivel del bloque; se resalta el apartamento seleccionado (izquierda) y del apartamento señalando el ambiente monitoreado (derecha). Fuente: elaboración propia (2019).



ocupantes y la asignación posterior de valores de acuerdo con el ASHRAE Handbook Fundamentals (ASHRAE, 2001). La valoración se dividió en dos etapas: 1) la de actividades y 2) la de descanso.

Periodo de monitoreo

El monitoreo se llevó a cabo durante la primera semana de enero de 2016. De acuerdo con las bases de datos climáticas (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Tiempo y Clima en Colombia [IDEAM], 2016), este es uno de los periodos donde se reúnen altos valores de radiación solar y temperatura del aire. Adicionalmente, en esta época del año el dormitorio analizado no solo recibe radiación solar directa por la fachada oeste, sino que también la recibe por la fachada sur, lo que configura un periodo crítico de carga térmica externa.

Procesamiento de datos

Con los datos obtenidos durante la semana se elaboró un día típico conformado por los promedios horarios de cada variable. Posteriormente, los valores de este día típico fueron introducidos al software PMV Calc v2 (Department of Technology and Built Environment - Laboratory of Ventilation and Air Quality - University of Gävle, s. f.), de uso libre, para calcular hora a hora los índices PMV y PPD.

Por otro lado, para evaluar el confort térmico mediante el modelo adaptativo se preparó un gráfico basado en la figura 5.3 del ASHRAE Standard 55, que relaciona en el eje vertical la T_{op} y en el eje horizontal la T_{air} media (ASHRAE, 2017); esta gráfica, a su vez, depende de una hoja electrónica que calcula la temperatura operativa con los valores de T_{air} y T_{mr} del día típico mediante la siguiente fórmula:

$$T_{op} = A \cdot t_a + (1-A) \cdot t_{mr}$$

Donde:

T_{op} = Temperatura operativa

A = Coeficiente de velocidad del aire

t_a = Temperatura del aire

t_{mr} = Temperatura media radiante

Posteriormente, la T_{op} se une con la temperatura exterior media predominante de Cali (25 °C), la cual fue calculada con la base de datos de un año

de mediciones de la estación meteorológica de la Escuela de Arquitectura de la Universidad del Valle de Cali, en su sede de Meléndez.

Resultados

Temperatura del aire

La figura 4 muestra el comportamiento de la T_{air} durante la semana de medición; en esta se señala el rango de confort, de entre 22 °C y 29,5 °C, recomendado por Olgyay (1998) y Givoni (1976), mediante el área sombreada. La T_{air} máxima registrada fue de 34,7 °C, y la mínima, de 20,9 °C. El límite superior del rango de confort fue superado notoriamente en 5 de los 7 días monitoreados, por lo general, desde las 10:00 hasta las 18:00. Nótese cómo dicho periodo coincide con las horas del día en las cuales se recibe radiación solar en la fachada sur y oeste, con lo que se infiere el déficit de estrategias de protección solar para muros y

Tabla 1. Especificación del instrumental utilizado.

Fuente: elaboración propia (2019).

Variable	Instrumento
Temperatura del aire. Humedad relativa.	Termohigrómetro digital (<i>datalogger</i>) marca Extech (modelo RHT30). Sensibilidad a un rango de T_{air} entre -30 °C y 70 °C, con una resolución de 0,1 °C y precisión de $\pm 0,5$ °C. En cuanto a la Hr, el equipo tiene un rango de medición entre 0,1 % y 99,9 %, con resolución de 0,1 % y precisión de ± 3 %.
Temperatura superficial o temperatura radiante (Tr).	Termómetro infrarrojo marca Extech modelo IR 42500. El rango de medición va desde -20 °C a 260 °C, con una precisión del 98 % al 97 %
Velocidad del aire.	Termoanemómetro digital de hilo caliente marca CEM (modelo DT-8880). Rango de medición desde 0,01 hasta 25 m/s. Resolución de 0,01 m/s.



Figura 2. Vista exterior de la edificación experimental, donde se indica la unidad de vivienda analizada.

Fuente: Google Earth (2019).



Figura 3. Esquema explicativo de la instalación del instrumental en el interior del dormitorio monitoreado.

Fuente: elaboración propia (2019).

ventanas. Además, la T_{air} del dormitorio estuvo levemente por debajo del rango de confort en 3 de los 7 días monitoreados; generalmente, desde las 4:00 hasta las 6:00. Las condiciones de la T_{air} durante este periodo son ideales para enfriar los espacios mediante ventilación natural nocturna, con el objeto de que estén más frescos a la hora de recibir las cargas térmicas de la mañana y la tarde.

Humedad relativa

La figura 5 muestra el comportamiento de la H_r durante los 7 días de monitoreo. En esta se señala el rango de confort propuesto por Olgay (1998), de entre el 30% y el 70%, mediante la zona sombreada. La H_r máxima alcanzada fue del 84%, y la mínima, del 34%. El espacio presenta exceso de humedad en 6 de los 7 días monitoreados en las horas de la madrugada. Este superávit de humedad es poco problemático, debido a que, generalmente, este es el periodo de descanso y se encuentra acompañado por T_{air} confortables; por lo tanto, evaporar sudoración en exceso no es necesario.

Velocidad del aire

La figura 6 muestra el comportamiento de la V_{air} durante los 7 días de monitoreo, en los que

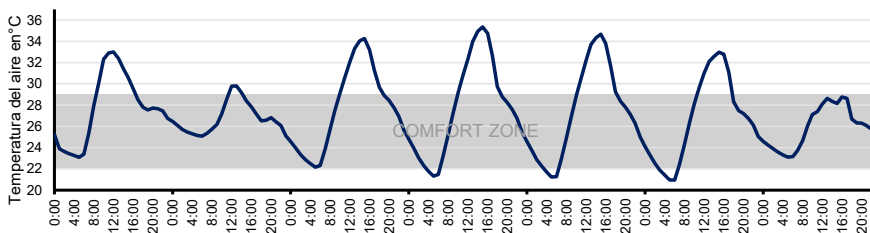


Figura 4. Temperatura del aire durante los siete días de monitoreo.

Fuente: elaboración propia (2019).

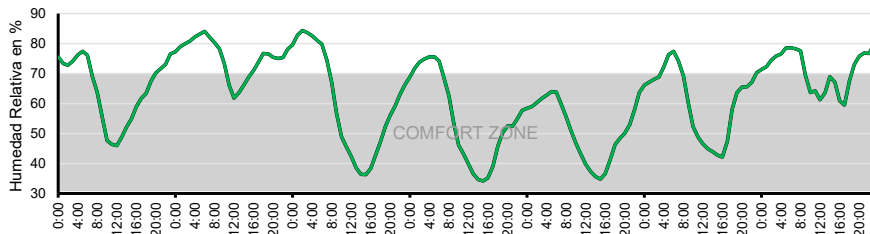


Figura 5. Humedad relativa durante los siete días de monitoreo.

Fuente: elaboración propia (2019).

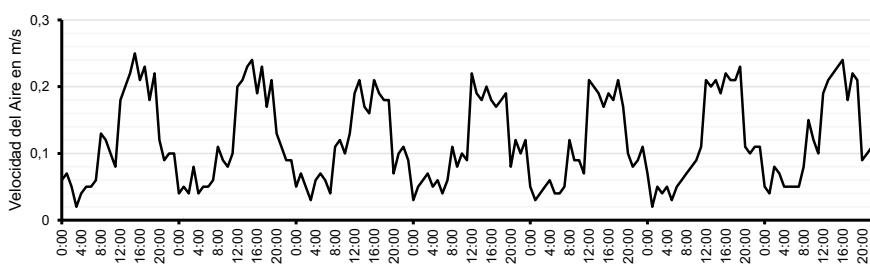


Figura 6. Velocidad del aire durante los siete días de monitoreo.

Fuente: elaboración propia (2019).

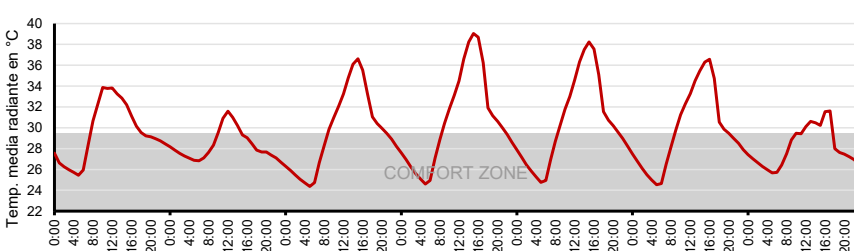


Figura 7. Temperatura media radiante durante los siete días de monitoreo.

Fuente: elaboración propia (2019).

la ventana fue manipulada libremente a elección de los ocupantes (generalmente permaneció por completo abierta en las horas de la mañana y la tarde, y parcialmente, durante la noche y la madrugada), pero la puerta permaneció cerrada. La gráfica muestra que la V_{air} en el espacio fue menor durante las horas de la madrugada, y se incrementó durante las horas del mediodía y la tarde. Pese a ello, los registros oscilaron entre 0,02 m/s y 0,25 m/s, lo cual es calificado por Olgay (1998) como viento en calma o inadvertido.

Estos bajos valores de velocidad del aire se atribuyen a que la habitación no cuenta con ventilación cruzada, pues tiene tan solo una ventana corrediza, en la cual solo es útil el 50% de su área, por la cual el aire debe entrar y salir a la vez. Lamentablemente, esta condición de tipo de ventilación y tipo de ventana es característica general de las VIS.

Temperatura media radiante

La figura 7 muestra el comportamiento de la T_{mr} durante los siete días de monitoreo. En esta se señala el rango de confort propuesto por Olgay (1998) y Givoni (1976), de entre 22 °C y 29,5 °C, mediante la franja sombreada. La T_{mr} máxima alcanzada fue de 38,7 °C, y la mínima, de 24,36 °C. El límite superior del rango de confort se superó en todos los días monitoreados, desde las horas de la mañana hasta el final de la tarde o, en algunos casos, hasta la noche.

Cabe resaltar que la figura 7 representa la T_{mr} en la cual se computan las temperaturas superficiales de todo el dormitorio (muros, piso y techo) con la ecuación ya indicada; sin embargo, la temperatura superficial de la fachada oeste fue la que alcanzó el valor más alto, de hasta 48 °C, en el cuarto día de medición.

Al integrar lo expuesto en la figura 1 con la proximidad de la cama a la fachada oeste y sus 48 °C de temperatura superficial, es claro que el cuerpo de los usuarios es irradiado muy directamente por su calor acumulado. Esta deficiente condición para el confort térmico es ocasionada por la disposición del mobiliario planteada en el diseño arquitectónico (nótese que es la única posición adecuada para la cama), las pequeñas dimensiones en planta de la alcoba y las altas absorptividades y transmitancias térmicas de la envolvente. Infortunadamente, al menos los últimos 3 factores son características generales de las VIS colombianas.

Nivel de vestimenta

De acuerdo con lo observado durante el monitoreo y los valores de Clo consignados en el Standard ASHRAE Handbook Fundamentals (tabla 8, capítulo 8) (ASHRAE, 2001), para las horas comprendidas entre las 8:00 y las 21:00 los usuarios usaron pantalones ligeros, camisa de manga corta y calzado liviano, lo cual equivale a un Clo de 0,6. Mientras, para las horas de descanso, de las 22:00 a las 7:00 utilizaron pijama y frazada, lo cual equivale a un valor de 1,2 Clo .

Nótese que los niveles de vestimenta son dinámicos y se adaptan a las condiciones ambientales que, en definitiva, son percibidas por los usuarios. En este caso, el uso de mayor cantidad de aislamiento térmico en la vestimenta utilizada en las horas de la noche se atribuye, principalmente, a la reducción de la T_{air} y de la T_{mr} .

Tasa metabólica

De acuerdo con las actividades llevadas a cabo por los usuarios y con los valores Met consignados en el standard ASHRAE Handbook Fundamentals (tabla 4, capítulo 8) (ASHRAE, 2001), los usuarios desarrollaron actividades físicas moderadas desde las 8:00 hasta las 21:00, lo cual equivale a un valor de 1,2; mientras, el tiempo de las 22:00 a las 8:00 fue dedicado a dormir, lo cual equivale a un valor de 0,8.

Evaluación de confort con el modelo de Fanger PMV-PPD

Con base en los promedios de T_{air} , H_r , V_{air} y T_{mr} obtenidos en los siete días de medición, y con los valores de Clo y Met determinados, se elaboró un día típico, con el cual posteriormente se valoró el confort térmico mediante los índices PMV y PPD.

La tabla 2 contiene los valores medios de cada variable en cada una de las 24 horas del día típico con los que se calcularon dichos índices. El PMV y PPD resultantes en cada hora se encuentran en las dos columnas finales.

Finalmente, para revisar de manera visual estos datos, se elaboraron las figuras 8 y 9. La figura 8 muestra el comportamiento del PMV; allí se distingue que el espacio logra únicamente sensaciones térmicas cercanas a lo “neutro” desde las 23:00 hasta las 8:00; mientras, desde las 9:00 hasta las 22:00 se sobrepasa el límite de lo “ligeramente caluroso”, y permanece, por tanto, entre las sensaciones “calurosas” y “muy calurosas”. Nótese también que entre las 13:00 y las 17:00 se alcanza la sensación “muy calurosa”, que equivale al nivel más alto de insatisfacción por exceso de calor.

Esta información se complementa con el porcentaje de personas insatisfechas o PPD, que se muestra en la figura 9; en esta se nota que en 14 de las 24 horas del día el espacio permaneció por fuera del rango “aceptable” de confort térmico, establecido en el 20%, y llegó a cifras de insatisfechos de hasta el 93,4%, entre las 13:00 y las 17:00.

Evaluación de confort con el modelo adaptativo

La figura 10 muestra la evaluación de confort mediante el modelo adaptativo. Esta se elaboró calculando las temperaturas operativas horarias con base en la ponderación entre T_{air} y T_{mr} del día típico y teniendo en cuenta que la temperatura exterior media predominante de Cali es de 25 °C.

De la figura 10 se infiere que, dentro de los límites de aceptabilidad, del 80%, se encuentra el periodo comprendido entre las 19:00 y las 9:00, lo cual equivale a 15 horas de satisfacción; mientras, por fuera de este mismo límite se

encuentra el periodo comprendido entre las 10:00 y las 18:00, lo cual equivale a 9 horas de insatisfacción. En este periodo de insatisfacción se alcanzó una separación máxima de hasta 4 °C de los límites de aceptabilidad de temperatura operativa entre las 14:00 y las 15:00.

Cabe destacar que la cantidad de tiempo por fuera del límite de aceptabilidad del 80% difiere en 5 horas de un modelo evaluativo a otro; es decir, con el modelo PMV-PPD se tienen 14 horas por fuera del rango, mientras que con el modelo adaptativo solo se obtienen 9, con lo cual el tiempo de funcionamiento de los equipos de climatización activa se reduce en el 35% con este último modelo, porque tiene rangos de confort más amplios.

Discusión

Como bien se indicó en la Introducción, Olgay (1998), Givoni (1976) y Santamouris y Asimakopoulos (2001) dan prioridad a las estrategias bioclimáticas de control solar y ventilación natural en los climas cálidos. En cuanto a la primera de esas dos estrategias, como lo mostró la figura 2, el edificio tipo VIS objeto de observación carece de elementos de protección solar en vanos como aleros o quiebrasoles, y contrariamente a las recomendaciones de usar colores claros para reducir la absorción de radiación solar, sus muros exteriormente dejan a la vista el oscuro bloque de arcilla. De la misma forma, hace parte de esta estrategia la transmitancia térmica de los muros, la cual, de acuerdo con sus componentes, alcanza 2,37 W/m²K, mientras que el Reglamento 0549 de Construcción Sostenible (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2015) parte de la base de tener, como máximo, 1,21 W/m²K.

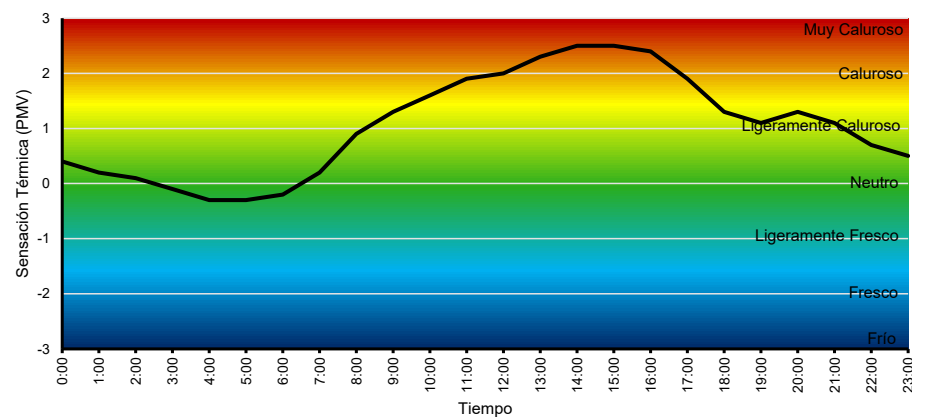


Figura 8. Gráfica de PMV (índice de sensación térmica) en el día típico. Fuente: elaboración propia.

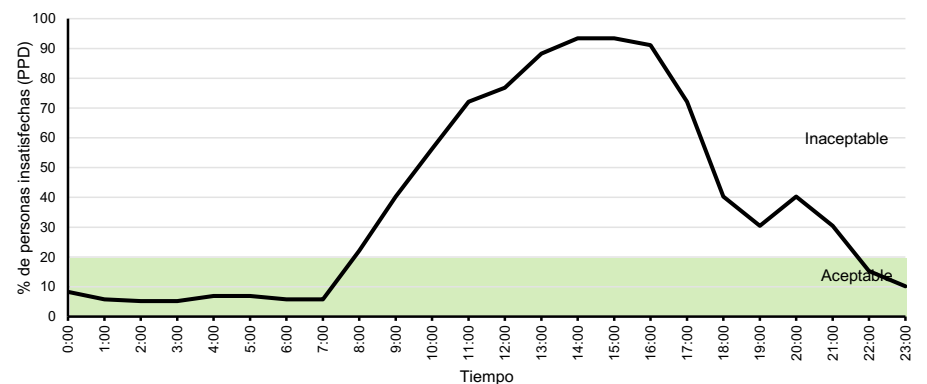


Figura 9. Gráfica de PPD (Porcentaje de personas insatisfechas) en el día típico. Fuente: elaboración propia (2019).

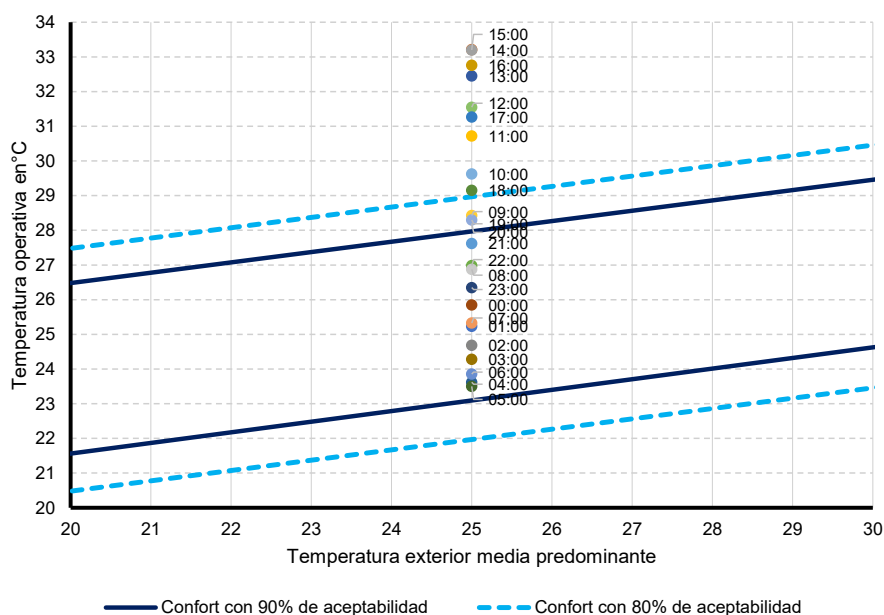
Tabla 2. Día típico elaborado con los valores medios horarios de cada variable y los valores de PMV y PPD obtenidos.

Fuente: elaboración propia.

Fecha	Hora	T _{air}	T _{mr}	V _{air}	HR	Met	Clo	PMV	PPD
Ene 02 -Ene 08	0:00:00	24,7	27,0	0,05	71,01	0,8	1,2	0,40	8,30
Ene 02 -Ene 08	1:00:00	23,9	26,6	0,05	72,18	0,8	1,2	0,2	5,80
Ene 02 -Ene 08	2:00:00	23,5	25,9	0,05	73,40	0,8	1,2	0,1	5,20
Ene 02 -Ene 08	3:00:00	23,0	25,5	0,05	74,25	0,8	1,2	-0,10	5,20
Ene 02 -Ene 08	4:00:00	22,3	24,9	0,05	75,44	0,8	1,2	-0,30	6,90
Ene 02 -Ene 08	5:00:00	22,4	24,6	0,05	76,57	0,8	1,2	-0,30	6,90
Ene 02 -Ene 08	6:00:00	22,5	25,2	0,05	76,28	0,8	1,2	-0,20	5,80
Ene 02 -Ene 08	7:00:00	23,7	26,9	0,05	72,30	0,8	1,2	0,20	5,80
Ene 02 -Ene 08	8:00:00	25,2	28,5	0,10	68,00	1,2	0,6	0,90	22,10
Ene 02 -Ene 08	9:00:00	27,15	29,7	0,10	60,66	1,2	0,6	1,30	40,30
Ene 02 -Ene 08	10:00:00	28,5	30,7	0,10	54,12	1,2	0,6	1,60	56,30
Ene 02 -Ene 08	11:00:00	29,7	31,7	0,10	51,03	1,2	0,6	1,90	72,10
Ene 02 -Ene 08	12:00:00	30,7	32,4	0,20	48,20	1,2	0,6	2,00	76,80
Ene 02 -Ene 08	13:00:00	31,5	33,4	0,20	47,60	1,2	0,6	2,30	88,30
Ene 02 -Ene 08	14:00:00	32,0	34,4	0,20	48,25	1,2	0,6	2,50	93,40
Ene 02 -Ene 08	15:00:00	31,8	34,6	0,20	48,40	1,2	0,6	2,50	93,40
Ene 02 -Ene 08	16:00:00	31,3	34,2	0,20	49,00	1,2	0,6	2,40	91,10
Ene 02 -Ene 08	17:00:00	29,8	32,7	0,20	52,20	1,2	0,6	1,90	72,10
Ene 02 -Ene 08	18:00:00	28,3	30,0	0,20	57,90	1,2	0,6	1,30	40,30
Ene 02 -Ene 08	19:00:00	27,5	29,1	0,20	61,60	1,2	0,6	1,10	30,50
Ene 02 -Ene 08	20:00:00	27,4	29,0	0,10	63,64	1,2	0,6	1,30	40,30
Ene 02 -Ene 08	21:00:00	26,9	28,3	0,10	64,80	1,2	0,6	1,10	30,50
Ene 02 -Ene 08	22:00:00	26,2	27,8	0,10	66,90	0,8	1,2	0,70	15,30
Ene 02 -Ene 08	23:00:00	25,0	27,7	0,10	70,30	0,8	1,2	0,50	10,20

Figura 10. Gráfica de evaluación de confort térmico mediante el modelo adaptativo en el día típico.

Fuente: elaboración propia (2019).



Con los resultados mostrados en las figuras 8, 9 y 10, se concibe que el nivel de aislamiento que tienen estas viviendas en sus envolventes verticales opacas es insuficiente para proveer confort térmico a sus ocupantes. Esto se refuerza con los registros de la T_{mr}, que sobrepasan los límites máximos del rango de confort; incluso, llegan a presentarse valores medidos de hasta 48 °C en la temperatura superficial interna de la fachada oeste.

Por último, otro aspecto transversal a las VIS que se halló en el análisis de la T_{mr}, y que también involucra la protección solar, son las cortas dimensiones de los espacios, que no dan flexibilidad a distribuciones más adecuadas del mobiliario de la alcoba, lo cual hace obligatorio que el cuerpo de los ocupantes quede próximo a las fachadas con mayor temperatura superficial.

Por otro lado, en cuanto a la ventilación natural se encontró que tan solo el 30% de la envolvente está constituida por ventanas, cuando

lo recomendado es el 40%, no solo para ventilar, sino también, para efectos de iluminación natural (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2015). La baja relación ventana-pared se agrava, porque las ventanas son corredizas y solo permiten aprovechar el 50% del vano para ventilar, y bien podrían ser reemplazadas por otras de tipo batiente o en celosía, con las cuales se aprovecharía el 100% y tienen un costo levemente menor. Además, el diseño de las puertas es completamente cerrado, y también podría mejorarse al incluir aberturas superiores e inferiores, para propiciar la ventilación cruzada sin interferir con la privacidad.

Estas características de las VIS multifamiliares que ocasionan las bajas prestaciones de confort térmico son comunes a las mencionadas en los estudios para VIS unifamiliares, según lo expresado en los estudios de Gamboa et al. (2011), Iturre (2013) y Barona (2016); sin embargo, se halla una nueva: la proximidad de los cuerpos de los ocupantes a la envolvente que tiene alta temperatura superficial, situación dada por la disposición del mobiliario planteada en el diseño arquitectónico y por las pequeñas dimensiones en planta del espacio.

En lo que concierne al tema de los modelos evaluativos de confort, se encontró que utilizando el modelo PMV-PPD la sensación térmica del ambiente desde las 13:00 hasta las 17:00 alcanza lo “muy caluroso”, con lo cual los porcentajes de insatisfechos llegan hasta el 93,4%; y durante 14 de las 24 horas del día la aceptación es menor que el 80%. Por su parte, mediante el modelo adaptativo también se encontraron periodos de insatisfacción, pero solo durante 9 de las 24 horas del día. Con lo expuesto, y considerando que lo revisado en el estado del arte señala al modelo adaptativo como el más preciso para evaluar el confort térmico en recintos ventilados naturalmente (Carlucci et al., 2018; Forgiarini Rup et al., 2015), se entiende que usarlo desde las etapas proyectuales significa un ahorro en materiales de aislamiento en la etapa constructiva. También, en la etapa de funcionamiento implica ahorros energéticos y económicos, debido a que el periodo en el cual se programará la climatización mecánica será en el 35% menor. Como se dijo en la primera parte del presente artículo, este tipo de ahorros en materiales y energía es necesario para disminuir la emisión de GEI generados en la producción de materiales de construcción y de electricidad, así como para evitar la construcción de nuevas hidroeléctricas (International Energy Agency, s.f.; Giraldo et al., 2015; Revista *Dinero*, 2019).

Como último punto, cabe mencionar que, pese a las notorias diferencias morfológicas entre tipologías VIS, los resultados obtenidos en el presente estudio al evaluar un espacio de tipología multifamiliar (PMV máximo de 2,5 o muy caluroso y PPD máximo del 93,4%) son levemente menos insatisfactorios, pero muy similares, a los encontrados por Gamboa et al. (2011), Iturre (2013) y Barona (2016) en tipología

unifamiliar, quienes identificaron valores de PMV de entre 2,6 y 3,0 “muy calurosos” y PPD del 95,3% al 100%; sin embargo, esto evidencia que la insatisfacción térmica es un problema generalizado en las VIS relacionado con su diseño, su materialidad y sus sistemas constructivos, y refuerza así lo encontrado por las investigaciones anteriores acerca de lo inconfortable que resulta la permanencia en ellas durante algunos periodos del día.

Conclusiones

Esta investigación monitoreó y evaluó el confort térmico de un ambiente de VIS perteneciente a la tipología multifamiliar en Cali, Colombia, caracterizada por un clima cálido seco, mediante dos modelos: PMV-PPD y adaptativo. Teniendo en cuenta que el estado del arte señala al modelo adaptativo como el más preciso para valorar edificaciones ventiladas naturalmente, se encontró que el modelo PMV-PPD exige aislamientos térmicos mayores y un consumo de energía dedicada a climatización mayor en el 35% que el modelo adaptativo, lo cual debe considerarse en términos de ahorro de recursos y energía para frenar el cambio climático. Esta consideración debe trasladarse también al Reglamento 0549 de Construcción Sostenible, ya que en la actualidad utiliza como modelo el PMV-PPD

Se concluye que la causa principal de los altos niveles de insatisfacción térmica brindados por las VIS multifamiliares a sus ocupantes no es la falta de recursos económicos, sino la falta de innovación y aplicación de los conocimientos de bioclimática.

De esta manera, el estudio esclarece que las viviendas sociales colombianas en climas cálidos requieren intervenciones que mejoren el nivel de confort térmico y garanticen la salubridad; de acuerdo con lo expuesto en la introducción, las mejores soluciones desde los puntos de vista económico y sostenible son las estrategias de enfriamiento pasivo, las cuales requieren poca o ninguna inversión adicional, tales como ventilación natural cruzada, protección solar a elementos vidriados y reducción de la absorptividad y transmitancia térmica a la envolvente.

Finalmente, si en Colombia se quiere disminuir la demanda energética y aportar de verdad desde el sector de la construcción a la reducción del calentamiento global, las VIS deben ser incluidas en el cumplimiento obligatorio del Reglamento de Construcción Sostenible, y no tener cumplimiento optativo, como en el presente. Los resultados de esta investigación, sumados a los de los otros trabajos citados en el estado del arte, justifican la inclusión. En caso de que se incluyan, debe prestarse especial atención a que los ahorros energéticos se relacionen con la prestación de adecuados niveles de confort térmico, lumínico y de calidad del aire a los usuarios. Lo anterior implica intervenir desde la etapa proyectual para edificaciones nuevas y un trabajo remedial para las existentes.

Referencias

- American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioned Engineers [ASHRAE]. (2017). *ASHRAE STANDARD 55-2017 Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta.
- American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning engineers [ASHRAE]. (2001). *Handbook Fundamentals*. Atlanta.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Norma Sismoresistente 2010*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Barona, J. (2016). *Análisis y evaluación del comportamiento térmico de dos envolventes arquitectónicas utilizadas en la vivienda de interés social en santiago de Cali*. (tesis de Maestría). Santiago de Cali, Universidad del Valle.
- Carlucci, S., Bai, L., de Dear, R., y Yang, L. (2018). Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents. *Building and Environment*, 137, 73-89. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>
- Congreso de Colombia. (1997, 18 de julio). *Ley 388 de 1997. Ley de desarrollo territorial*. Diario Oficial 43.091, de 24 de julio de 1997. http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0388_1997.html
- Departamento Nacional de Estadística (DANE). (Febrero de 2017). DANE. <http://www.dane.gov.co>
- Department of Technology and Built Environment, Laboratory of Ventilation and Air Quality - University of Gävle. (s.f.). *PMV Calc v2*. Gävle.
- Dunkle, R. (1963). Configuration factors for radiant heat-transfer calculations involving people. *Heat Transfer*, 85(1), 71-76. <https://doi.org/10.1115/1.3686012>
- Echeverry Campos, D., y MetroVivienda. (2000). *Vivienda de interés social: Inventario de sistemas constructivos*. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Area de Ingeniería y Gerencia de la Construcción.
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort*. Mc Graw Hill.
- Forgiarini Rup, R., Giraldo Vásquez, N., y Lamberts, R. (2015). A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*, 105, 178-205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>
- Gamboa, J., Rosillo, M. E., Herrera Cáceres, C. A., López Bernal, O., y Iglesias, V. (2011). *Confort ambiental en vivienda de interés social en Cali*. Universidad del Valle.
- García López, J. D., Stand Villareal, F., Gómez Cabrera, A., y Nuñez Moreno, F. A. (2016). *Comparación de los principales sistemas constructivos de VIS en Colombia, desde una perspectiva de sostenibilidad, empleando BIM: caso estudio en Soacha*. Pontificia Universidad Javeriana. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/19639>
- Giraldo, C., Bedoya, C., y Alonso, L. (2015). Eficiencia energética y sostenibilidad en la Vivienda de Interés Social en Colombia. En *Greencities & Sostenibilidad Convocatoria de Comunicaciones Científicas* (pp.155-180). Universidad Politécnica de Madrid. <http://oa.upm.es/42543/>
- Giraldo, W., y Herrera, C. (2017). Ventilación pasiva y confort térmico en vivienda de interés social en clima ecuatorial. *Ingeniería y desarrollo*, 35(1), 77-101. <http://dx.doi.org/10.14482/inde.35.1.8944>
- Givoni, B. (1976). *Man, climate and architecture*. Applied Science Publishers.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Tiempo y Clima en Colombia [IDEAM]. (16 de mayo de 2016). IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima,2016>.
- International Energy Agency. (s.f.). *International Energy Agency*. <https://www.iea.org/statistics/?country=INDIA&year=2016&category=Energy%20consumption&indicator=TFCShareBySector&mode=chart&dataTable=BALANCES>
- International Organization for Standardization. (2002). *ISO 7726: Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities*. International Organization for Standardization.
- International Organization for Standardization. (2005). *Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local (ISO 7730:2005)*. International Organization for Standardization.
- Iturre Campiño, A. (2013). *Proyectar mejoras del confort térmico en la vivienda de interés social Buenaventura Caso: Barrio ciudadela Nueva Buenaventura*. Cali.
- Kaushik, A., Arif, M., Tumula, P., y Ebohon, O. J. (2020). Effect of thermal comfort on occupant productivity in office buildings: Response surface analysis. *Building and Environment*, 180, 107021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107021>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Colombia. (2011). *Calidad en la vivienda de interés social* (Series Guías de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social). Nuevas Ediciones S.A.
- Ministerio de Minas y Energía. (2009). *Resolución 18 1331 del 6 de agosto. Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público*. https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23931303/RES181331_2009.pdf/53f7e906-94de-4cba-959d-ef45b04e93c6
- Ministerio de Minas y Energía. (2013). *Resolución 90708 del 30 de agosto. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE*. <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/1179442/Anexo+General+del+RETIE+vigente+actualizado+a+2015-1.pdf/57874c58-e61e-4104-8b8c-b64dbabedb13>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015). *Resolución 0549 - Parámetros y lineamientos de construcción sostenible - Guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones. Reglamento del Capítulo 1 del Título 7 de la parte 2, del libro 2 del Decreto 1077 de 2015*. https://camacol.co/sites/default/files/Resoluci%C3%B3n%20549%20del%2010072015_0.pdf
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MINVIVIENDA). (2020). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)*. <http://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua/reglamento-tecnico-del-sector/reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable>
- Olgyay, V. (1998.). *Arquitectura y clima: Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Gustavo Gili.
- Ormandy, D., y Ezratty, V. (2012). Health and thermal comfort: From WHO guidance to housing strategies. *Energy Policy*. 116-121. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.003>
- Planeación Municipal, Alcaldía de Santiago de Cali. (2014). *Plan de Ordenamiento Territorial de Cali*. http://www.cali.gov.co/planeacion/publicaciones/106497/pot_2014_idesc/
- Revista *Dinero*. (24 de 1 de 2019). Los desafíos ambientales en Hidroituango. <https://www.dinero.com/edicion-impresa/pais/articulo/el-impacto-ambiental-por-la-emergencia-de-hidroituango/266409>
- Santamouris, M., y Asimakopoulos, D. (2001). *Passive cooling of buildings*. James & James.
- Sistema Intercomunicado Nacional. (22 de Febrero de 2018). *Sistema Intercomunicado Nacional*. <http://informesanuales.xm.com.co/2015/SitePages/operacion/2-4-Generaci%C3%B3n-del-SIN.aspx>
- United Nations Commission on Human Settlements (ONU). (2011). *Informe mundial sobre asentamientos humanos: Las ciudades y el cambio climático: orientaciones para políticas. Programa de las Naciones Unidas para los asentamientos urbanos*. <https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/onu/538-spa-ed2011-sum.pdf>

Listado de siglas

- ASHRAE American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioned Engineers.
- Clo Nivel de aislamiento térmico por vestimenta 1 Clo=0,155m²C/W.
- GEI Gases de efecto invernadero.
- Hr Humedad relativa.
- Met Tasa metabólica.
- PMV Índice de sensación térmica (por las iniciales en inglés de Predicted Mean Vote).
- PPD Índice de personas insatisfechas (por las iniciales en inglés de Predicted Percentage Dissatisfied).
- T_{air} Temperatura del aire, o bulbo seco.
- T_{mr} Temperatura media radiante.
- T_{op} Temperatura operativa.
- TRM Tasa representativa del mercado.
- V_{air} Velocidad del aire.
- VIS Vivienda de interés social.

