



Impacto del cambio climático en el desempeño térmico de viviendas según su nivel de altura

Impact of Climate Change on the Thermal Performance of Houses According to their Altitude Level

Manuela Murillo Galvis, Juan Sebastián Calle Medina, Santiago Jaramillo Betancourt, María Alejandra Garavito Posada y Elizabeth Parra Correa

RESUMEN: La construcción de viviendas de interés social (VIS) en Colombia ha desarrollado tipologías que redunden en mayor eficiencia constructiva y económica, sin diferir en el diseño según la ubicación. Esta contribución evalúa el desempeño térmico de una vivienda replicada en diferentes niveles de un proyecto en Bello, Antioquia, Colombia. Se realizaron mediciones en el sitio, y se utilizó el software RHINO 3D con Grasshopper para la evaluación según el cambio climático (años 2050 y 2080). En el piso intermedio, la sala presenta un 74% del tiempo en confort en el escenario actual y un 24% en situación de frío. Sin embargo, si esta se ubica en el último nivel, el tiempo en confort disminuye al 67%. En el escenario 2080 el tiempo en confort se incrementa en el caso base, pero disminuye en el último nivel. Estos resultados invitan a considerar el diseño de forma diferenciada para las viviendas según la altura.

PALABRAS CLAVE: desempeño térmico, vivienda de interés social, tipología, niveles, cambio Climático

ABSTRACT: The construction of social housing (VIS) in Colombia has developed typologies that result in greater constructive and economic efficiency, without differing in design depending on the location. This contribution evaluates the thermal performance of a house replicated at different levels of a project in Bello, Antioquia, Colombia. Measurements were made at the site, and RHINO 3D software with Grasshopper was used for the evaluation according to climate change, (years 2050 and 2080). On the intermediate floor, the living room provides 74% of the time in comfort in the current scenario and 24% in a cold situation. However, if it is located on the top level, the time in comfort decreases to 67%. In the 2080 scenario, the time in comfort increases in the base case, but decreases in the last level. These results invite us to consider the design in a differentiated way for the houses according to the height.

KEYWORDS: thermal performance, social housing, typology, levels, climate Change.

RECIBIDO: 10 diciembre 2022

ACEPTADO: 15 febrero 2023

Introducción

El confort térmico de una vivienda tiene gran influencia en el bienestar de los ocupantes de acuerdo con la calidad ambiental interior, existiendo vínculos entre la exposición a temperaturas interiores bajas o altas con las afectaciones en la salud y el bienestar, que tienen, como alerta principal, el aumento de temperatura debido al cambio climático.

Estas variaciones del clima producidas por la influencia humana han tenido un ritmo sin precedente. Según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), el calentamiento global probablemente alcanzará los 1,5 °C entre 2030 y 2052, poniendo a las comunidades vulnerables en un riesgo desproporcionadamente mayor de sufrir consecuencias adversas relacionadas con el clima.

En el más reciente Reporte sobre cambio climático – AR6, se llama la atención sobre la necesidad de extremar medidas para garantizar un aumento de la temperatura por debajo de 1,5°C. Para esto, sería necesario reducir, de manera inmediata, las emisiones de gases efecto invernadero [1]. Lo anterior sugiere la revisión de la vulnerabilidad de las viviendas, tanto las de nuevas edificaciones, como en la habitabilidad de las existentes, en contextos de cambio climático, mediante estrategias pasivas que disminuyan el consumo de energía por refrigeración y la emisión de gases de efecto invernadero.

La construcción de viviendas de interés social en Colombia se ha basado principalmente en la estandarización, para responder a la alta demanda y a los límites económicos que esta tipología presenta. En el país, según la Guía No 2 de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social, del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, se requiere que toda construcción cuente con materiales apropiados que garanticen el confort de los habitantes, al igual que un adecuado desempeño térmico, acústico y lumínico [2, p.47].

Al priorizar la construcción de este tipo de viviendas sólo en el aspecto de la masificación, se dejan de lado las necesidades de confort climático del usuario, y con el tiempo es posible que la vivienda no sea sostenible para las personas [3].

En la última década, los proyectos de vivienda de interés social en América Latina han dado prioridad a la cantidad, y no la calidad de estas, y por tanto, el diseño arquitectónico ha quedado relegado a un segundo plano [4], generando que las viviendas tengan un diseño similar, sin diferencias relacionadas con el lugar de implantación y las implicaciones ambientales que se derivan del contexto. Por otra parte, en la selección de los materiales a utilizar en su construcción y/o en los acabados, se priorizan las variables de tipo económico sobre las variables que pueden tener una gran influencia, como el nivel de implantación o el análisis del piso térmico.

En lo que respecta a la normativa para las construcciones de viviendas sostenibles en Colombia, debe mencionarse la Resolución 0549 de 2015 que busca, a partir de incentivos económicos, que en las nuevas edificaciones se generen estrategias pasivas y activas para el ahorro de agua y energía. [5 p.56]. Esta norma adopta como clasificación climática de Colombia, la Tipo Caldas, una de las utilizadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, que se basa en el factor térmico, es decir que, que hay una variación en la temperatura de un lugar de acuerdo con la altitud de este, por lo cual se establecen unos tipos de pisos térmicos: cálido, templado, frío, muy frío, y extremadamente frío [6, p.266]. Dentro de las edificaciones que acoge la resolución, se encuentran las viviendas de interés social – VIS, las cuales deberán lograr como porcentajes mínimos

- [1] IPCC Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report. Climate Change 2021: The Physical Science Basis [report multimedia]. 2021 [consultado: 4 mayo 2022]. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf
- [2] Díaz Reyes CA, Ramírez Luna JA (editores). Los materiales en la construcción de vivienda de interés social. Guías de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social. No. 2. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; 2011. Disponible en: https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/2020-07/guia_asis_tec_vis_2.pdf
- [3] Giraldo C, Bedoya C, Alonso LA. Eficiencia Energética y Sostenibilidad en la Vivienda de Interés Social en Colombia. En: Libro de Ponencias: Greencities & Sostenibilidad. Inteligencia aplicada a la sostenibilidad urbana. Convocatoria de Comunicaciones Científicas. Málaga: Palacio de Ferias y Congresos de Málaga-Ayuntamiento de Málaga; 2015. pp.155-180. [Consultado: 25 de abril de 2022]. Disponible en: https://oa.upm.es/42543/1/INVE_MEM_2015_229809.pdf
- [4] Pérez AL. El diseño de la vivienda de interés social. La satisfacción de las necesidades y expectativas del usuario. Revista de Arquitectura [Internet]. 2016 [consultado: 25 de abril de 2022]; 18(1):[67-75 pp.]. Disponible en: <https://doi.org/10.14718/RevArq.2016.18.1.7>
- [5] Resolución 0549 de 2015. Por la cual se reglamenta el Capítulo 1 del Título 7 de la parte 2, del Libro 2 del Decreto 1077 de 2015, en cuanto a los parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adopta la Guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones. Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. República de Colombia. Bogotá, 2015. [Consultado: 3 de abril de 2022]. Disponible en: <https://ismd.com.co/wp-content/uploads/2017/03/Resoluci%C3%B3n-549-de-2015.pdf>
- [6] Moreno G, González OC, Cadena M, Benavides H, Ruiz F, Montealegre E, Ortiz JC, Montoya RD. Atlas Climatológico de Colombia. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM; 2017. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023777/CLIMA.pdf>

de ahorro (optativo) los siguientes: en clima frío, en clima cálido seco y en clima cálido húmedo, el 20%, y en clima templado, el 15%.

Según la Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono, las políticas nacionales para lograr las metas incluyen ciertos requerimientos, tales como realizar auditorías energéticas periódicas, promover certificaciones que tengan un concepto de neto cero carbono operacional para edificaciones existentes y desarrollar códigos de eficiencia energética para las remodelaciones, así como el desarrollo de acciones nacionales de tecnologías y capacidades para lograr las metas.

Sin embargo, la especificación de la diferenciación en el diseño de las tipologías de edificaciones según el nivel de ubicación en altura y la relación con su contexto debería también ser considerada como estrategia para contrarrestar los efectos del cambio climático y el aumento de temperatura, además de reducir el consumo energético por refrigeración en las tipologías en las que se podría presentar un aumento de temperatura considerable [7]. Según el sexto reporte del IPCC, en el escenario más crítico se podría tener un aumento en la temperatura promedio de hasta 4 grados sin alcanzar un pico de crecimiento en 2100, con tendencias en aumento, lo que modificaría drásticamente las condiciones de habitabilidad actuales.[8]

Los elementos con mayor ganancia térmica en climas tropicales son las cubiertas, que reciben cuatro veces más radiación solar directa que las paredes. La diferenciación en el diseño de las tipologías de edificaciones según el nivel de ubicación en altura debe tener en cuenta esto para trazar una ruta de incorporación de estrategias [9].

De acuerdo con lo anterior, el objetivo de la investigación fue evaluar las consecuencias de las dinámicas actuales de construcción en altura de la vivienda de interés social, con un alto desarrollo en las ciudades en expansión y urbanizaciones masivas, donde no hay diferenciación respecto a la altura y el nivel de localización de los apartamentos. Se quiere tener conocimiento del desempeño térmico y el confort en cada una de las viviendas para identificar el nivel de vulnerabilidad al cambio climático y a la posibilidad de estar más tiempo en confort según el modelo adaptativo. Es necesario minimizar los efectos del cambio climático en ambientes interiores, principalmente en entornos con un crecimiento acelerado, como son las ciudades suramericanas, en donde los habitantes sufren incomodidad frente al ambiente térmico en las viviendas, debido al aumento de temperatura por las islas de calor [10].

Esto permitiría, adicionalmente, la elaboración de estrategias y herramientas de diseño a incorporar en los proyectos, para identificar los puntos diferenciadores según el nivel de intervención en altura y la diferenciación del contexto medioambiental como factores determinantes de la sostenibilidad de las viviendas a lo largo del tiempo, y su adaptación al cambio climático.

Es importante resaltar que los materiales deben contar con propiedades térmicas apropiadas al clima y al modelo de la edificación, para lograr un buen desempeño o confort térmico. La evaluación de la materialidad actual de las construcciones no difiere respecto al lugar o el nivel de altura de implantación de la vivienda. Lo anterior puede llegar a ser un determinante y un camino para seguir en investigaciones futuras.

El grupo de investigación de la Universidad EIA analizó varias viviendas en el Valle de Aburrá, evidenciando que presentaban una inercia térmica baja, con fluctuaciones en la temperatura interna en las diferentes horas del día. La mayoría del tiempo, la temperatura se mantuvo por debajo del intervalo de confort [11]. Se tuvo como premisa que con el cambio climático

[7] Ospina A, Arroyave N, Pupo L, Ferro M, Lizcano JD, Uribe S. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial. Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono. Bogotá: Consejo Colombiano de Construcción Sostenible; 2022. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/1P4XKXmH9dGk9A003xnKM8sL2Lrxs3RF9/view>

[8] IPCC Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022. [Consultado: 4 de mayo de 2022]. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SPM.pdf

[9] Hashemi A. Assessment of solar shading strategies in low-income tropical housing: the case of Uganda. *Engineering Sustainability* [Internet]. 2019 [consultado: 23 de abril de 2023]; 172(6):293-301. Disponible en: <https://doi.org/10.1680/jensu.17.00072>

[10] Nieto-Barbosa V, Cubillos-González R, Barrios-Salcedo R. Aspectos de diseño resiliente aplicados a la envolvente que determinan el confort térmico en las viviendas sociales. *Revista Ingeniería de Construcción RIC* [Internet]. 2021 [consultado: 23 de abril de 2023]; 36(2). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732021000200197>

[11] Lopera F, Rivas S. Mejoramiento del desempeño térmico en viviendas de estrato 1: caso de estudio vivienda ubicada en San Félix [trabajo de grado]. Envigado-Antioquia: Universidad EIA de Envigado; 2021. Disponible en: <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/4181>

y el aumento de temperatura, el desempeño térmico varíe en beneficio del confort. Sin embargo, se debe contar con las herramientas y los conocimientos necesarios que permitan la sostenibilidad del confort en el tiempo.

Materiales y método

Se evaluó un conjunto residencial en el municipio de Bello, Antioquia, que permite la identificación de una tipología de vivienda de interés social que se repite con diferentes orientaciones en el conjunto, permitiendo el análisis del desempeño térmico en los diferentes niveles. Se consideró representativa la ubicación del edificio para la evaluación del comportamiento a lo largo del tiempo, según el cambio climático, por la similitud de conjuntos residenciales asentados en la montaña, debido a su topografía, y por la construcción masiva de vivienda de interés social (VIS).

Para el caso de estudio se tomó el proyecto Colina de los búcaros, ubicado en el municipio de Bello, Antioquia, Colombia. Este lugar tiene un clima templado cálido durante todo el año, en el que la temperatura promedio varía entre 20,7°C y 23,8°C. El conjunto residencial cuenta con torres de 21 niveles de altura y con una tipología de apartamentos replicada en diferentes orientaciones distribuidos en los diferentes niveles. Los apartamentos tienen la posibilidad de ser ventilados naturalmente de forma permanente y en los momentos de preferencia de los habitantes. El objetivo fue analizar la influencia de la ubicación en altura de la misma tipología de vivienda en escenarios de cambio climático.

En la presente investigación se tomaron como casos de estudio: un apartamento ubicado en el piso 1 (nivel 0,0m), un apartamento del piso 16, que es un piso intermedio (nivel 48m), y un apartamento ubicado en el piso 21, el último del edificio, (nivel 63m). El piso 16 de la torre de viviendas fue el escenario base en el que se realizaron las mediciones en sitio por medio de la instalación de sensores.

El edificio no cuenta con un contexto de gran altura a su alrededor, su construcción es reciente, y los habitantes llevaban dos semanas habitando el apartamento, aspecto a considerar por el estado de los materiales.

Los habitantes de las viviendas son tres personas en edad adulta, una de ellas es adulta mayor y es quien permanece mayor cantidad de tiempo en el espacio, a quien se aplicó la encuesta de satisfacción con el ambiente térmico.

La fachada principal de los apartamentos evaluados tiene una orientación noreste, que se considera privilegiada, ya que no recibe radiación solar directa especialmente en las horas de la tarde. (Figura 1) (Tabla 1)

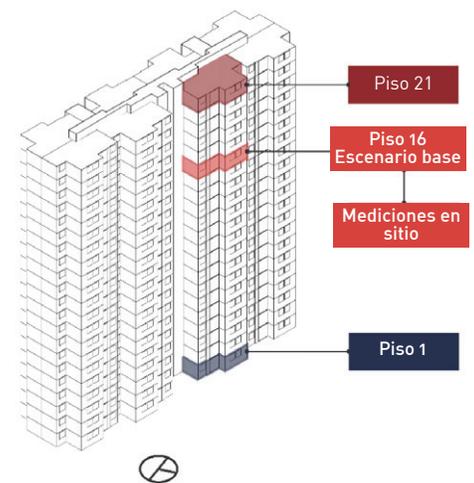


Figura 1. Niveles de apartamentos evaluados. Elaboración propia.

Tabla 1. Materialidad del proyecto.

Materialidad del proyecto	Estructura	Muros en concreto y losas nervadas
	Fachadas	Ladrillo a la vista 12*24*33, ladrillo con revoque y pintura
	Interior	Ladrillo a la vista 12*24*33, ladrillo con revoque y pintura
	Piso	Porcelanato imitación madera 90*40
	Puerta	Puerta de acceso metálica blanca calibre 22
	Ventanas	Perfiles de aluminio natural con vidrio claro

Fuente: Elaboración propia.

La metodología implementada es de tipo cuantitativo y se basa principalmente en simulaciones computacionales y análisis de datos, con un enfoque prospectivo respecto al análisis en el tiempo. Por medio de mediciones en el sitio se hizo un acercamiento a la temperatura específica del lugar, para tener conocimiento de microclima según la ubicación del apartamento haciendo una valoración de los resultados de temperatura en el año 2022, en que se hizo la investigación, y en los años 2050 y 2080 como escenarios futuros, para evaluar la variación del desempeño térmico y el tiempo en estado de confort de acuerdo con el cambio climático.

Levantamiento arquitectónico

Se realizó un levantamiento arquitectónico de la vivienda ubicada en el piso 16 como vivienda base, se tomaron las dimensiones en planta, sección y cubierta necesarias para construir el modelo digital tridimensional. En el levantamiento arquitectónico se identificaron las propiedades térmicas de los materiales, el área de aberturas y el tipo de cerramiento de estas. Se identificaron adicionalmente, los sistemas constructivos del espacio con los espesores, y las rutinas de ocupación del espacio que se incorporaron como insumo de la composición real de las viviendas en el modelo.

Mediciones en el sitio

Se hicieron mediciones de tipo continuo en la vivienda en el piso 16 durante 2 semanas, del 5 de marzo hasta el 16 de marzo. Los sensores se dispusieron en los espacios interiores más usados en las horas del día la vivienda. El sensor termohigrómetro HOBO identificado en la figura 2 como el número 3, ubicado en la alcoba 3, permitió registrar la temperatura (°C) y la humedad relativa (%) con mediciones cada hora, ubicado a una altura de 1,70m del suelo. El termohigrómetro HOBO número 2, se le incorporó una termocupla para registrar la temperatura radiante y evaluar la transferencia de calor por radiación de las superficies adicional a las mediciones de temperatura (°C) y humedad relativa (%). Este se ubicó en la sala-comedor a una altura de 1,70m con el registro de datos recolectados cada hora. El termohigrómetro de exterior HOBO se ubicó en el balcón para obtener resultados de las condiciones de microclima específicas del apartamento, ubicado a 2,20m de altura, con registros cada hora de temperatura (°C) y humedad relativa (%). (Figura 2)

Construcción del modelo y parámetros de simulación

Con base en el levantamiento arquitectónico realizado y las mediciones en sitio, se construyó el modelo computacional en el software Rhino y las simulaciones de desempeño térmico se realizaron en el *plugin* Grasshopper. Esta herramienta permite especificar el uso, la materialidad, las cargas de equipos y las

diferentes rutinas de utilización del espacio como operación de las ventanas, entre otros. El programa permitió incorporar las rutinas y cargas del modelo con especificación de los diferentes niveles evaluados para la puesta en paralelo del desempeño térmico de los mismos. (Figura 3)

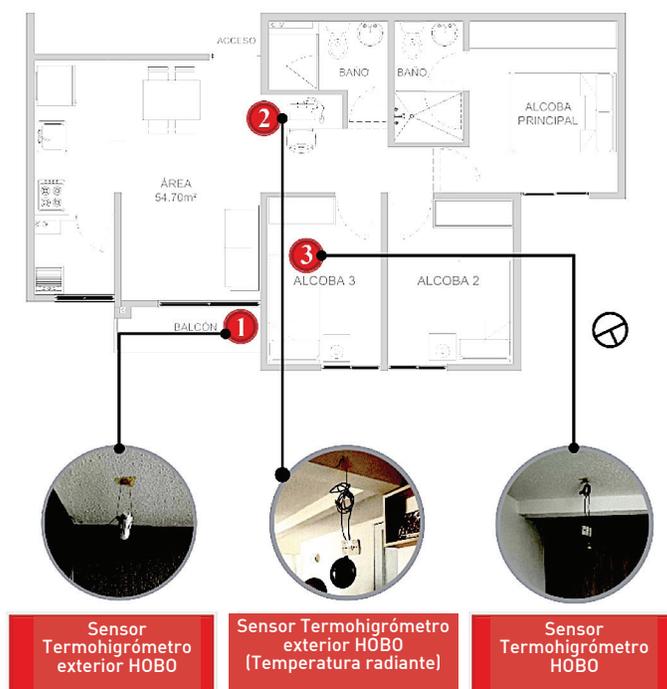


Figura 2. Ubicación sensores en la vivienda en el piso 16. Fuente: Elaboración propia.

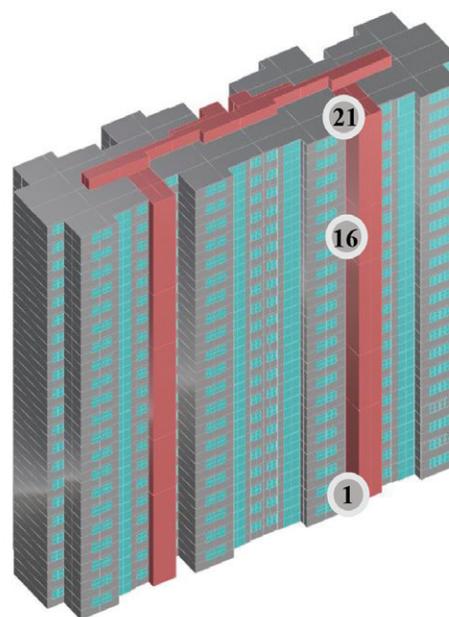


Figura 3. Modelo torre residencial software Rhino. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Tabla 2, se describen los parámetros ingresados al modelo de acuerdo con el escenario base en cada uno de los niveles evaluados de la tipología.

Tabla 2. Configuración del caso base de simulación en los diferentes niveles.

Descripción	Apartamento piso intermedio
Tipo de edificación	Vivienda/ piso 16
Orientación de la fachada principal	Noroeste
Losa entrepiso	150 mm en concreto, densidad 2400 kg/m ³ conductividad de 2 W/m-K Calor específico 950 J/kg-K, rugosidad media
Muros	Ladrillo de 12cm densidad 1920 kg/m ³ conductividad de 0,89 W/m-K Valor U: 6.14, rugosidad media, más estuco de 2cm.
Fachada principal	Vidrio claro, Valor U: 5.7 W/m ² -K, SHGC 0.88
	Perfiles de aluminio natural con vidrio claro.
Descripción	Apartamento primer piso
Tipo de edificación	Vivienda/ piso 1
Orientación de la fachada principal	Noroeste
Losa entrepiso	150 mm en concreto, densidad 2400 kg/m ³ conductividad de 2 W/m-K Calor específico 950 J/kg-K, rugosidad media
Muros	Ladrillo de 12cm densidad 1920 kg/m ³ conductividad de 0,89 W/m-K Valor U: 6,14, rugosidad media, más estuco de 2cm.
Fachada principal	Vidrio claro, Valor U: 5,7 W/m ² -K, SHGC 0.88
	Perfiles de aluminio natural con vidrio claro.
Losa contrapiso	300 mm en concreto, densidad 2400 kg/m ³ conductividad de 2 W/m-K Calor específico 950 J/kg-K, rugosidad media
Descripción	Apartamento último piso
Tipo de edificación	Vivienda/ piso 21
Orientación de la fachada principal	Noroeste
Losa entrepiso	150 mm en concreto, densidad 2400 kg/m ³ conductividad de 2 W/m-K Calor específico 950 J/kg-K, rugosidad media
Muros	Ladrillo de 12cm densidad 1920 kg/m ³ conductividad de 0,89 W/m-K Valor U: 6,14, rugosidad media, más estuco de 2cm.
Fachada principal	Vidrio claro, Valor U: 5,7 W/m ² -K, SHGC 0,88
	Perfiles de aluminio natural con vidrio claro.
Losa cubierta	200 mm en concreto, densidad 2400 kg/m ³ conductividad de 2 W/m-K Calor específico 950 J/kg-K, rugosidad media.

Fuente: Elaboración propia.

Rutinas

Para el análisis y la implementación de las rutinas en el software se determinaron las mismas para los tres apartamentos, con la intención de compararlos entre sí, y determinar si estas contaban con iguales condiciones de desempeño térmico. (Tabla 3)

Tabla 3. Rutinas en la vivienda

Rutinas Apartamento												
Hora	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Ocupación	100%	100%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%
Equipos	50%	50%	50%	0%	0%	0%	75%	75%	0%	33%	33%	33%
Iluminación	50%	50%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Operación de ventanas	0%	0%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Rutinas Apartamento												
Hora	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00
Ocupación	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Equipos	33%	75%	75%	75%	75%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Iluminación	75%	75%	75%	75%	75%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%
Operación de ventanas	100%	75%	20%	20%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Fuente: Elaboración propia.

Calibración del modelo

Para la construcción del modelo de la vivienda en el software se utilizaron los datos obtenidos de las mediciones realizadas en el sitio. Los resultados de las mediciones del sensor exterior se compararon con el archivo climático, con el fin de analizar si éste se acoplaba a la temperatura real del espacio según el microclima y el contexto. Los resultados de las mediciones interiores se compararon con los resultados de las simulaciones, para evaluar si las propiedades térmicas y rutinas cargadas en el modelo permitían un acercamiento al desempeño térmico real del espacio.

Los diferentes niveles se evaluaron de acuerdo con las mediciones en sitio del nivel intermedio y las rutinas, cambiando las especificaciones de los materiales según los elementos implicados como el suelo y la cubierta, y el nivel de altura en el que se encontraban.

Escenarios evaluados

Con el fin de validar el desempeño térmico de los apartamentos ubicados en diferentes niveles del edificio de acuerdo con el cambio climático, se estableció para los tres niveles un escenario base, con el análisis del desempeño térmico en el año 2022, analizando las diferentes características y los resultados de la tipología de vivienda según la altura en la que se encuentra ubicada, siendo el primer nivel en contacto con el terreno, el nivel intermedio ubicado en el piso 16 y el último nivel de cubierta del proyecto ubicado en el piso 21. El escenario 2 para los tres niveles, fue la evaluación del desempeño térmico y zona de confort en el 2050 con el aumento de temperatura para dicho año, y como escenario final, el número 3, se evaluó el desempeño térmico en el año 2080. Estos resultados fueron puestos en

paralelo en primer lugar según la zona evaluada en la vivienda, siendo la habitación o la sala, y posterior a esto, una comparación de los resultados según el desempeño térmico de los diferentes niveles.

Modelo de confort

En una fase posterior de análisis los resultados fueron evaluados bajo el modelo de confort adaptativo estipulado en el estándar ASHRAE 55. El modelo adaptativo se basa en la temperatura promedio exterior, en este caso se implementaron los datos de temperatura extraídos del archivo climático de Ruta N correspondiente a la ciudad de Medellín, analizando previamente en la etapa de calibración del modelo la correspondencia con las mediciones en sitio de los resultados de los sensores y el resultado de las simulaciones. Este modelo aplica exclusivamente para espacios ventilados naturalmente.

La zona de confort adaptativo se calcula con la siguiente ecuación (1):

$$T_c = 17,8 + (0,31 \times T_m) \quad (1)$$

T_c representa la temperatura de confort y T_m representa la temperatura media exterior del lugar. Este modelo considera que los seres humanos son capaces de adaptarse al entorno que habitan. Se calcula los rangos de confort para la zona de confort 90% de aceptabilidad y el 80% de aceptabilidad, estas se calcularon con las siguientes fórmulas (2)-(3):

$$90\% = Z_c = T_c \pm 2,5^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$80\% = Z_c = T_c \pm 3,5^\circ\text{C} \quad (3)$$

El cálculo de la zona de confort, por medio del confort adaptativo, se realizó con la premisa de la adaptación del ser humano al incremento de temperatura y a los cambios climatológicos, teniendo el cálculo del promedio de temperatura anual con los resultados obtenidos en cada año. Sin embargo, el debate se encuentra abierto, se piensa que esta adaptación llegará hasta un punto, y no será posible adaptarse más al aumento de temperatura desenfrenado. También se consideraron los límites de adaptación a la temperatura que plantea la norma, con valores entre 10°C y $33,5^\circ$, analizándose si en alguno de los años evaluados esta temperatura era superada.

Análisis de resultados

El análisis de los resultados de las simulaciones se realizó por medio de diagramas de cajas y bigotes, estos permiten visualizar el desempeño térmico del espacio en distintos escenarios e identificar los datos extremos y que tan estables se encuentran en el periodo de tiempo evaluado.

Resultados y discusión

En el registro del sensor interior ubicado en la sala, se identifica gran similitud en comparación con la simulación en el caso base. El tiempo graficado y simulado son los días correspondientes a la medición, del día 5 al 16 de marzo del 2022. Se identifica el espacio de la habitación como un buen espacio de análisis de resultados por la similitud con la simulación lograda.

En la figura 5, de las gráficas relacionamiento se comparan el resultado de temperatura del sensor ubicado en la sala con el resultado de la simulación del caso base con el archivo climático. Igualmente, en la figura 4, se observan las comparaciones de los resultados de la simulación con las mediciones, y se logra identificar la similitud que posibilita el uso para su evaluación en el año 2050 y 2080. (Figuras 4 y 5)

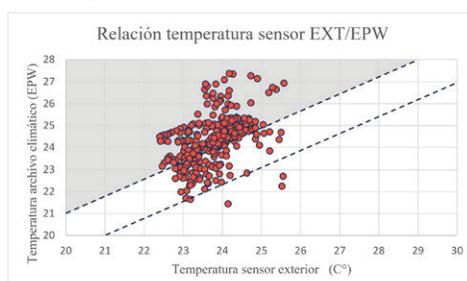
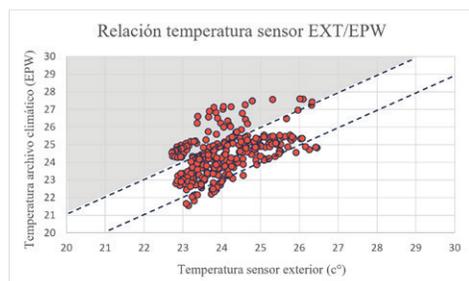
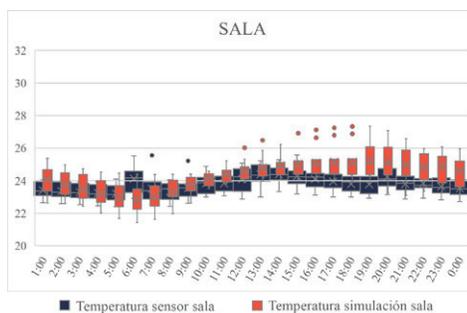
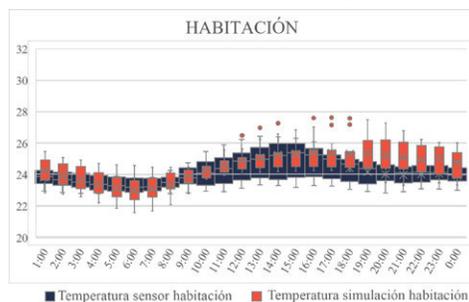


Figura 4. Relación temperatura habitación. Elaboración propia.

Figura 5. Relación temperatura sala. Elaboración propia.

Tabla 4. Rango de confort diferentes años.

Promedio anual	Confort actual	
23,26	Confort 80+	28,5
	Confort 90+	27,5
	Confort	25,0
	Confort 90-	22,5
	Confort 80-	21,5
Promedio anual	Confort 2050	
25,07	Confort 80+	29,1
	Confort 90+	28,1
	Confort	25,6
	Confort 90-	23,1
	Confort 80-	22,1
Promedio anual	Confort 2080	
25,72	Confort 80+	29,3
	Confort 90+	28,3
	Confort	25,8
	Confort 90-	23,3
	Confort 80-	22,3

Fuente: Elaboración propia.

Zona de confort

En los resultados de temperatura por simulaciones se utilizó el confort adaptativo de ASHRAE-55-2010 para determinar el porcentaje en confort en los distintos espacios simulados. (Tabla 4)

El cálculo de la zona de confort, por medio del confort adaptativo, se realizó con la premisa de la adaptación del ser humano al incremento de temperatura y a los cambios climatológicos, teniendo el cálculo del promedio de temperatura anual con los resultados obtenidos en cada año, sin embargo, el debate se encuentra abierto, se piensa que esta adaptación llegará hasta un punto, y no será posible adaptarse más al aumento de temperatura desenfrenado.

En los espacios de la sala y la habitación las distintas tipologías de apartamentos tienen los mismos comportamientos térmicos en las proyecciones de cambio climático. En la vivienda de primer piso se observa que en la situación actual presenta bajos niveles de confort, esto debido a la cantidad de horas que se encuentra por debajo del rango de temperatura de zona de confort, en los años posteriores analizados se evidencia una tendencia que apunta hacia una mejoría en el tiempo en confort por el aumento de la temperatura.

En la vivienda ubicada en el piso intermedio de la edificación se puede ver que entre el periodo actual y el escenario de cambio climático 2050 existe una considerable mejoría en el tiempo de confort y en el periodo entre el 2050 y 2080. A pesar de que existe un aumento en la cantidad de horas en confort es mucho menor al periodo anterior, lo que se evidencia principalmente en el espacio de la sala. (Figuras 6, 7, 8 y 9)

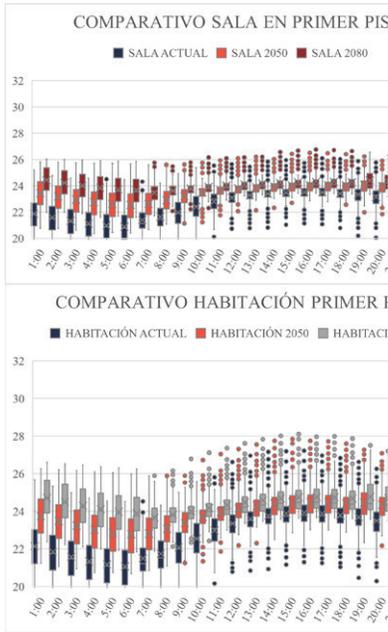


Figura 6. Apartamento primer piso. Fuente: Elaboración propia.

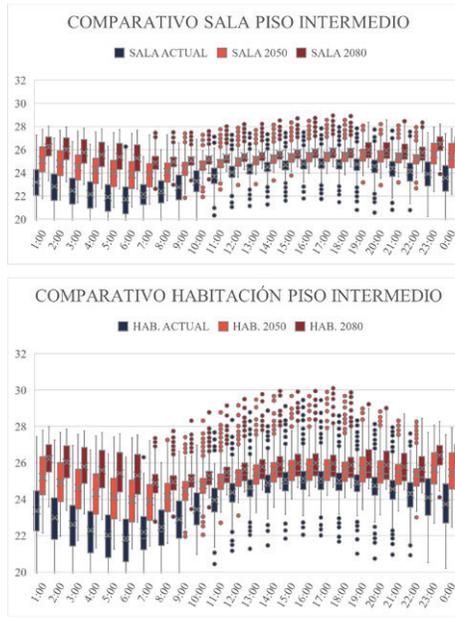


Figura 7. Apartamento piso intermedio. Elaboración propia.

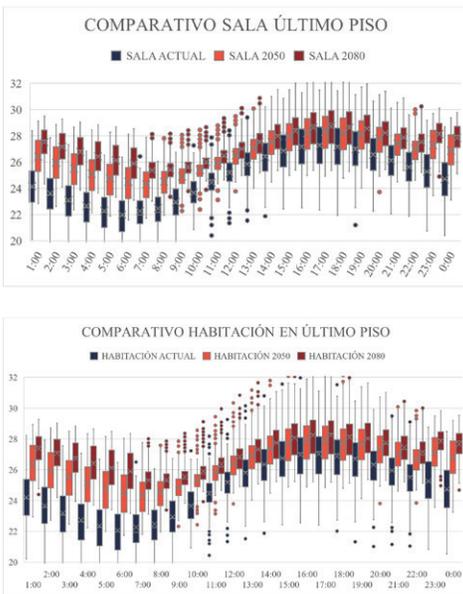


Figura 8. Apartamento último piso. Elaboración propia.

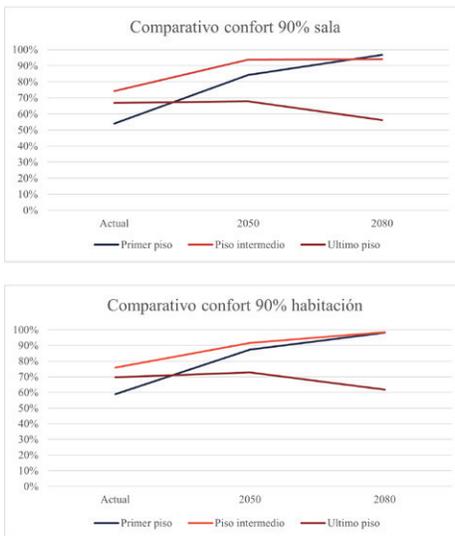


Figura 9. Comparativo porcentaje de horas en confort 90%. Elaboración propia.

El escenario que presenta un comportamiento negativo en relación con el tiempo en confort con las variaciones a lo largo de los años por cambio climático es el apartamento ubicado en el último nivel. Los resultados muestran que los espacios de la vivienda actualmente se encuentran gran cantidad del tiempo en zona de confort; sin embargo, en el primer periodo, hasta el 2050, el tiempo en confort presenta variaciones mínimas, incluso en la habitación existe un aumento del porcentaje en confort, mientras que en para el año 2080 ambos espacios analizados presentan una notoria disminución.

Conclusiones

A partir del análisis de los resultados se puede afirmar que, a pesar de que los apartamentos estén ubicados en el mismo edificio, el desempeño térmico de cada uno es muy diferente y el comportamiento en escenarios de cambio climático es variable, por lo que es necesario revisar las tipologías de forma independiente para tener una mayor precisión de las condiciones de habitabilidad de los apartamentos, tanto actualmente, como en condiciones de cambio climático.

Los escenarios analizados están ubicados en una misma orientación, por lo cual se generan inquietudes con respecto al desempeño térmico de las viviendas en diferentes orientaciones con mayor exposición directa al sol, principalmente en las horas de la tarde, lo que podría generar discomfort térmico por aumento de calor en la situación actual y en años posteriores.

Esta misma tipología de vivienda es también construida en diferentes zonas térmicas en el país sin tener en cuenta la correspondencia del diseño con las condiciones climatológicas del entorno, poniendo en cuestionamiento si los apartamentos permiten alcanzar temperaturas de confort para los habitantes actualmente y en años posteriores con el cambio climático.

Con respecto a las consecuencias de la réplica en las tipologías se quiere también plantear un camino para la evaluación de las estrategias bioclimáticas adecuadas a cada nivel de altura en el que se ubique la vivienda, que permitan identificar cuáles deben ser los parámetros de diseño y de especificaciones técnicas según el contexto y el nivel de ubicación que permitan adaptaciones al cambio climático.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses que pudieran representar un riesgo para la publicación del artículo.

DECLARACIÓN DE LA RESPONSABILIDAD AUTORAL

Manuela Murillo Galvis. Diseño de la investigación, diseño de la metodología, elaboración de entrevistas y redacción del manuscrito.

Juan Sebastián Calle Medina. Modelado tridimensional, desarrollo gráfico, obtención e interpretación de datos y redacción del manuscrito.

Santiago Jaramillo Betancourt. Modelado tridimensional, instalación de sensores, desarrollo gráfico y redacción del manuscrito.

María Alejandra Garavito Posada. Diseño de la investigación, instalación de sensores y redacción del manuscrito.

Elizabeth Parra Correa. Diseño de la investigación, administración y supervisión del proyecto de investigación y redacción del manuscrito.



Manuela Murillo Galvis

Arquitecta, estudiante de Maestría en Bioclimática. Facultad de Artes integradas, Centro de Formación Avanzada Fray Juan Duns Scotto OFM. Universidad de San Buenaventura sede Medellín, Colombia.

E-mail: manuela.murillo@tau.usbmed.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-0654-9825>



Juan Sebastián Calle Medina

Arquitecto. Estudiante de Maestría en Bioclimática. Facultad de Artes integradas, Centro de Formación Avanzada Fray Juan Duns Scotto OFM. Universidad de San Buenaventura sede Medellín, Colombia..

E-mail: juan.calle212@tau.usbmed.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-3445-4134>



Santiago Jaramillo Betancourt

Arquitecto. Estudiante de Maestría en Bioclimática. Facultad de Artes integradas, Centro de Formación Avanzada Fray Juan Duns Scotto OFM. Universidad de San Buenaventura sede Medellín, Colombia.

E-mail: santiago.jaramillo@tau.usbmed.edu.co

<https://orcid.org/0009-0005-5466-8772>



María Alejandra Garavito Posada

Conservadora- Restauradora de Bienes Muebles. Estudiante de Maestría en Bioclimática. Facultad de Artes integradas, Centro de Formación Avanzada Fray Juan Duns Scotto OFM. Universidad de San Buenaventura sede Medellín, Colombia.

E-mail: maria.garavito@tau.usbmed.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-5336-4292>



Elizabeth Parra Correa

Arquitecta. Magíster en Bioclimática. Facultad de Artes integradas, Centro de Formación Avanzada Fray Juan Duns Scotto OFM. Universidad de San Buenaventura sede Medellín, Colombia.

E-mail: elizabeth.parraci@tau.usbmed.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-0644-0886>



Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)