

EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO ADAPTATIVO EN VIVIENDAS  
MULTIFAMILIARES VIS EN BARRANQUILLA, BOGOTÁ, CALI Y MEDELLÍN

SILVIA NATHALIA ZAINEA PLATA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2026

EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO ADAPTATIVO EN  
VIVIENDAS MULTIFAMILIARES VIS EN BARRANQUILLA, BOGOTÁ,  
CALI Y MEDELLÍN

SILVIA NATHALIA ZAINEA PLATA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero mecánico

Director

Julián Ernesto Jaramillo Ibarra  
Doctor de Ingeniería Térmica

Codirector

Jorge Luis Cardenas Rangel  
Ingeniero Electricista

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2026

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, porque sin su ayuda nada de esto hubiera sido posible. Él siempre me sostuvo y me guio en cada etapa de este proceso.

A mis padres Javier Zainea y Silvia Plata, por esforzarse cada día para que este sueño se hiciera realidad, por sus oraciones constantes, sus consejos y su amor incondicional, este logro también les pertenece.

A mi familia más cercana, por estar siempre pendiente de mí.

A Raul, por ofrecerme una perspectiva diferente y valiosa, y por brindarme su apoyo en los momentos necesarios; a Duvan, por darme tranquilidad en múltiples ocasiones, a Julian y mis demás amigos, gracias por aportar de distintas maneras a este proceso.

A mis amigas de la iglesia, por su acompañamiento y apoyo espiritual; han sido un verdadero regalo de Dios.

A mis jefes de la universidad, por ser tan especiales conmigo.

Finalmente, a todas aquellas personas que, consciente o inconscientemente, hicieron parte de mi formación, y a los “angelitos” que Dios puso en mi camino.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco en primer lugar a Dios, por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar este trabajo.

A mis padres, por su apoyo constante, su confianza y su acompañamiento incondicional a lo largo de toda mi formación académica.

Un agradecimiento especial a mi director de tesis Julian Jaramillo por su orientación, paciencia y confianza durante el desarrollo de este trabajo.

A Nidia, por sus consejos oportunos y su acompañamiento permanente a lo largo del proceso de la tesis.

Al codirector de este trabajo por sus aportes.

A Mari, por sus consejos y disposición para ayudarme en los momentos necesarios.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo de este proyecto tan importante para mí.

## CONTENIDO

|  | pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN .....   | 13   |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....  | 15   |
| 2. OBJETIVOS .....   | 17   |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL.....  | 17   |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....  | 17   |
| 3. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA Y RECOLECCIÓN DE DATOS DE VIVIENDA....          | 18   |
| 4. DEFINICIÓN DE MODELOS REPRESENTATIVOS DE VIVIENDAS VIS .....              | 31   |
| 4.1 SELECCIÓN DE EDIFICACIONES .....   | 32   |
| 4.2. DEFINICIÓN DE LA MATERIALIDAD DE CERRAMIENTOS .....                     | 33   |
| 5. IDENTIFICACIÓN DE OCUPACIÓN Y USO DE EQUIPOS.....                         | 36   |
| 5.1. ANÁLISIS DE CONSUMOS DE ENERGÍA .....                                   | 36   |
| 5.1.1. Procedimiento de obtención de información.....                        | 36   |
| 5.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS PERFILES DE USO, EQUIPOS Y OCUPACIÓN...          | 40   |
| 5.2.1 Perfiles de ocupación .....  | 40   |
| 5.2.2 Perfiles para enchufables.....   | 41   |
| 5.2.3 Perfiles de iluminación.....   | 49   |
| 6. DESARROLLO Y SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE LOS MODELOS .....                   | 51   |
| 7. EVALUACIÓN DE MODELOS DE CONFORT TÉRMICO ADAPTATIVO.....                  | 58   |
| 7.1. CARACTERÍSTICAS Y LIMITACIONES DE LAS NORMAS.....                       | 59   |
| 7.2. ECUACIONES DE LOS MODELOS DE CONFORT ADAPTATIVO .....                   | 60   |
| 7.2.1. Modelo adaptativo según ASHRAE 55.....                                | 60   |
| 7.2.2. Modelo adaptativo según EN 15251 .....                                | 62   |
| 7.2.3. Cálculo de la temperatura media del aire exterior .....               | 63   |
| 8. PROCESAMIENTO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                             | 67   |
| 8.1. Influencia normativa en el porcentaje anual de horas de desconfort..... | 67   |
| 8.2. Cálculo de energía virtual para confort.....                            | 70   |
| CONCLUSIONES.....  | 83   |
| BIBLIOGRAFIA .....   | 86   |

## LISTA DE FIGURAS

|   | pág. |
|---|------|
| Ilustración 1. Variables de clasificación climática Colombia.....                                       | 19   |
| Ilustración 2. Carta Psicométrica – Barranquilla.....   | 21   |
| Ilustración 3. Carta Psicométrica – Bogotá .....  | 21   |
| Ilustración 4. Carta Psicométrica – Cali.....   | 21   |
| Ilustración 5. Carta Psicométrica – Neiva.....  | 21   |
| Ilustración 6. Carta Psicométrica – Medellín. ....  | 22   |
| Ilustración 7. Perfil horario de la temperatura de bulbo seco en Bogotá. ....                           | 23   |
| Ilustración 8. Perfil horario de la temperatura de bulbo seco en Medellín. ....                         | 23   |
| Ilustración 9. Perfil horario de la temperatura de bulbo seco en Cali. ....                             | 24   |
| Ilustración 10. Perfil horario de la temperatura de bulbo seco en Neiva. ....                           | 24   |
| Ilustración 11. Perfil horario de la temperatura de bulbo seco en Barranquilla. ....                    | 24   |
| Ilustración 12. Viabilidad de la ventilación natural.....   | 25   |
| Ilustración 13. Diagrama Psicométrico con rango de confort definido por ASHRAE 55-<br>Bogotá.....       | 26   |
| Ilustración 14. Diagrama Psicométrico con rango de confort definido por ASHRAE 55-<br>Medellín.....     | 27   |
| Ilustración 15. Diagrama Psicométrico con rango de confort definido por ASHRAE 55-<br>Cali.....         | 28   |
| Ilustración 16. Diagrama Psicométrico con rango de confort definido por ASHRAE 55-<br>Neiva.....        | 28   |
| Ilustración 17. Diagrama Psicométrico con rango de confort definido por ASHRAE 55-<br>Barranquilla..... | 29   |
| Ilustración 18. Metodología para la recopilación de características comunes.....                        | 32   |
| Ilustración 19. Filtros de Extracción de Datos del SUI.....   | 37   |
| Ilustración 20. Consumo promedio energía estrato 2.....   | 39   |
| Ilustración 21. Ocupación semana y fin de semana en todas las ciudades. ....                            | 41   |
| Ilustración 22. Tipo planta DesignBuilder- Bogotá.....  | 43   |
| Ilustración 23. Enchufable Bogotá semana.....   | 43   |

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 24. Enchufable Bogotá FDS.....   | 43 |
| Ilustración 25. Tipo planta DesignBuilder- Barranquilla.....   | 44 |
| Ilustración 26. Enchufables clima Barranquilla semana y fin de semana .....  | 45 |
| Ilustración 27. Enchufables no clima Barranquilla Semana.....  | 45 |
| Ilustración 28. Enchufables no clima Barranquilla fin de semana.....   | 45 |
| Ilustración 29. Tipo planta DesignBuilder- Cali/Neiva.....   | 46 |
| Ilustración 30. Enchufables Cali semana .....  | 47 |
| Ilustración 31. Enchufables Cali fin de semana.....  | 47 |
| Ilustración 32. Tipo planta DesignBuilder- Medellín. ....  | 48 |
| Ilustración 33. Enchufables Medellín semana .....  | 49 |
| Ilustración 34. Enchufables Medellín fin de semana .....   | 49 |
| Ilustración 35. Iluminación Bogotá semana y fin de semana.....   | 49 |
| Ilustración 36. Iluminación clima Barranquilla semana y fin de semana.....   | 49 |
| Ilustración 37. Iluminación no clima Barranquilla semana y fin de semana.....  | 50 |
| Ilustración 38. Iluminación Cali semana y fin de semana.....   | 50 |
| Ilustración 39. Iluminación Medellín semana y fin de semana .....  | 50 |
| Ilustración 40. Apertura de ventanas Semana para cada una de las ciudades .....  | 57 |
| Ilustración 41. Apertura Ventanas Fin de Semana para cada una de las ciudades .....  | 57 |
| Ilustración 42. Comparación entre el Modelo de Confort Adaptativo y el Modelos de Balance Térmico. ....  | 59 |
| Ilustración 43. Comparación del porcentaje anual de horas en confort térmico en ventilación natural según ASHRAE 55 (80% de aceptabilidad) y EN 15251 (Categoría II). .... | 69 |
| Ilustración 44. Selección de zonas térmicas representativas del edificio para la simulación energética.....  | 72 |
| Ilustración 45. Consumo de energía para Bogotá en el caso de refrigeración y calefacción con la Norma EN15251. ....  | 73 |
| Ilustración 46. Ejemplo de Edificio Adosado .....  | 74 |
| Ilustración 47. Comparación de consumos de calefacción y refrigeración en las ciudades analizadas con la norma EN15251.....  | 77 |

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 48. Comparación de los consumos de calefacción y refrigeración en las ciudades analizadas según la norma ASHRAE 55..... | 79 |
| Ilustración 49. Comparación del consumo de energía virtual según las normas EN 15251 y ASHRAE 55.....                               | 82 |

## LISTA DE TABLAS

pág.

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Distribución porcentual de temperatura por rangos en las ciudades analizadas.<br>.....           | 23 |
| Tabla 2. Distribución porcentual y metros cuadrados censados de obras de construcción.<br>.....           | 31 |
| Tabla 3. Características arquitectónicas y constructivas de los edificios representativos por ciudad..... | 33 |
| Tabla 4. Materiales de muros exteriores en Bogotá, Barranquilla y Cali/Neiva .....                        | 33 |
| Tabla 5. Materiales de muros exteriores en Medellín .....   | 34 |
| Tabla 6. Materiales de cubierta para Barranquilla, Bogotá, Cali/Neiva y Medellín .....                    | 34 |
| Tabla 7. Materiales de ventana exterior de Bogotá, Barranquilla, Cali/Neiva y Medellín                    | 34 |
| Tabla 8. Materiales de placa de entepiso de Bogotá, Barranquilla, Cali/Neiva y Medellín<br>.....          | 34 |
| Tabla 9. Planta del apartamento típico de Bogotá, Barranquilla, Cali/Neiva y Medellín .                   | 35 |
| Tabla 10. Códigos de cada ciudad según el operador de red .....   | 37 |
| Tabla 11. Estratos socioeconómicos en la página SUI .....   | 37 |
| Tabla 12. Consumos de energía promedio mensual del estrato 2 .....  | 38 |
| Tabla 13. Características de Carga para la ciudad de Bogotá .....   | 42 |
| Tabla 14. Características de Carga para la ciudad de Barranquilla. ....                                   | 44 |
| Tabla 15. Características de Carga para la ciudad de Cali .....   | 46 |
| Tabla 16. Características de Carga para la ciudad de Medellín.....  | 48 |
| Tabla 17. Planta de la vivienda típica de cada ciudad.....  | 52 |
| Tabla 18. Comparación de consumos con el SUI y Datos Obtenidos - Bogotá. ....                             | 53 |
| Tabla 19. Comparación de consumos con el SUI y Datos Obtenidos - Medellín. ....                           | 54 |
| Tabla 20. Comparación de consumos con el SUI y Datos Obtenidos - Cali.....                                | 55 |
| Tabla 21. Comparación de consumos con el SUI y Datos Obtenidos - Barranquilla.....                        | 55 |
| Tabla 22. Temperatura media mensual para Bogotá .....   | 63 |
| Tabla 23. Resultados de Bogotá según la norma ASHRAE .....  | 64 |
| Tabla 24. Temperaturas de rangos de confort adaptativo (ASHRAE 55; EN 15251) .....                        | 65 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 25. Rangos de confort para ASHRAE 55 y EN15251 .....   | 66 |
| Tabla 26. Valores de temperatura de set-point para calefacción y refrigeración utilizados en las simulaciones energéticas según la norma y ciudad.....                                     | 67 |
| Tabla 27. Indicadores de consumo energético, emisiones de CO2 y desempeño de confort térmico en ventilación natural según ASHRAE 55 (80% de aceptabilidad) y EN 15251 (Categoría II) ..... | 68 |
| Tabla 28. Resultados de demanda y consumo de refrigeración y calefacción con la norma EN 15251 .....   | 75 |
| Tabla 29. Resultados de demanda y consumo de refrigeración y calefacción con la norma ASHRAE 55.....   | 78 |
| Tabla 30. Comparación de resultados de consumo total y línea base resolución 0194 .  | 80 |
| Tabla 31. Resultados de energía virtual para las normas ASHRAE 55 y EN15251. ....  | 81 |

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO ADAPTATIVO EN VIVIENDAS MULTIFAMILIARES VIS EN BARRANQUILLA, BOGOTÁ, CALI Y MEDELLÍN.<sup>1</sup>

**AUTOR:** SILVIA NATHALIA ZAINEA PLATA.<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** CONFORT TÉRMICO ADAPTATIVO, VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL, ENERGÍA VIRTUAL, NORMA ASHRAE 55, NORMA EN 15251.

**DESCRIPCIÓN:** La vivienda de interés social (VIS) es promovida por el gobierno de Colombia; sin embargo, en su diseño no siempre se consideran criterios de confort térmico, lo que puede afectar la calidad de vida de los usuarios y aumentar los consumos energéticos. En este trabajo se evaluó el confort térmico adaptativo en viviendas multifamiliares VIS ubicadas en Barranquilla, Bogotá, Cali, Neiva y Medellín, con el fin de determinar el grado de cumplimiento de las normas ASHRAE 55 y EN 15251, así como la energía virtual necesaria para alcanzar las condiciones de confort. Se caracterizaron los climas mediante archivos climáticos procesados en Climate Consultant 6.0, se recopilieron datos arquitectónicos con apoyo de constructoras y se desarrollaron modelos energéticos en DesignBuilder, en los que se simularon escenarios de ventilación natural y climatización activa. Los resultados mostraron que el cumplimiento varió según la ciudad y la norma aplicada: en la norma ASHRAE 55 destacaron Medellín, Cali, Neiva y Barranquilla con porcentajes superiores al 80%, mientras que en la EN 15251 lo hicieron Medellín, Cali y Neiva, aunque ninguna ciudad alcanzó el 100%. Se encontró que los consumos energéticos se concentraron en calefacción en Bogotá y en refrigeración en Barranquilla y Neiva, mientras que Medellín y Cali presentaron un comportamiento mixto. La comparación con los datos del SUI mostró diferencias menores al 10%, lo que confirma la validez de los modelos empleados. Se concluyó que las viviendas VIS en Colombia no cumplen plenamente con los estándares de confort adaptativo y es necesario realizar estudios previos para mejorar las condiciones de confort térmico.

---

<sup>1</sup>Trabajo de grado

<sup>2</sup> Facultad Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Julián Ernesto Jaramillo Ibarra. Codirector Jorge Luis Rangel

## ABSTRACT

**TÍTULO:** EVALUATION OF ADAPTIVE THERMAL COMFORT IN MULTIFAMILY VIS HOUSING IN BARRANQUILLA, BOGOTÁ, CALI, AND MEDELLÍN<sup>3</sup>

**AUTOR:** SILVIA NATHALIA ZAINEA PLATA.<sup>4</sup>

**PALABRAS CLAVE:** ADAPTIVE THERMAL COMFORT, SOCIAL HOUSING, VIRTUAL ENERGY, ASHRAE 55 STANDARD, EN 15251 STANDARD

**DESCRIPCIÓN:** Social interest housing (VIS) is promoted by the Colombian government; however, thermal comfort criteria are not always considered in its design, which can affect users' quality of life and increase energy consumption. In this study, adaptive thermal comfort was evaluated in multifamily VIS housing located in Barranquilla, Bogotá, Cali, Neiva, and Medellín, in order to determine the level of compliance with ASHRAE 55 and EN 15251 standards, as well as the virtual energy required to achieve comfort conditions. The climates were characterized using weather files processed in Climate Consultant 6.0, architectural data were collected with the support of construction companies, and energy models were developed in DesignBuilder, in which scenarios of natural ventilation and active air conditioning were simulated. The results showed that compliance varied according to the city and the standard applied: under the ASHRAE 55 standard, Medellín, Cali, Neiva, and Barranquilla stood out with percentages above 80%, while under EN 15251, Medellín, Cali, and Neiva did so, although no city reached 100%. It was found that energy consumption was concentrated on heating in Bogotá and on cooling in Barranquilla and Neiva, while Medellín and Cali exhibited mixed behavior. The comparison with SUI data showed differences of less than 10%, confirming the validity of the models used. It was concluded that VIS housing in Colombia does not fully comply with adaptive comfort standards and that prior studies are necessary to improve thermal comfort conditions.

---

<sup>3</sup> Bachelor Thesis

<sup>4</sup> Facultad Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Julián Ernesto Jaramillo Ibarra. Codirector Jorge Luis Rangel

## INTRODUCCIÓN

El confort térmico en las Viviendas de interés Social (VIS) constituye un aspecto fundamental tanto para la calidad de vida de los habitantes como para la eficiencia energética. En Colombia, la diversidad climática plantea retos importantes para el cumplimiento de normativas de confort térmico adaptativo como la ASHRAE 55 y la EN 15251, que establecen criterios para las condiciones térmicas.

Esta investigación se centra en la revisión de dichas normas en viviendas multifamiliares VIS ubicadas en cinco ciudades representativas del país: Bogotá, Medellín, Cali, Neiva y Barranquilla, cada una correspondiente a un tipo climático diferente. El objetivo principal es determinar si estas viviendas cumplen con los criterios de confort adaptativo propuestos por las normas y, en caso contrario, establecer el nivel de energía virtual requerida para alcanzar dichas condiciones. Además, se analiza cómo la diversidad climática influye en el grado de cumplimiento normativo y en los consumos energéticos asociados.

La importancia de este trabajo radica en que las viviendas VIS hacen parte de programas promovidos por el Gobierno Nacional, lo que implica la necesidad de verificar si en su diseño se consideran criterios de confort térmico que garanticen el bienestar de sus ocupantes, al tiempo que se avanza en compromisos internacionales asumidos por Colombia.

La metodología del estudio comprende, en primer lugar, la revisión de las caracterizaciones climáticas de cada ciudad, empleando los archivos climáticos disponibles y la herramienta de Climate Consultant 6.0<sup>5</sup>. Posteriormente, se recopila información sobre la cantidad de viviendas VIS a través de datos oficiales del DANE

---

<sup>5</sup> UCLA ENERGY DESIGN TOOLS GROUP. *Climate Consultant*. Versión 6.0 [software en línea]. Los Ángeles (Estados Unidos): University of California, Los Angeles, 2016. Disponible en Internet: <https://climate-consultant.informer.com/6.0/> [consultado: 23 de enero de 2026].

(2016-2024). Con la ayuda de las constructoras y expertos se obtuvieron los planos y las entradas necesarias para hacer las simulaciones.

Las simulaciones se realizan primero bajo escenarios de ventilación natural y luego con climatización, con el fin de evaluar los consumos energéticos, las horas de discomfort y la energía virtual en cada ciudad de acuerdo con los criterios de las dos normas seleccionadas. Este enfoque permite comparar la incidencia normativa, climática y constructiva sobre el desempeño de las viviendas VIS.

El documento se estructura de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se el planteamiento del problema; en el capítulo 2 se formulan los objetivos; en el capítulo 3 se desarrollan la caracterización climática y recolección de datos de vivienda; en el capítulo 4 se definen los modelos representativos de viviendas VIS; en el capítulo 5 se identifican la ocupación y el uso de equipos; en el capítulo 6 se realiza el desarrollo y la simulación energética de los modelos; en el capítulo 7 se evalúan los modelos de confort térmico adaptativo; en el capítulo 8 se representa el procesamiento de resultados y la discusión.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia ha asumido compromisos internacionales para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, el sector de construcción sigue siendo el responsable del 38% de las emisiones de dióxido de carbono a nivel global relacionadas con la energía<sup>6</sup>, impactando el Objetivo de Desarrollo Sostenible 13 de la ONU<sup>7</sup>.

La urbanización en el país en el 2023 ha aumentado de manera acelerada, con ciudades como Barranquilla, Bogotá, Cali y Medellín superando el 97% de transición urbana<sup>8</sup>, impulsando la construcción de viviendas de interés social VIS y en muchos casos, no se consideran estrategias de confort térmico, como consecuencia, entre 2010 y 2018, la demanda energética residencial en Colombia aumentó un 30%, debido principalmente al gasto destinado a la climatización activa de las viviendas VIS.<sup>9</sup>

Esto impacta directamente en la calidad de vida de los habitantes, ya que la falta de confort térmico puede derivar en problemas respiratorios, cardiovasculares y afectar su bienestar<sup>10</sup>. Según el Marco de Salud y Bienestar del World Green Building Council, es fundamental promover edificaciones saludables, donde el confort térmico sea una

---

<sup>6</sup> Callejas Ochoa, L. F., Marín Echeverri, M., Puerta Sepúlveda, M. S., Arroyave Molina, V., & Silva Neves, M. (2023). CAMBIO CLIMÁTICO Y CONFORT TÉRMICO EN LA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL COLOMBIANA. *Revista hábitat Sustentable*, 13(1), p. 71.

<sup>7</sup> OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE [Anónimo]. Naciones Unidas [página web].

<sup>8</sup> POBLACIÓN DE las ciudades capitales 2023 [Anónimo]. Asociación Colombiana de Ciudades Capitales [página web].

<sup>9</sup> CASTAÑEDA, Walter Giraldo; CZAJKOWSKI, Jorge Daniel y GÓMEZ, Analía Fernanda. Confort térmico en vivienda social multifamiliar de clima cálido en Colombia. *En: Revista de Arquitectura* [en línea]. 2021. p. 115.

<sup>10</sup> A GAMBLE, Janet L., et al. Analyses of the effects of global change on human health and welfare and human systems: Final report, synthesis and assessment product 4.6: report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. Washington, D.C: U.S. Climate Change Science Program, 2008. 204 pHEALTH & Wellbeing Framework [Anónimo]. World Green Building Council [página web].

prioridad.<sup>11</sup>

Es así como el presente trabajo aborda la siguiente pregunta de investigación:

¿Las edificaciones multifamiliares de interés social VIS en Barranquilla, Bogotá, Cali y Medellín cumplen con estándares de confort térmico adaptativo según distintos modelos de evaluación? Si no cumplen, ¿cuál es la energía virtual requerida para alcanzar el confort térmico?

---

<sup>11</sup> HEALTH & Wellbeing Framework [Anónimo]. World Green Building Council [página web].

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el confort térmico en edificaciones residenciales multifamiliares VIS en Barranquilla, Bogotá, Cali y Medellín, mediante la aplicación y comparación entre distintos modelos de confort adaptativo, evaluando las horas de disconfort asociadas a cada uno. Así cumpliendo con la misión de la Universidad, dando una respuesta adecuada de las necesidades de la sociedad

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Caracterizar las condiciones climáticas y arquitectónicas de una edificación multifamiliar VIS por ciudad (Barranquilla, Bogotá, Cali y Medellín), identificando sus materiales representativos, distribución espacial, ocupación y uso de equipos.

Obtener modelos energéticos representativos de las edificaciones seleccionadas en las ciudades Barranquilla, Bogotá, Cali y Medellín

Evaluar el grado de cumplimiento de por lo menos dos modelos de confort adaptativo aplicados a las edificaciones seleccionadas.

Determinar la energía virtual para confort necesaria para alcanzar condiciones de comodidad térmica en las viviendas

### 3. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA Y RECOLECCIÓN DE DATOS DE VIVIENDA

Un aspecto importante para el estudio es conocer la clasificación climática del país. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) basa la clasificación del clima colombiano principalmente en los pisos térmicos, la cual está determinada por la altura sobre el nivel del mar, y a su vez cuenta con cinco categorías: Glacial, Páramo, Frío, Templado y Cálido, pero no considera la humedad. Por esta razón, el IDEAM complementa la clasificación del clima con la del modelo climático de Richar Lang, que considera la precipitación anual y la temperatura media. A partir de aquí se proponen seis zonas climáticas: desértica, árida, semiárida, semi-húmeda, húmeda y súper húmeda. En consecuencia, el piso térmico cálido queda dividido en cálido húmedo y cálido seco<sup>12</sup>.

Clasificación climática usada en este trabajo<sup>13</sup>:

- Clima frío: Este clima se identifica por las temperaturas bajas, así como por la gran oscilación térmica entre el día y la noche.
- Clima templado: Presenta temperaturas templadas tanto en el día como en la noche, con un ligero exceso de calor sólo en los períodos de mayor radiación solar.
- Clima cálido seco: El problema predominante es el exceso de calor, aunque el aire seco es bastante característico. Las oscilaciones térmicas diarias son muy marcadas.
- Clima cálido húmedo: Tiene un excesivo calor no tan marcado como el clima cálido seco, pero lo que sí intensifica la sensación de calor es la elevada humedad, las oscilaciones térmicas entre el día y la noche son muy reducidas.

---

<sup>12</sup> Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. *Anexo No. 2: información climática por municipios* [En línea]. Bogotá: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2024, p. 3.

<sup>13</sup> MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO REPÚBLICA DE COLOMBIA. RESOLUCIÓN NÚMERO 0549 [en línea]. 4 p.

Ilustración 1. Variables de clasificación climática Colombia

| TIPO DE CLIMA | TEMPERATURA [°C] | ALTITUD [MSNM]      | CIUDAD REPRESENTATIVA |
|---------------|------------------|---------------------|-----------------------|
| FRÍO          | 12 - 18          | 2000 [m] - 2999 [m] | Bogotá (2625 [m])     |
| TEMPLADO      | 18-24            | 1000 [m] - 1999 [m] | Medellín (1495 [m])   |
| CÁLIDO SECO   | >24; HR < 75%    | <1000 [m]           | Cali (997 [m])        |
| CÁLIDO HÚMEDO | >24; HR > 75%    | <1000 [m]           | Barranquilla (18 [m]) |

Fuente: elaboración propia, con base en VIS 4.0: Estrategias para la vivienda de interés social sostenible en Colombia 2024 [Anónimo]. Camacol | Cámara Colombiana de la Construcción [página web]. (septiembre, 2024). [Consultado el 20, marzo, 2025]. Disponible en Internet: <<https://camacol.co/revista/vis/>>.

La clasificación climática de Colombia, presentada en la Ilustración 1, corresponde a los lineamientos establecidos en la Resolución 0549 de 2015 y el documento técnico VIS 4.0. Esta divide el territorio nacional en cuatro zonas térmicas: frío, templado, cálido seco y cálido húmedo, según tres variables fundamentales: temperatura del aire, altitud sobre el nivel del mar y humedad relativa. Las ciudades seleccionadas son utilizadas como referencia de cada categoría climática. Esta clasificación es fundamental para el presente estudio, ya que permite identificar las particularidades climáticas de cada ciudad, para evaluar si las viviendas ofrecen condiciones adecuadas de confort térmico adaptativo.

Un elemento clave en la simulación energética es la elección del archivo climático, dado que afecta directamente los resultados de ganancias y pérdidas térmicas. Los archivos climáticos que se usaron se obtuvieron de la página web

<https://climate.onebuilding.org><sup>14</sup> para cada una de las ciudades analizadas, así:

- [COL\\_ANT\\_Medellin-Olaya.Herrera.AP.801100\\_TMYx.2009-2023.zip](#)
- [COL\\_ATL\\_Barranquilla-Cortissoz.Intl.AP.800280\\_TMYx.2009-2023.zip](#)
- [COL\\_CUN\\_Bogota-Eldorado.Intl.AP.802220\\_TMYx.2009-2023.zip](#)

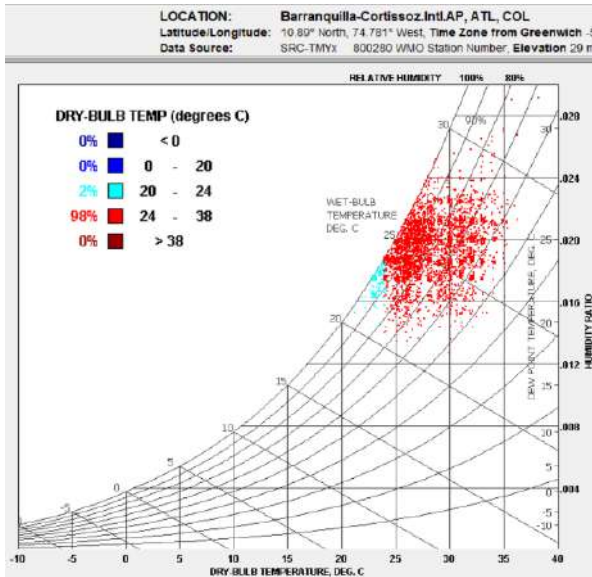
<sup>14</sup> CLIMATE.ONEBUILDING.ORG [Anónimo]. climate.onebuilding.org [página web].

- COL\_VAC\_Cali-Aragon.Intl.AP.802590\_TMYx.2009-2023.zip
- COL\_HUI\_Neiva-Salas.AP.803150\_TMYx.2009-2023.zip

Los resultados de las simulaciones realizadas para la ciudad de Cali llevaron a la elección de incluir otra ciudad que pudiera representar otra ciudad de una mejor manera las condiciones del clima cálido seco, puesto que se estimó que el fichero climático para la ciudad de Cali no representaba a la perfección el clima cálido seco, por la localización de la estación meteorológica que se encuentra en el aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón (zona con mucha vegetación y alejado del núcleo urbano). Para ello se seleccionó la ciudad de Neiva como ciudad de referencia climática complementaria. Conviene aclarar que, aunque se generó el fichero climático correspondiente a Neiva, las edificaciones simuladas fueron las mismas modelos originalmente para Cali.

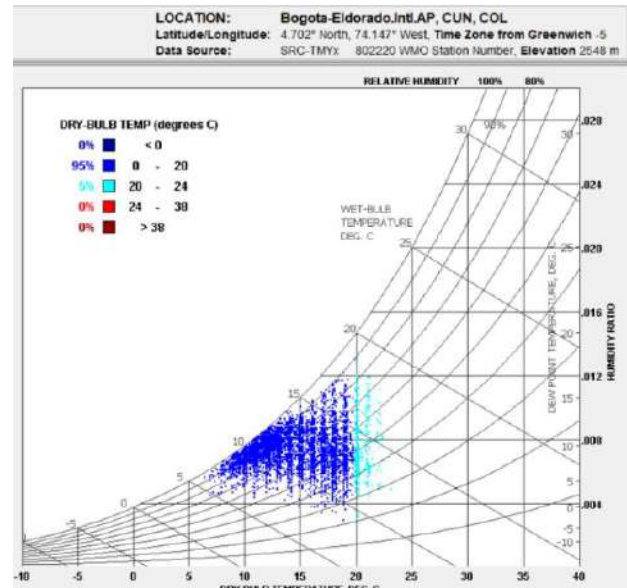
En las Ilustraciones 2,3, 4, 5 y 6 se presentan las cartas psicométricas de las ciudades seleccionadas para este estudio. Estas gráficas muestran la relación entre la temperatura del bulbo seco y la humedad relativa a lo largo del año. Además, se indica el porcentaje de los rangos de temperatura de bulbo seco que experimenta cada ciudad, representados mediante una escala de colores.

Ilustración 2. Carta Psicométrica – Barranquilla.



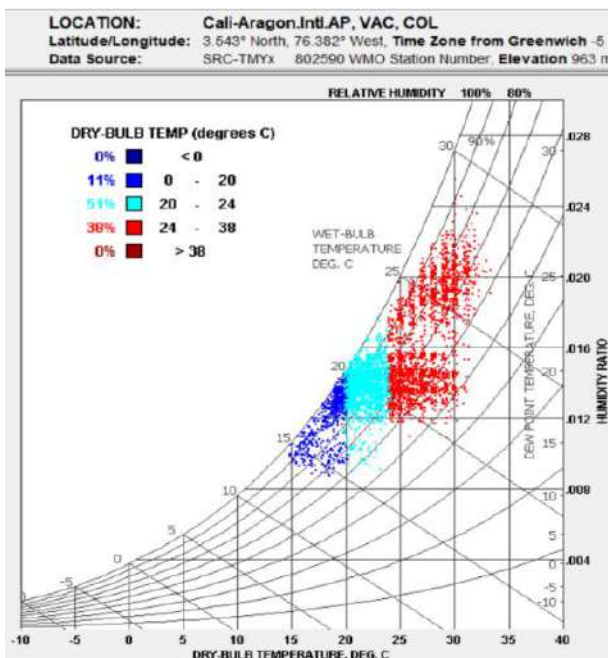
Fuente: Climate Consultant 6.0 (UCLA, 2016).

Ilustración 3. Carta Psicométrica – Bogotá



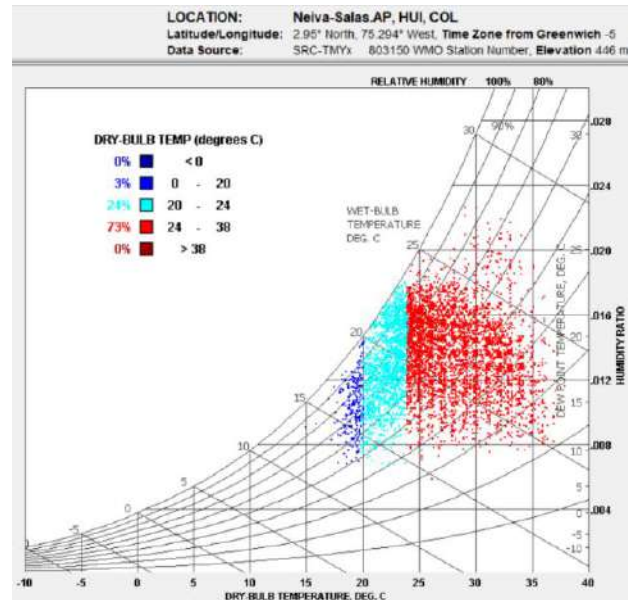
Fuente: Climate Consultant 6.0 (UCLA, 2016).

Ilustración 4. Carta Psicométrica – Cali.



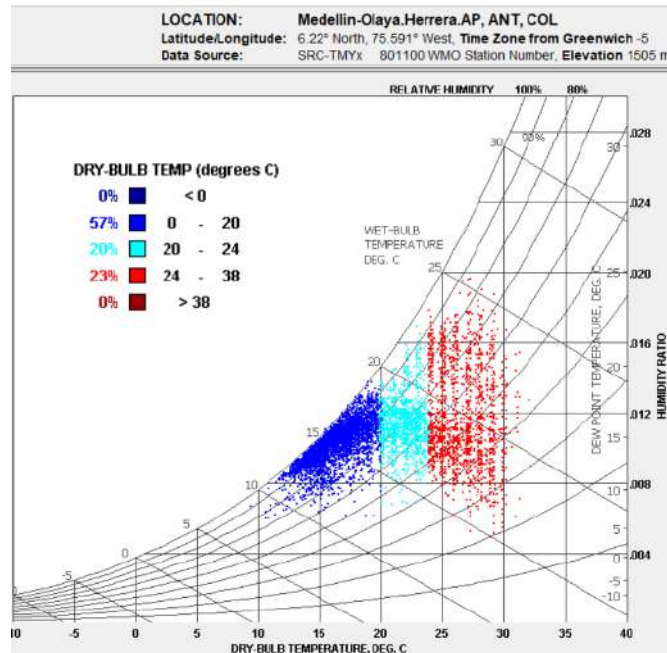
Fuente: Climate Consultant 6.0 (UCLA, 2016).

Ilustración 5. Carta Psicométrica – Neiva



Fuente: Climate Consultant 6.0 (UCLA, 2016).

Ilustración 6. Carta Psicométrica – Medellín.



Fuente: Climate Consultant 6.0 (UCLA, 2016).

En Barranquilla (Ilustración 2), se observan temperaturas elevadas, los cuales en un 98% del tiempo se encuentran entre el rango de 24 [°C] y 38[ °C], lo que refleja un clima cálido. Bogotá (Ilustración 3), por el contrario, tiene un comportamiento del 95% de los datos térmicos por debajo de los 20 [°C], lo que confirma su clima frío. Cali (Ilustración 4) presenta un comportamiento intermedio ya que el 51% del tiempo las temperaturas se encuentran entre los 20 [°C] y 24 [°C]. En el caso de Neiva (Ilustración 5), las condiciones climáticas son muy similares a Barranquilla con un 73% en el rango de 24 [°C] y 38[ °C], sin embargo, presenta un porcentaje de 3% por debajo del 20 [°C]. Finalmente, Medellín (Ilustración 6) presenta un clima templado, teniendo un porcentaje de 57% por debajo del 20 [°C], 20% en el rango 20 [°C] a 24 [°C] y 23% en el rango 24 [°C] a 38 [°C].

La tabla 1 resume la distribución porcentual de las temperaturas de bulbo seco predominantes en cada ciudad, con base en los datos analizados en los diagramas

psicométricos. Esta tabla facilita la comparación entre ciudades.

Tabla 1. Distribución porcentual de temperatura por rangos en las ciudades analizadas.

| Ciudad       | <0 | 0 a 20 °C | 20 a 24 °C | 24 a 38 °C | >39 °C |
|--------------|----|-----------|------------|------------|--------|
| Bogotá       | 0% | 95%       | 5%         | 0%         | 0%     |
| Medellín     | 0% | 57%       | 20%        | 23%        | 0%     |
| Cali         | 0% | 11%       | 51%        | 38%        | 0%     |
| Neiva        | 0% | 3%        | 24%        | 73%        | 0%     |
| Barranquilla | 0% | 0%        | 2%         | 98%        | 0%     |

Las ilustraciones 7 a 11 muestran la variación promedio anual de la temperatura de bulbo seco a lo largo del día para cada una de las ciudades analizadas.

Ilustración 7. Perfil horario de la temperatura de bulbo seco en Bogotá.

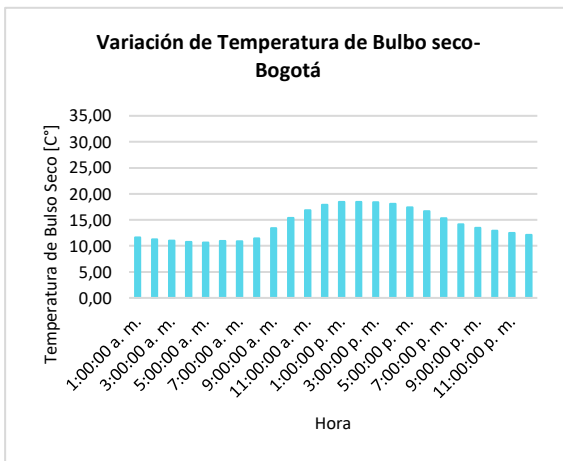


Ilustración 8. Perfil horario de la temperatura de bulbo seco en Medellín.

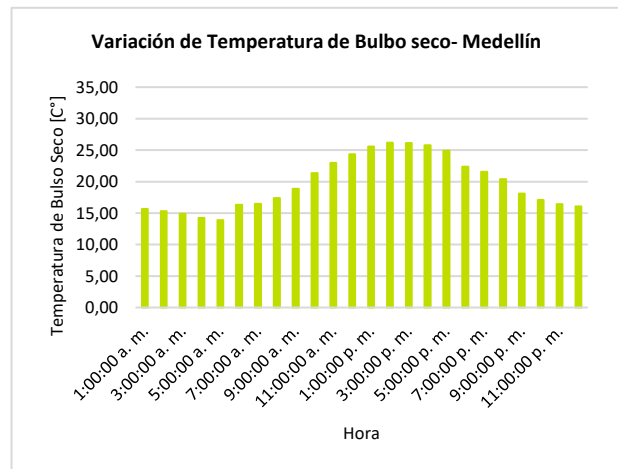


Ilustración 9. Perfil horario de la temperatura de bulbo seco en Cali.

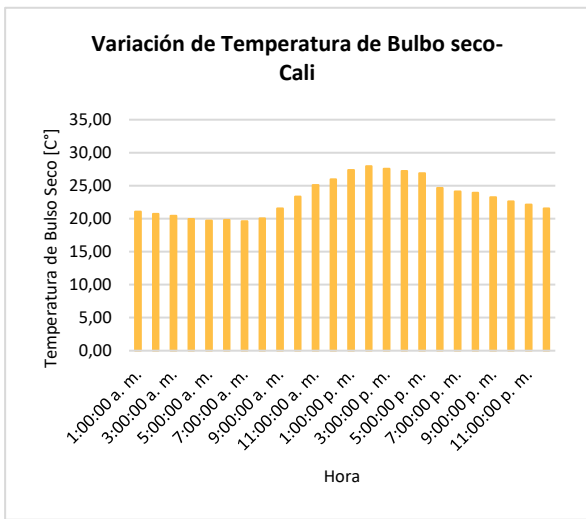


Ilustración 10. Perfil horario de la temperatura de bulbo seco en Neiva.

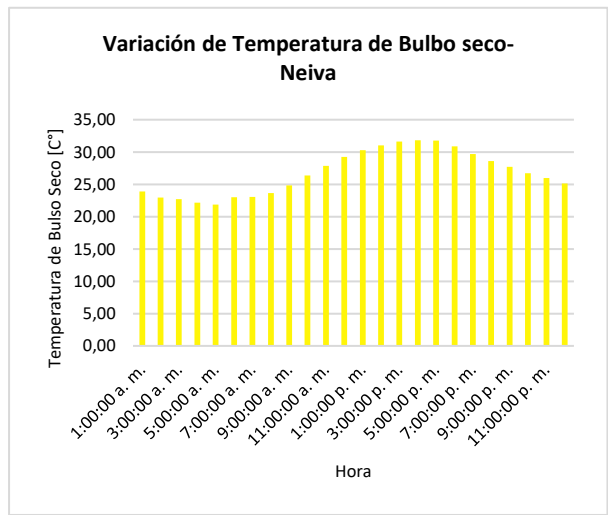
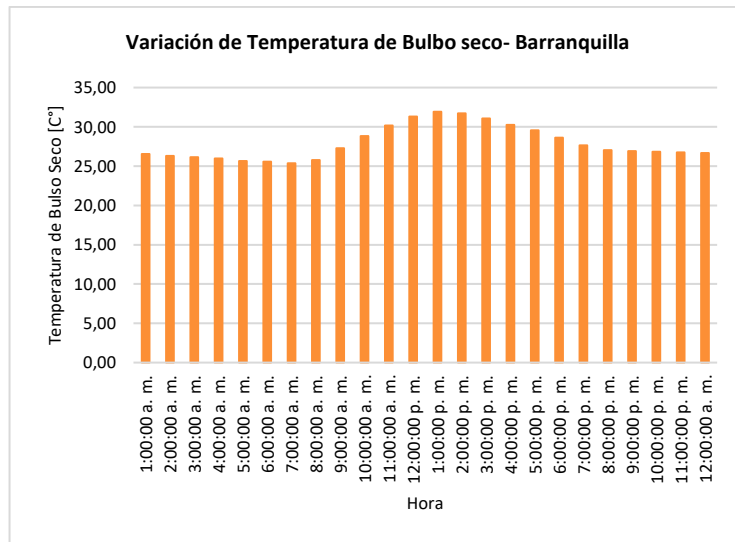


Ilustración 11. Perfil horario de la temperatura de bulbo seco en Barranquilla.



Para evaluar de manera preliminar el potencial de la ventilación natural como estrategia de climatización para alcanzar condiciones de confort térmico en las ciudades analizadas,

se asumió que la temperatura del interior de la vivienda es similar a la del ambiente exterior.

En las ilustraciones 13 hasta la 17 se muestra dentro de la franja de color verde el rango aceptable de temperaturas según la norma ASHRAE 55-2010 para un criterio de aceptabilidad del 80%. Este rango permite identificar tanto el número de horas como porcentaje de confort térmico.

Para analizar la viabilidad de la ventilación natural como estrategia de climatización, se establecieron rangos de referencia basados en el porcentaje de horas en que se alcanzan condiciones de confort, los cuales se presentan en la ilustración 12.

Ilustración 12. Viabilidad de la ventilación natural

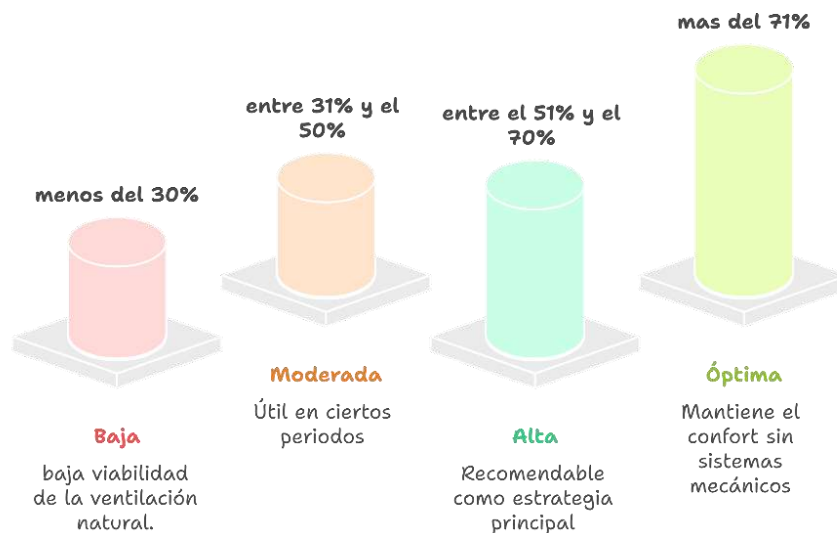
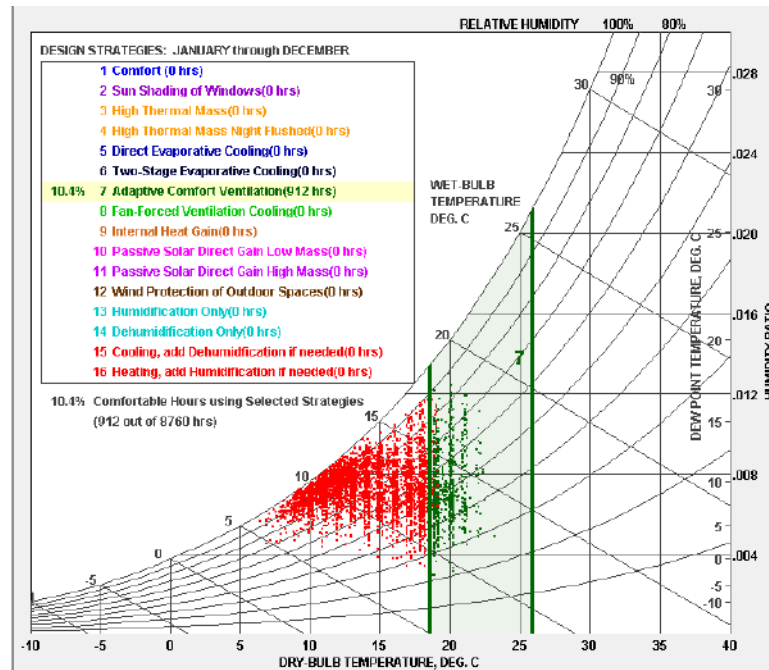


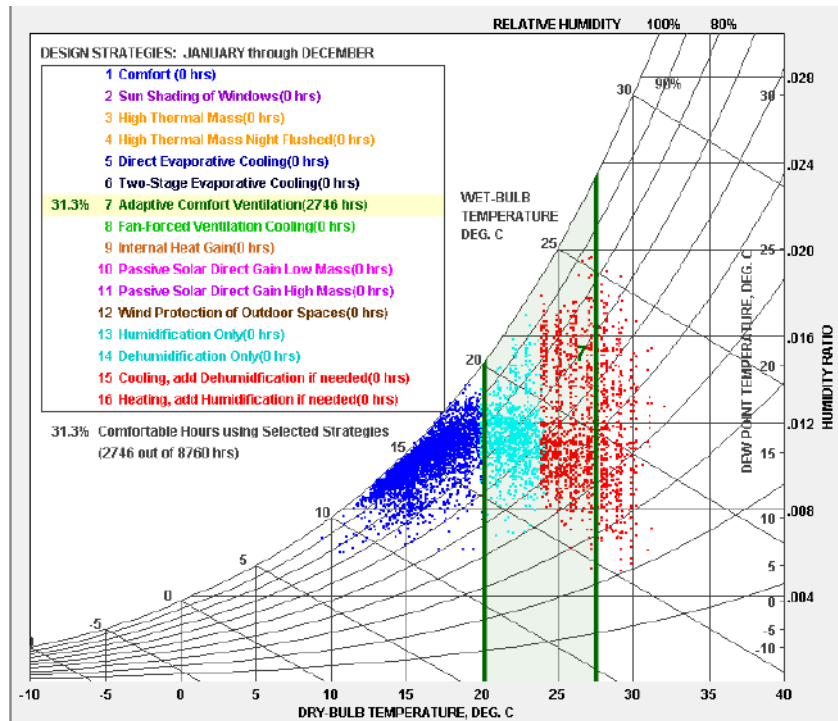
Ilustración 13. Diagrama Psicrométrico con rango de confort definido por ASHRAE 55- Bogotá.



Fuente: Climate Consultant 6.0 (UCLA, 2016).

En la ciudad de Bogotá (Ilustración 13). Al considerar el periodo completo de 24 horas, el valor de cumplimiento según la norma es de 10,4%. Estos resultados se explican por la presencia de temperaturas frías características de la ciudad, lo que permite concluir que la ventilación natural presenta baja viabilidad como estrategia de climatización.

Ilustración 14. Diagrama Psicrométrico con rango de confort definido por ASHRAE 55-Medellín.

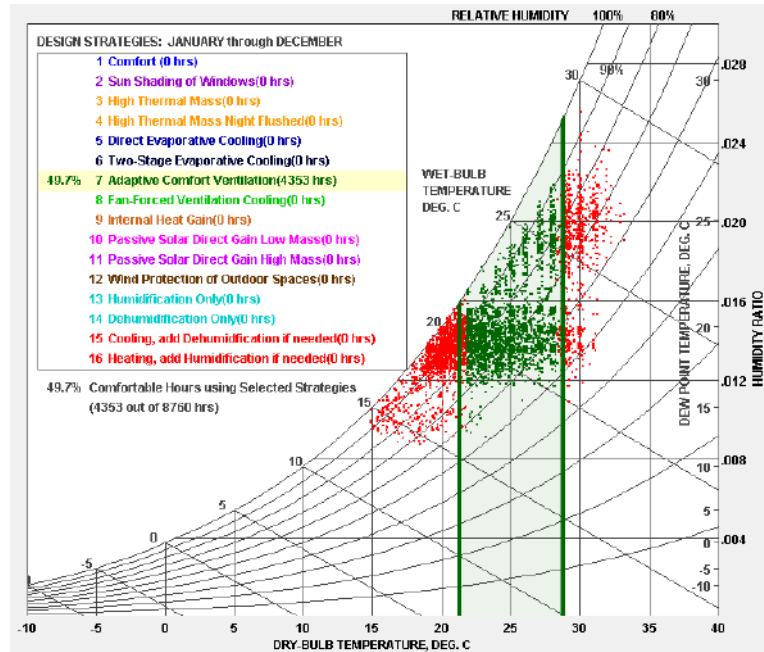


Fuente: Climate Consultant 6.0 (UCLA, 2016).

En la ciudad de Medellín (Ilustración 14). Al considerar el periodo completo de 24 horas, el porcentaje de cumplimiento se sitúa en 31,3%. El bajo nivel de confort se asocia principalmente a condiciones de frío. En consecuencia, la viabilidad de la ventilación natural es moderada.

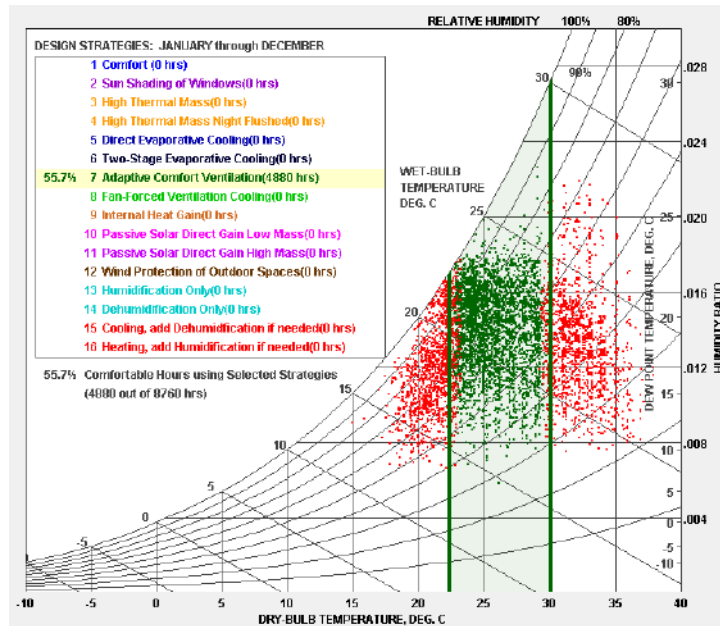
En la ciudad de Cali (Ilustración 15). Al considerar el periodo de 24 horas, el porcentaje se sitúa en 49,7%. Como conclusión, la viabilidad de la ventilación natural es moderada.

Ilustración 15. Diagrama Psicométrico con rango de confort definido por ASHRAE 55-Cali.



Fuente: Climate Consultant 6.0 (UCLA, 2016).

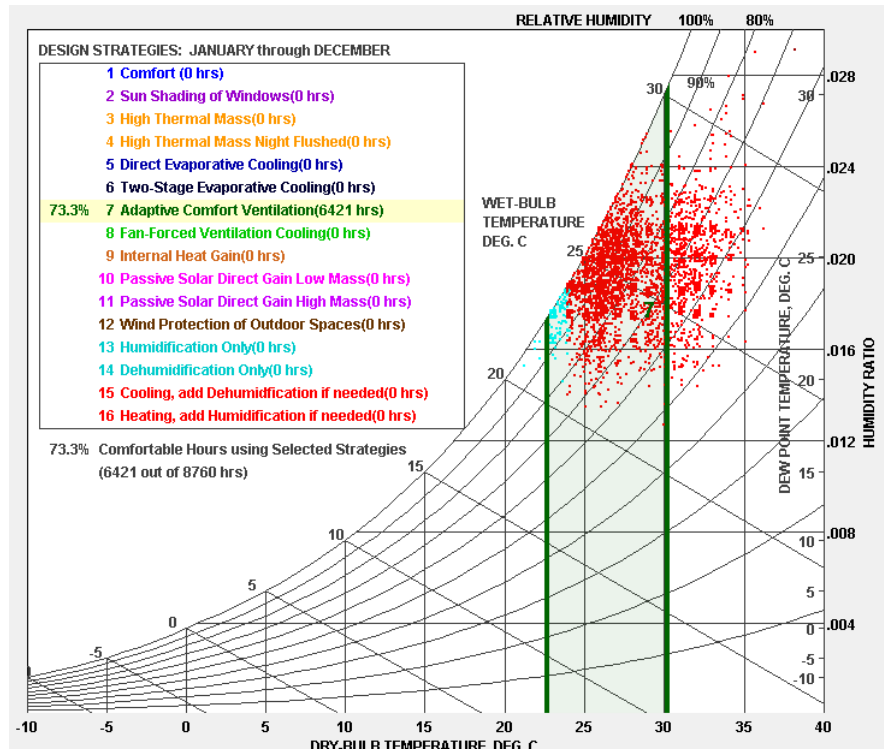
Ilustración 16. Diagrama Psicométrico con rango de confort definido por ASHRAE 55-Neiva.



Fuente: Climate Consultant 6.0 (UCLA, 2016).

En la ciudad de Neiva (Ilustración 16) se presenta un porcentaje de confort del 55,7% al considerar el periodo completo de 24 horas. Como conclusión, la viabilidad de la ventilación natural es alta y es recomendable como estrategia principal.

Ilustración 17. Diagrama Psicrométrico con rango de confort definido por ASHRAE 55-Barranquilla.



Fuente: Climate Consultant 6.0 (UCLA, 2016).

En la ciudad de Barranquilla (ilustración 17) el porcentaje de confort durante el periodo completo de 24 horas es de 73,3%. La viabilidad de la ventilación natural es alta, es decir es recomendable como estrategia principal

A partir de las ilustraciones 13, 14, 15, 16 y 17, se evidencia que, aunque Medellín presenta temperaturas más moderadas, su mayor variabilidad térmica aumenta el número de horas fuera del rango del confort adaptativo establecido por la norma ASHRAE. En contraste la ciudad de Barranquilla, aunque registra temperaturas más altas, presenta una menor variabilidad térmica a lo largo del año.

Una vez realizada la caracterización climática de las ciudades seleccionadas, se procedió a la recolección y análisis de la información de las viviendas de Interés Social, iniciando con su definición normativa.

Las viviendas de interés social (VIS) De acuerdo con el Decreto 1607 de 2022<sup>15</sup> indica los valores máximos para las viviendas de Interés social (VIS) en Colombia, diferenciando según la ubicación geográfica:

- Ciudades y municipios específicos: En áreas con alta presión sobre el valor del suelo y una población significativa, el precio máximo de una VIS se fija en 150 salarios mínimos legales mensuales vigentes (SMLMV)
- Resto del país: El valor máximo de una VIS es de 135 salarios mínimos legales mensuales vigentes (SMLMV)

En lo que respecta a la información correspondiente a la cantidad de viviendas, se tomó como base la información de área construida por ciudad y estrato del Censo Nacional de Edificaciones que el DANE reportó durante el periodo 2016-2024 y, una vez revisado, se concretan los siguientes hallazgos:

En el periodo señalado, el área total construida de apartamentos de Vivienda de Interés Social (VIS) en las ciudades de Bogotá, Barranquilla, Cali y Medellín es equivalente a un aproximado de 7.584.746,3 [ $m^2$  ], sumando por ciudad lo siguiente: 42,88 % en Bogotá, 36,69% en Barranquilla, 13,45% en Cali y 3,98% en Medellín. Con respecto a la estratificación, el estrato 2, tienen un 94,5% de las viviendas examinadas.

En cuanto a la tipología por tipo de obra, considerando el estado de la obra, la Tabla 2 corresponde a la proporción de la cantidad de obras en estado paralizado, finalizadas y en proceso, así como la cantidad total de obras reportadas en metros cuadrados:

---

<sup>15</sup> DECRETO 1607 de 2022 - Gestor Normativo [Anónimo]. Inicio - Función Pública [página web].

Tabla 2. Distribución porcentual y metros cuadrados censados de obras de construcción.

| Ciudad              | Paralizadas | Culminadas | En proceso | Obras Censadas |
|---------------------|-------------|------------|------------|----------------|
| <b>Bogotá</b>       | 15,80%      | 10,41%     | 73,79%     | 315.139.065    |
| <b>Medellín</b>     | 18,47%      | 8,94%      | 72,59%     | 292.426.137    |
| <b>Cali</b>         | 32,99%      | 9,76%      | 57,25%     | 147.964.119    |
| <b>Barranquilla</b> | 25,87%      | 9,82%      | 64,31%     | 223.731.347    |

Fuente: Censo de Edificaciones [Anónimo]. DANE [página web]. [Consultado el 20, marzo, 2025].

Si se considera únicamente la obra correspondiente a aquellos destinados a apartamentos, las cifras globales indican que el 16,22% de las obras se hallan paradas, el 10,53% terminadas y, el 73,25% están en proceso, con un total de 907.419.936 [ $m^2$ ] de obra correspondientes a este destino. Los datos han sido obtenidos de la web oficial del DANE <sup>16</sup> y se puede acceder a estos en el informe interactivo de Power BI, mediante el siguiente enlace:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNDMxMzkzY2EtM2ExYi00NmYxLWl0YTUtZmFiMDU0MmYyOYTNilwiidCI6IjJIZDU1NzRjLWY5YmEtNDQyNi05NjU4LWU0NzdhZDc0MzlkYiIsImMiOiR9>

#### 4. DEFINICIÓN DE MODELOS REPRESENTATIVOS DE VIVIENDAS VIS

La metodología utilizada para identificar las características comunes se estructuró en tres fases principales:

<sup>16</sup> DANE - Censo de Edificaciones [Anónimo]. DANE - [página web].

Ilustración 18. Metodología para la recopilación de características comunes



- **Establecer comunicación con actores clave en la industria de la construcción:** El objetivo de esta frase fue establecer un canal efectivo con el fin de facilitar la recopilación de información clave relacionada con arquitectura, materiales, cargas eléctricas.
- **Organizar sesiones para recopilar y validar información con expertos:** Se aprovechó la experticia del director, codirector y expertos del proyecto para validar y completar información.
- **Asegurar la alineación con las iniciativas de eficiencia energética:** Se revisaron los documentos "VIS 4.0: Estrategias para viviendas de interés social" y con la resolución 0549.

#### 4.1 SELECCIÓN DE EDIFICACIONES

La selección de los edificios representativos contó con la colaboración de las constructoras en las cuatro ciudades objeto de estudio, entregaron los planos arquitectónicos correspondientes. Las edificaciones seleccionadas se encuentran documentadas en la tabla 3.

Tabla 3. Características arquitectónicas y constructivas de los edificios representativos por ciudad.

| Ciudad       | Imagen  | Número de pisos | Forma de la planta | Sistema constructivo                      | Cubierta                                     |
|--------------|---|-----------------|--------------------|---|--|
| Bogotá       |  | 18              | Rectángulo         | Industrializado con pantallas de concreto | Concreto vaciado obra con impermeabilización |
| Medellín     |  | 16              | Rectángulo         | Mampostería estructural de concreto       | Concreto vaciado obra con impermeabilización |
| Cali         |  | 12              | Rectángulo         | Industrializado con pantallas de concreto | Concreto vaciado obra con impermeabilización |
| Barranquilla |  | 12              | Rectángulo         | Industrializado con pantallas de concreto | Concreto vaciado obra con impermeabilización |

#### 4.2. DEFINICIÓN DE LA MATERIALIDAD DE CERRAMIENTOS

Esta sección establece los sistemas constructivos utilizados en los edificios seleccionados. En las tablas 4, 5, 6, 7 y 8 se describe la composición de los principales elementos de la envolvente térmica, como lo son los muros exteriores, las cubiertas y placas entre piso.

Tabla 4. Materiales de muros exteriores en Bogotá, Barranquilla y Cali/Neiva

| Sistema constructivo                     | MATERIAL                      | ESPESOR [m] | VALOR U [w/m <sup>2</sup> -K] |
|--|-------------------------------|-------------|-------------------------------|
| Industrializado con pantalla de concreto | Estuco plástico               | 0,005       | 4                             |
|  | Concreto reforzado (Pantalla) | 0,15        |                               |

Tabla 5. Materiales de muros exteriores en Medellín

| Sistema constructivo                | MATERIAL                      | ESPESOR [m] | VALOR U [w/m <sup>2</sup> -K] |
|-------------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|
| Mampostería estructural de concreto | Pintura                       | 0,001       | 3                             |
|                                     | Estuco plástico               | 0,003       |                               |
|                                     | Bloque de cemento estructural | 0,12        |                               |

Tabla 6. Materiales de cubierta para Barranquilla, Bogotá, Cali/Neiva y Medellín

| Tipo de cubierta  | Material                 | Espesor [m] | VALOR U [w/m <sup>2</sup> -K] |
|---|--------------------------|-------------|-------------------------------|
| Cubierta en concreto vaciado en obra con impermeabilización | Manto impermeabilizante  | 0,005       | 4                             |
|   | Mortero de nivelación    | 0,05        |                               |
|   | Placa maciza de concreto | 0,10        |                               |

Tabla 7. Materiales de ventana exterior de Bogotá, Barranquilla, Cali/Neiva y Medellín


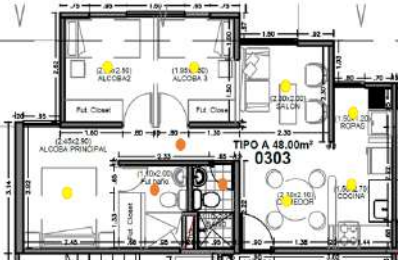


| Tipo de Acristalamiento  | Material                | Espesor [m] | VALOR U [w/m <sup>2</sup> -K] |
|--------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------------|
| Acristalamiento exterior | Generic Clear 4mm glass | 0,004       | 6                             |
| Marco                    | Aluminium               | 0,005       | 6                             |

Tabla 8. Materiales de placa de entepiso de Bogotá, Barranquilla, Cali/Neiva y Medellín

| Tipo de Suelo interior | Material                            | Espesor [m] | VALOR U [w/m <sup>2</sup> -K] |
|------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------------------------|
| Capa núcleo            | Concreto Cubierta                   | 0,1         | 3                             |
|                        | Mortero para nivelación de cubierta | 0,02        |                               |
|                        | Mortero de pega pisos               | 0,003       |                               |
|                        | Baldosa                             | 0,008       |                               |

En la tabla 9 se presentan las plantas típicas correspondientes a cada edificio representativo de cada ciudad.

Tabla 9. Planta del apartamento típico de Bogotá, Barranquilla, Cali/Neiva y Medellín

| Ciudad       | Planta del apartamento típico  | Metros cuadrados de un apartamento |
|--------------|--|------------------------------------|
| Bogotá       |    | 38 a 39 m <sup>2</sup>             |
| Medellín     |    | 44 a 46 m <sup>2</sup>             |
| Cali         |   | 53 a 56 m <sup>2</sup>             |
| Barranquilla |  | 56 a 57 m <sup>2</sup>             |

## 5. IDENTIFICACIÓN DE OCUPACIÓN Y USO DE EQUIPOS

### 5.1. ANÁLISIS DE CONSUMOS DE ENERGÍA

En la búsqueda de información de consumos de energía para cada una de las ciudades analizadas, se extrajeron los registros históricos de consumo de energía eléctrica de la Plataforma del Sistema Único de Información (SUI)<sup>17</sup>, correspondientes al período comprendido entre los años 2021 y 2024.

La información fue recogida de una manera individual para las diferentes ciudades, con la finalidad de construir una base de datos que permita calcular el consumo medio mensual de las ciudades consideradas en este estudio.

**5.1.1. Procedimiento de obtención de información.** Ingresando a la plataforma de información del sistema único con el URL <https://sui.superservicios.gov.co/Reportes-del-Sector/Energia> se puede acceder a la plataforma de información “Herramienta O3”, que sirve para llevar a cabo la visualización o descarga de la información requerida.

Para la extracción de datos del SUI, se configuraron filtros específicos para depurar y consolidar la información correspondiente. Estos parámetros fueron:

---

<sup>17</sup> ENERGÍA | Portal SUI | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [Anónimo]. | Portal SUI | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [página web].

## Ilustración 19. Filtros de Extracción de Datos del SUI



En el mercado se debe utilizar los siguientes códigos que varían según el operador de red (OR) y su área de influencia:

Tabla 10. Códigos de cada ciudad según el operador de red

| Ciudad              | Código                              |
|---------------------|-------------------------------------|
| <b>Bogotá</b>       | 176-BOGOTA-CUNDINAMARCA CREG 199/16 |
| <b>Medellín</b>     | 704-ANTIOQUIA CREG 078/07           |
| <b>Cali</b>         | 165-CALI-YUM-PUERTO TEJADA          |
| <b>Barranquilla</b> | 444-AIR-E                           |

Tabla 11. Estratos socioeconómicos en la página SUI

| Categoría de vivienda    | Estrato socioeconómico |
|--------------------------|------------------------|
| Residencial Bajo – Bajo  | Estrato 1              |
| Residencial Bajo         | Estrato 2              |
| Residencial Medio – Bajo | Estrato 3              |
| Residencial Medio        | Estrato 4              |
| Residencial Medio – Alto | Estrato 5              |

| Categoría de vivienda | Estrato socioeconómico                    |
|-----------------------|---|
| Residencial Alto      | Estrato 6                                 |
| Comercial             | Locales comerciales-oficinas-consultorios |

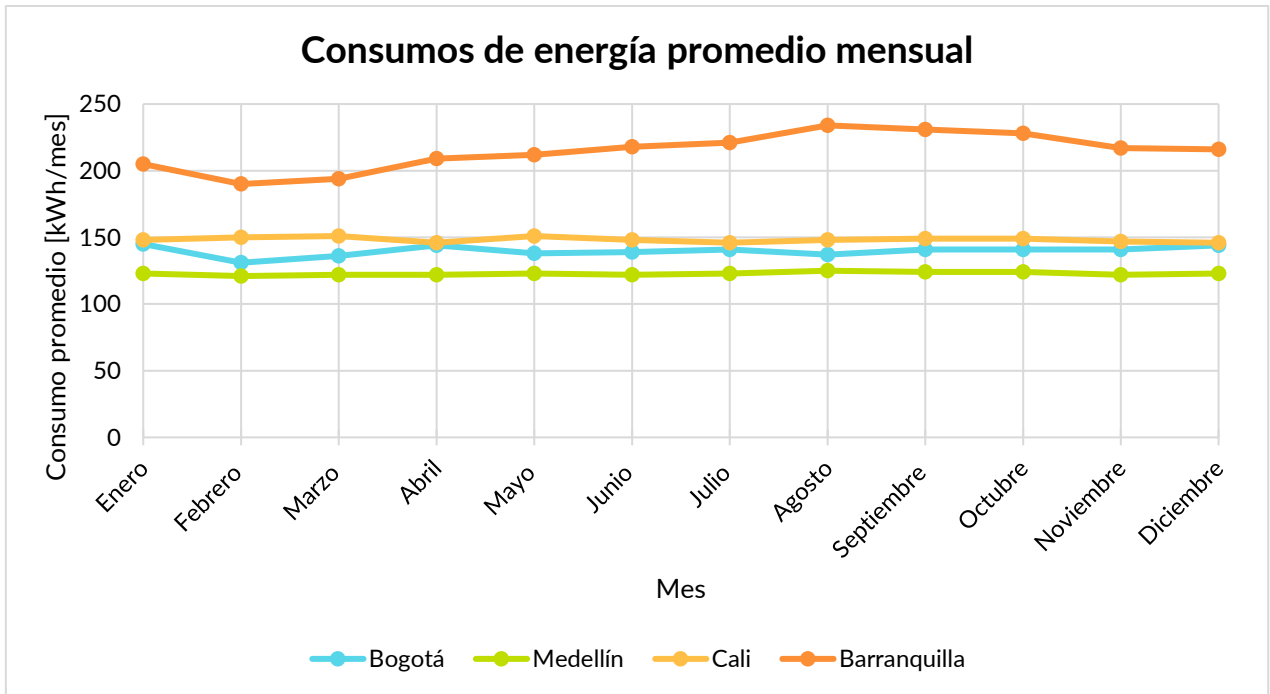
En la tabla 12 se presentan los consumos eléctricos por mes promediado desde el año 2021 al año 2024 para el estrato 2 residencial de cada ciudad y se muestra la Ilustración 14 para mayor comprensión.

Tabla 12. Consumos de energía promedio mensual del estrato 2

| Mes        | Bogotá<br>[kWh-mes] | Medellín<br>[kWh-mes] | Cali<br>[kWh-mes] | Barranquilla<br>[kWh-mes] |
|------------|---------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------|
| Enero      | 145                 | 123                   | 148               | 205                       |
| Febrero    | 131                 | 121                   | 150               | 190                       |
| Marzo      | 136                 | 122                   | 151               | 194                       |
| Abril      | 144                 | 122                   | 146               | 209                       |
| Mayo       | 138                 | 123                   | 151               | 212                       |
| Junio      | 139                 | 122                   | 148               | 218                       |
| Julio      | 141                 | 123                   | 146               | 221                       |
| Agosto     | 137                 | 125                   | 148               | 234                       |
| Septiembre | 141                 | 124                   | 149               | 231                       |
| Octubre    | 141                 | 124                   | 149               | 228                       |
| Noviembre  | 141                 | 122                   | 147               | 217                       |
| Diciembre  | 144                 | 123                   | 146               | 216                       |

Fuente: ENERGÍA | Portal SUI | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [Anónimo]. | Portal SUI | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [página web]. [Consultado el 25, junio, 2025]. Disponible en Internet: <https://sui.superservicios.gov.co/Reportes-del-Sector/Energia>.

Ilustración 20. Consumo promedio energía estrato 2



Fuente: ENERGÍA | Portal SUI | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [Anónimo]. | Portal SUI | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [página web]. [Consultado el 25, junio, 2025]. Disponible en Internet: <<https://sui.superservicios.gov.co/Reportes-del-Sector/Energia>>.

En la Ilustración 20 el comportamiento del consumo promedio mensual de energía en el estrato 2 presenta variaciones significativas entre ciudades. Barranquilla muestra consistentemente los valores mas altos, alcanzando hasta 234 [kWh/mes] en agosto, lo cual puede atribuirse a la elevada demanda de ventilación y enfriamiento asociada a su clima cálido húmedo. En contraste, en Medellín se encuentran los consumos más bajos, alcanzando valores estables alrededor de 121 – 125 [kWh/mes] durante todo el año, lo cual concuerda con su clima templado. Bogotá y Cali presentan consumos intermedios.

## 5.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS PERFILES DE USO, EQUIPOS Y OCUPACIÓN

En esta sección, se presentan tanto los perfiles de ocupación como aquellas variables correspondientes a los perfiles de cargas enchufables e iluminación que sirvieron de insumo para la construcción de los modelos energéticos de las edificaciones representativas objeto de estudio. La realización de estos perfiles de ocupación e iluminación se fundamentó en el tratamiento y análisis de la información derivada de estudios anteriores, de la literatura académica y datos de consumo energético obtenidos a través del Sistema Único de Información (SUI) de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

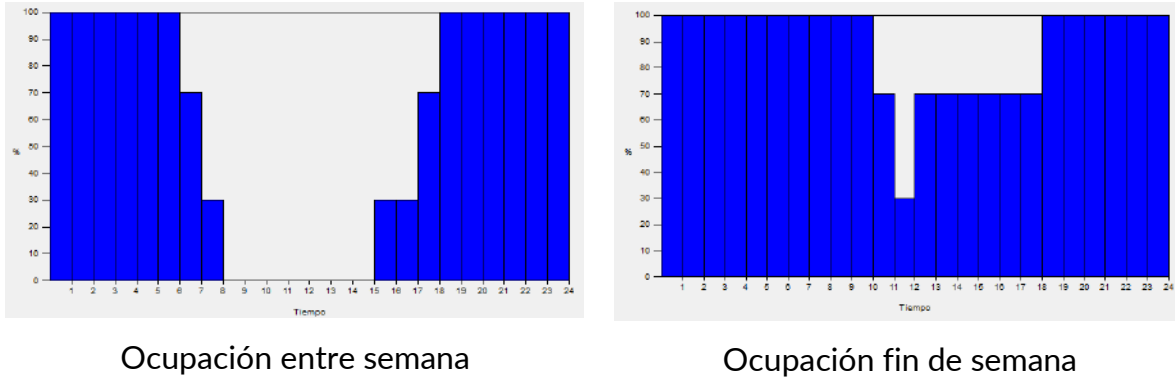
**5.2.1 Perfiles de ocupación.** Para todas las ciudades se optaron por usar los perfiles de ocupación correspondientes a un estudio titulado “Lineamientos para el establecimiento de un Sistema de Etiquetado Energético en Colombia a partir de Simulaciones Energéticas”<sup>18</sup>. La elección de estos perfiles se justificó en la usencia de información representativa en las ciudades, lo cual limitó la posibilidad de ajustarla según el contexto local. En el caso de Bogotá, se consideró una ocupación de tres personas por cada apartamento, para el resto de las ciudades, se asumió una ocupación de 4 personas.

A continuación, se presentan los perfiles de ocupación aplicables a las viviendas Multifamiliares Vis en Barranquilla, Bogotá, Cali y Medellín.

---

<sup>18</sup> CÁRDENAS RANGEL, JORGE LUIS; JARAMILLO IBARRA, JULIÁN E.; OSMA PINTO, GERMAN A. *Lineamientos técnicos para el sistema de etiquetado energético de edificaciones de Colombia: Anexo A* [documento técnico]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander; Minciencias; UPME, abril 2021.

Ilustración 21. Ocupación semana y fin de semana en todas las ciudades.



La ilustración 21 muestra el comportamiento horario de la ocupación de las viviendas multifamiliares en todas las ciudades. Se evidencia que durante los días de entre semana, algunas franjas horarias presentan una ocupación inferior al 100%, especialmente entre las 6:00 a.m. y las 5:00 p.m., lo cual se asocia con la salida de los residentes a sus actividades laborales y educativas. En contraste, los fines de semana la ocupación se mantiene más alta y constante a lo largo del día, lo que refleja una mayor permanencia en el hogar. Este comportamiento debe considerarse en la evaluación del confort térmico y en la estimación del consumo energético residencial.

**5.2.2 Perfiles para enchufables.** Para definir los perfiles de consumo asociados a equipos enchufables e iluminación, se establecieron perfiles específicos para cada una de las ciudades objeto de estudio. Estos perfiles fueron construidos a partir del conocimiento de expertos y ajustados con base en los datos medidos y reportados por el Sistema Único de Información (SUI).

Un aspecto relevante, adoptado a partir de las referencias consultadas e implementado en este proyecto, es la clasificación de los dispositivos eléctricos, según categorías de uso: Entretenimiento, cocina, frío, calor, ropa e iluminación. Adicionalmente en algunas ciudades con clima cálido se incorpora la categoría de Refrigeración/Ventilación.

Si bien en algunos casos particulares puede existir una mayor variedad y cantidad de

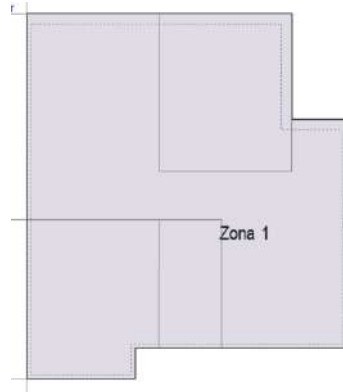
dispositivos eléctricos, el análisis se enfoca en aquellos equipos con mayor representatividad y cuya operación contribuye de forma significativa al consumo energético total de la vivienda.

La Tabla 13 presenta el desglose de las cargas eléctricas consideradas para una vivienda representativa del tipo multifamiliar VIS, correspondiente al estrato 2 en la ciudad de Bogotá. Asimismo, para el desarrollo de este caso de estudio, se utilizó como base de modelación la planta arquitectónica de la ilustración 22.

Tabla 13. Características de Carga para la ciudad de Bogotá

| PERFILES DE USO/CONSUMO EQUIPOS ENCHUFABLES E ILUMINACIÓN Bogotá |      |         |               |                   |                 |
|--|------|---------|---------------|-------------------|-----------------|
| TIPOLOGÍA  |      |         | MULTIFAMILIAR | VIS ESTRATO 2     |                 |
| ÁREA PROMEDIO TIPOLOGÍA  |      |         | 38 a 39       | [m <sup>2</sup> ] |                 |
| OCUPACIÓN PROMEDIO   |      |         | 3             | [personas]        |                 |
| CARACTERÍSTICAS DE CARGA   |      |         |               |                   |                 |
| APARATO  | CANT | Pot (W) | Ptot (W)      | Pot (W)/Cat       | Categoría       |
| Pc escritorio  | 1    | 140     | 140           |                   |                 |
| Equipo sonido y similares  | 2    | 100     | 200           | 340               | Entretenimiento |
| T.V.   | 2    | 110     | 220           |                   |                 |
| Licuadaora   | 1    | 400     | 400           | 400               | Cocina          |
| Nevera   | 1    | 110     | 110           | 110               | Frio            |
| Plancha ropa   | 1    | 1000    | 1000          |                   |                 |
| Plancha cabello  | 1    | 45      | 45            | 1045              | Calor           |
| Lavadora   | 1    | 370     | 370           | 370               | Ropa            |
| Iluminación  | 6    | 12      | 72            | 72                | Iluminación     |
| <b>Potencia total Iluminación (W)</b>                            |      |         | <b>72</b>     |                   |                 |
| <b>Potencia total enchufables (W)</b>                            |      |         | <b>2485</b>   |                   |                 |
| <b>Potencia total instalada (W)</b>                              |      |         | <b>2557</b>   |                   |                 |

Ilustración 22. Tipo planta DesignBuilder- Bogotá.



En las ilustraciones 23 y 24 se muestran los perfiles horarios de uso de los equipos enchufables para entre semana y fin de semana en la ciudad de Bogotá.

Ilustración 23. Enchufable Bogotá semana

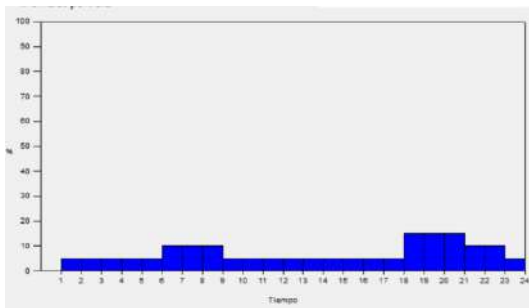
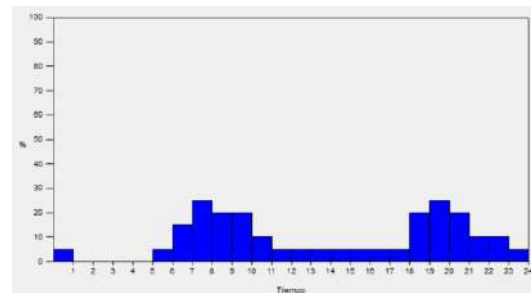


Ilustración 24. Enchufable Bogotá FDS



Para el caso de los equipos enchufables en Bogotá, en el software de DesignBuilder se definió una densidad de carga de  $62,48 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ .

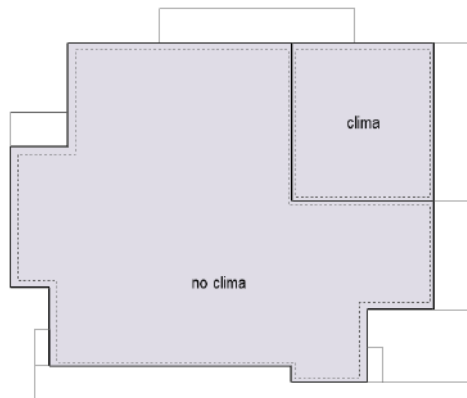
La Tabla 14 muestra el desglose de las cargas eléctricas consideradas para una vivienda representativa de tipo multifamiliar VIS, correspondiente al estrato 2 en la ciudad de Barranquilla. En este caso, el modelo se desarrolló con dos zonas térmicas, dado que en esta ciudad es común que en la habitación principal se utilice un ventilador. Por ello, se establecieron dos zonas: una denominada "clima", que representa los espacios con ventilación y otra "no clima" correspondiente a las áreas

sin equipos de acondicionamiento, como se muestra en la ilustración 25.

Tabla 14. Características de Carga para la ciudad de Barranquilla.

| PERFILES DE USO/CONSUMO EQUIPOS ENCHUFABLES E ILUMINACIÓN Barranquilla |      |         |               |               |                 |
|--|------|---------|---------------|---------------|-----------------|
| TIPOLOGÍA  |      |         | MULTIFAMILIAR | VIS ESTRATO 2 |                 |
| ÁREA PROMEDIO TIPOLOGÍA  |      |         | 56 a 57       | [m2]          |                 |
| OCUPACIÓN PROMEDIO   |      |         | 4             | [personas]    |                 |
| CARACTERÍSTICAS DE CARGA   |      |         |               |               |                 |
| APARATO  | CANT | Pot (W) | Ptot (W)      | Pot (W)/Cat   | Categoría       |
| Pc escritorio  | 1    | 140     | 140           |               |                 |
| T.V.   | 1    | 110     | 110           | 262           | Entretenimiento |
| Módem  | 1    | 12      | 12            |               |                 |
| Licadora   | 1    | 400     | 400           | 400           | Cocina          |
| Ventilador   | 2    | 80      | 160           |               |                 |
| Aire Acondicionado   | 0    | 1000    | 0             | 560           | Refrigeración   |
| Nevera   | 1    | 110     | 110           | 110           | Frio            |
| Plancha ropa   | 1    | 1000    | 1000          | 1000          | Calor           |
| Lavadora   | 1    | 370     | 370           | 370           | Ropa            |
| Iluminación  | 3    | 9       | 27            |               |                 |
| Iluminación  | 6    | 12      | 72            | 99            | Iluminación     |
| <b>Potencia total Iluminación (W)</b>                                  |      |         | <b>99</b>     |               |                 |
| <b>Potencia total enchufables (W)</b>                                  |      |         | <b>2302</b>   |               |                 |
| <b>Potencia total instalada (W)</b>                                    |      |         | <b>2401</b>   |               |                 |

Ilustración 25. Tipo planta DesignBuilder- Barranquilla



En las ilustraciones 26, 27 y 28 se muestran los perfiles horarios de uso de los equipos enchufables para la ciudad de Barranquilla

Ilustración 26. Enchufables clima Barranquilla semana y fin de semana

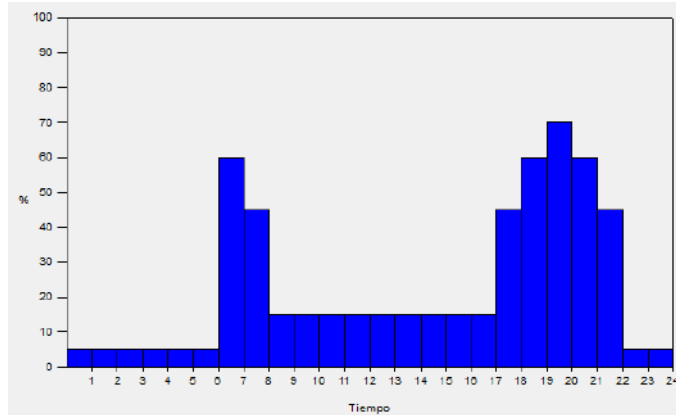


Ilustración 27. Enchufables no clima Barranquilla Semana

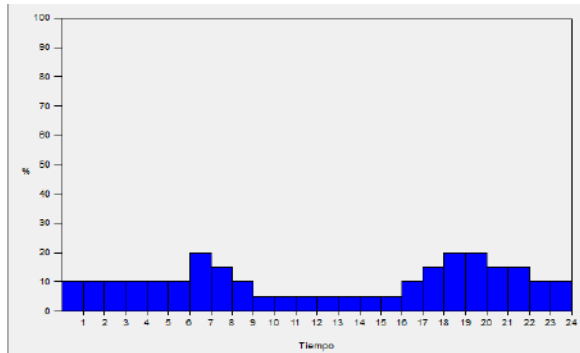
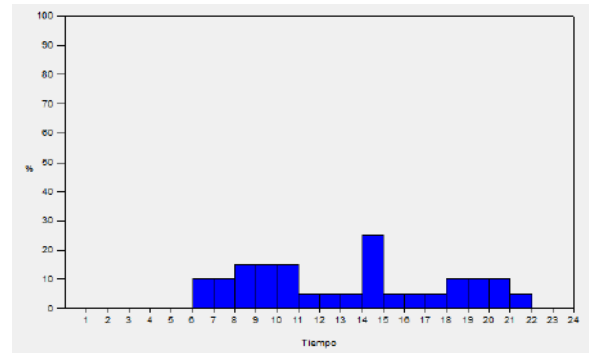


Ilustración 28. Enchufables no clima Barranquilla fin de semana



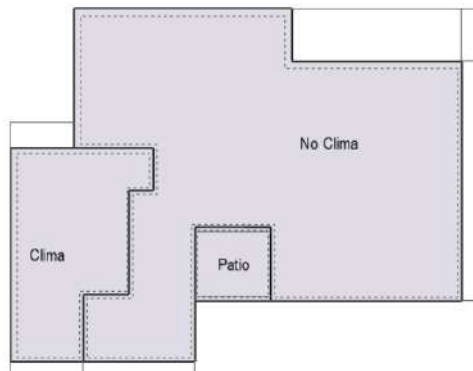
Para el caso de los equipos enchufables en Barranquilla, en el software de DesignBuilder se definió una densidad de carga para el “clima” de  $10,81 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$  y para “no clima” de  $57,78 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$

La Tabla 15 presenta el desglose de las cargas eléctricas utilizadas para el modelo de una vivienda tipo multifamiliar VIS de estrato 2 en la ciudad de Cali. Al igual que en el caso de Barranquilla, se definieron dos zonas térmicas una llamada “clima”, correspondiente al lugar donde se utiliza ventiladores y otra “no clima” para las áreas sin equipos de acondicionamiento como se muestra en la ilustración 29.

Tabla 15. Características de Carga para la ciudad de Cali

| PERFILES DE USO/CONSUMO EQUIPOS ENCHUFABLES E ILUMINACIÓN Cali |      |                             |             |             |                 |
|--|------|-----------------------------|-------------|-------------|-----------------|
| TIPOLOGÍA  |      | MULTIFAMILIAR VIS ESTRATO 2 |             |             |                 |
| ÁREA PROMEDIO TIPOLOGÍA  |      | 53 a 56                     |             | [m2]        |                 |
| OCUPACIÓN PROMEDIO   |      | 4                           |             | [personas]  |                 |
| CARACTERÍSTICAS DE CARGA                                       |      |                             |             |             |                 |
| APARATO  | CANT | Pot (W)                     | Ptot (W)    | Pot (W)/Cat | Categoría       |
| Pc escritorio  | 1    | 140                         | 140         | 262         | Entretenimiento |
| T.V.   | 1    | 110                         | 110         |             |                 |
| Módem  | 1    | 12                          | 12          |             |                 |
| Licuadaora   | 1    | 400                         | 400         | 400         | Cocina          |
| Ventilador   | 3    | 80                          | 240         | 240         | Refrigeración   |
| Aire Acondicionado   | 0    | 1000                        | 0           |             |                 |
| Nevera   | 1    | 110                         | 110         | 110         | Frio            |
| Plancha ropa   | 1    | 1000                        | 1000        | 1000        | Calor           |
| Lavadora   | 1    | 370                         | 370         | 370         | Ropa            |
| Iluminación  | 3    | 9                           | 27          | 99          | Iluminación     |
| Iluminación  | 6    | 12                          | 72          |             |                 |
| <b>Potencia total Iluminación (W)</b>                          |      |                             | <b>99</b>   |             |                 |
| <b>Potencia total enchufables (W)</b>                          |      |                             | <b>2382</b> |             |                 |
| <b>Potencia total instalada (W)</b>                            |      |                             | <b>2481</b> |             |                 |

Ilustración 29. Tipo planta DesignBuilder- Cali/Neiva.



En las ilustraciones 30 y 31 se muestran los perfiles horarios de uso de los equipos enchufables para la ciudad de Cali

Ilustración 30. Enchufables Cali semana

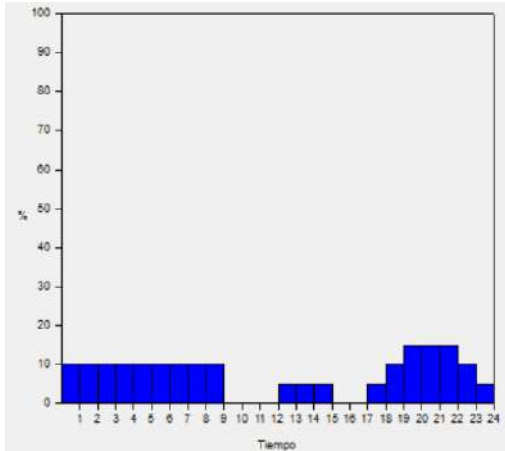
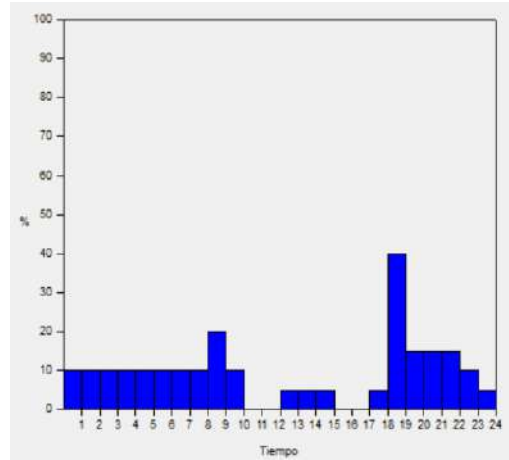


Ilustración 31. Enchufables Cali fin de semana



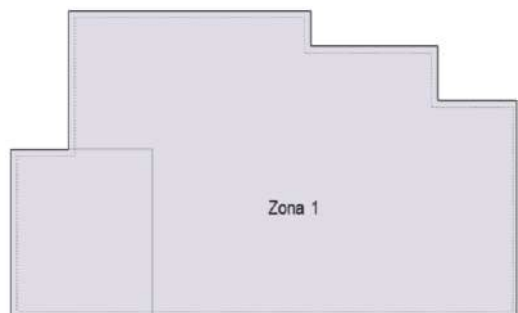
Para el caso de los equipos enchufables en Cali, en el software de DesignBuilder se definió una densidad de carga de  $57,78 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ .

La Tabla 16 presenta el desglose de las cargas eléctricas consideradas para una vivienda representativa de tipo multifamiliar VIS, correspondiente al estrato 2 en la ciudad de Medellín. En este caso de estudio, al igual que en Bogotá, se utilizó como base de modelación la planta arquitectónica presentada en la ilustración 32.

Tabla 16. Características de Carga para la ciudad de Medellín.

| PERFILES DE USO/CONSUMO EQUIPOS ENCHUFABLES E ILUMINACIÓN Medellín |      |               |             |               |                 |
|--|------|---------------|-------------|---------------|-----------------|
| TIPOLOGÍA  |      | MULTIFAMILIAR |             | VIS ESTRATO 2 |                 |
| ÁREA PROMEDIO TIPOLOGÍA  |      | 44 a 46       |             | [m2]          |                 |
| OCUPACIÓN PROMEDIO   |      | 4             |             | [personas]    |                 |
| CARACTERÍSTICAS DE CARGA   |      |               |             |               |                 |
| APARATO  | CANT | Pot (W)/und   | Ptot (W)    | Ptot (W)/Cat  | Categoría       |
| Pc escritorio  | 1    | 140           | 140         |               |                 |
| Equipo sonido y similares  | 1    | 100           | 100         | 460           | Entretenimiento |
| T.V.   | 2    | 110           | 220         |               |                 |
| Licudadora   | 1    | 400           | 400         | 400           | Cocina          |
| Nevera   | 1    | 110           | 110         | 110           | Frio            |
| Plancha ropa   | 1    | 1000          | 1000        | 1045          | Calor           |
| Plancha cabello  | 1    | 45            | 45          |               |                 |
| Lavadora   | 1    | 370           | 370         | 370           | Ropa            |
| Iluminación  | 3    | 9             | 27          | 111           | Iluminación     |
| Iluminación  | 7    | 12            | 84          |               |                 |
| <b>Potencia total Iluminación (W)</b>                              |      |               | <b>84</b>   |               |                 |
| <b>Potencia total enchufables (W)</b>                              |      |               | <b>2385</b> |               |                 |
| <b>Potencia total instalada (W)</b>                                |      |               | <b>2469</b> |               |                 |

Ilustración 32. Tipo planta DesignBuilder- Medellín.



En las ilustraciones 33 y 34 se muestran los perfiles horarios de uso de los equipos enchufables para la ciudad de Medellín.

Ilustración 33. Enchufables Medellín semana

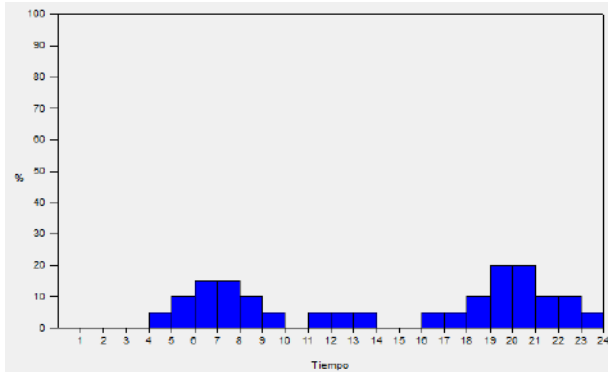
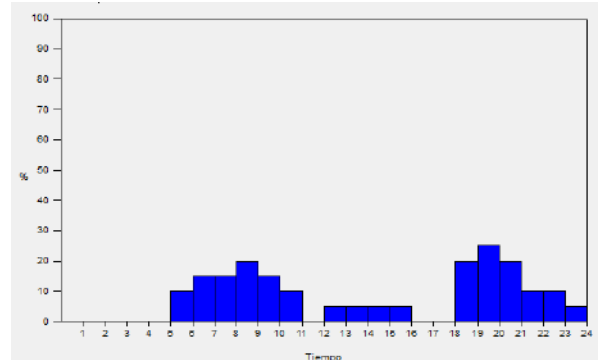


Ilustración 34. Enchufables Medellín fin de semana



Para el caso de los equipos enchufables en Bogotá, en el software de DesignBuilder se definió una densidad de  $49,69 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ .

**5.2.3 Perfiles de iluminación.** En los perfiles de iluminación se tuvo en cuenta la cantidad de luminarias incluidas en cada ciudad, según el diseño de la planta arquitectónica del edificio. Las Ilustraciones 35, 36, 37, 38 y 39 presentan los perfiles de carga de iluminación correspondiente a la tipología de vivienda Multifamiliar VIS en las diferentes ciudades. Como era de esperarse, el mayor uso de los sistemas de iluminación se concentra en las primeras horas de la mañana y en la noche.

Ilustración 35. Iluminación Bogotá semana y fin de semana.

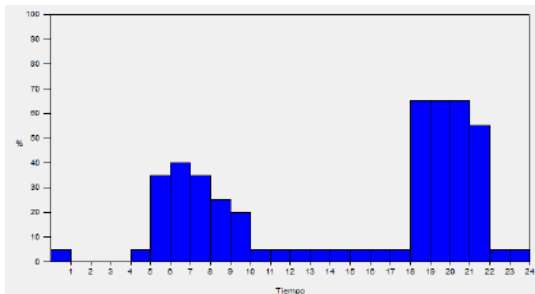


Ilustración 36. Iluminación clima Barranquilla semana y fin de semana.

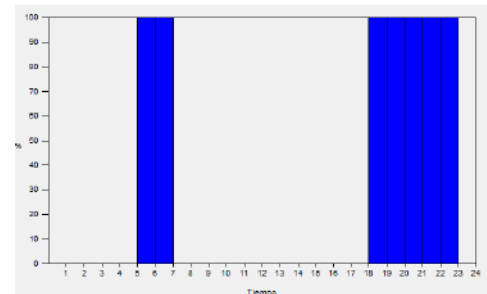


Ilustración 37. Iluminación no clima Barranquilla semana y fin de semana.

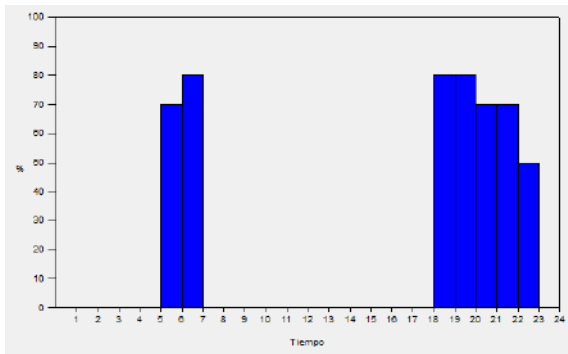


Ilustración 38. Iluminación Cali semana y fin de semana.

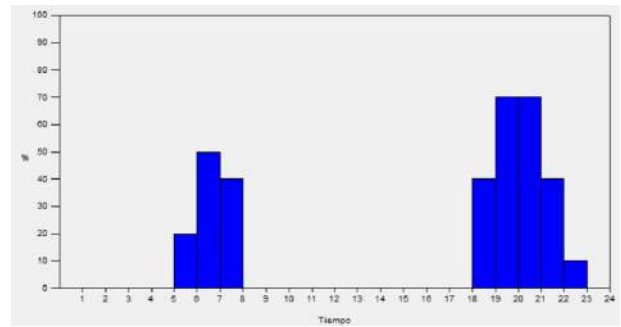
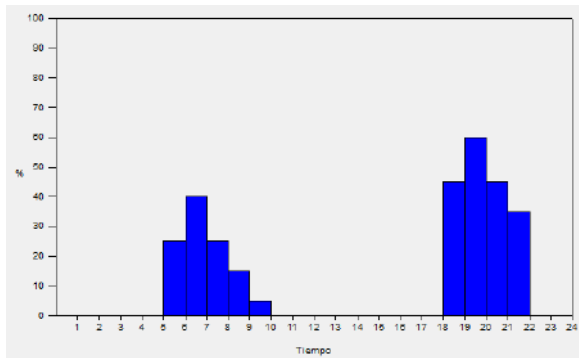


Ilustración 39. Iluminación Medellín semana y fin de semana



Los perfiles horarios de iluminación presentan diferencias entre las ciudades estudiadas, las cuales están relacionadas con los horarios de ocupación, la disponibilidad de iluminación natural y la cantidad de las iluminarias instaladas en cada vivienda.

En Bogotá, el encendido de la iluminación inicia desde las 4:00 a.m. lo cual se asocia a los largos tiempos de desplazamiento laboral característicos de la ciudad, después se observa un descenso después de las 10 a.m., aunque no se elimina por completo durante el día, debido a una menor disponibilidad de iluminación natural. El periodo de

mayor uso se concentra nuevamente entre las 6:00 p.m. y las 10:00 p.m., correspondiente al regreso de los ocupantes a la vivienda.

En Barranquilla, los perfiles muestran otro comportamiento. En el área climatizada (habitación principal), al contar únicamente con una luminaria el perfil alcanza el 100% de iluminación durante los periodos de uso, entre las 5:00 a.m. y 7:00 a.m., y nuevamente entre las 6:00 p.m. y 11:00 p.m. En el área no climatizada donde se dispone 5 luminarias de 12 [W] y 3 de 9[W], con el mismo horario del área climatizada.

En Cali y Neiva, la iluminación se enciende entre las 5:00 a.m. y las 8:00 a.m. y nuevamente entre las 6:00 p.m. y las 11:00 p.m. donde se cuenta con 3 bombillos de 9[W] y 6 de 12 [W].

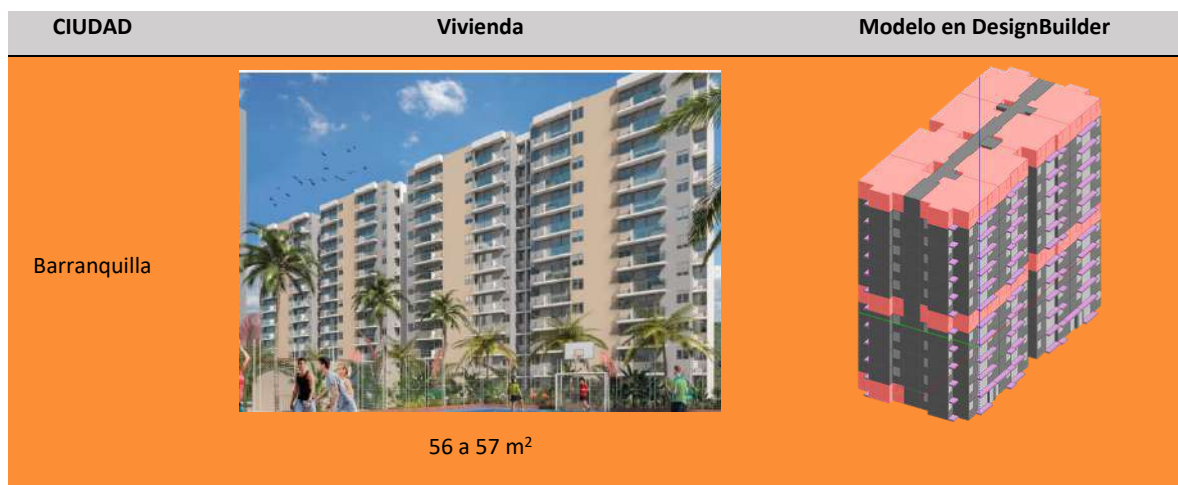
Finalmente, en Medellín donde se cuenta con 3 luminarias de 9 [W] y 7 de 12 [W], las luces se encienden a la misma hora de Barranquilla y Cali pero con la diferencia que dura encendida hasta 10 a.m., en horas de la tarde y noche, el uso se concentra entre las 6:00 p.m. y las 11:00 p.m., siguiendo el patrón de retorno a la vivienda.

## **6. DESARROLLO Y SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE LOS MODELOS**

Los modelos energéticos de las ciudades de estudio fueron construidos tomando como base la planta tipo de cada edificación representativa junto con los planos proporcionados por las constructoras y se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Planta de la vivienda típica de cada ciudad.

| CIUDAD            | Vivienda   | Modelo en DesignBuilder   |
|-------------------|--|---|
| <b>Bogotá</b>     |  <p data-bbox="673 577 787 619">38 a 39 m<sup>2</sup></p>     |    |
| <b>Medellín</b>   |  <p data-bbox="673 976 787 1018">44 a 46 m<sup>2</sup></p>    |   |
| <b>Cali/Neiva</b> |  <p data-bbox="673 1375 787 1417">53 a 56 m<sup>2</sup></p> |  |



Para garantizar la calidad de los modelos energéticos de las ciudades objeto se muestra el porcentaje de error entre los valores medidos y simulados en las tablas 18 a 21.

Tabla 18. Comparación de consumos con el SUI y Datos Obtenidos - Bogotá.

|                   | SUI<br>[kWh-mes] | Obtenidos<br>[kWh-mes] | Porcentaje<br>de error |
|-------------------|------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Enero</b>      | <b>145,42</b>    | 144,33                 | 1%                     |
| <b>Febrero</b>    | <b>130,95</b>    | 129,05                 | 1%                     |
| <b>Marzo</b>      | <b>135,76</b>    | 145,59                 | 7%                     |
| <b>Abril</b>      | <b>144,23</b>    | 140,08                 | 3%                     |
| <b>Mayo</b>       | <b>138,39</b>    | 143,06                 | 3%                     |
| <b>Junio</b>      | <b>138,58</b>    | 142,61                 | 3%                     |
| <b>Julio</b>      | <b>141,08</b>    | 144,33                 | 2%                     |
| <b>Agosto</b>     | <b>136,97</b>    | 145,59                 | 6%                     |
| <b>Septiembre</b> | <b>140,87</b>    | 138,81                 | 1%                     |
| <b>Octubre</b>    | <b>141,31</b>    | 143,06                 | 1%                     |
| <b>Noviembre</b>  | <b>141,49</b>    | 141,35                 | 0%                     |
| <b>Diciembre</b>  | <b>143,64</b>    | 145,59                 | 1%                     |
| <b>TOTAL</b>      | <b>1678,69</b>   | <b>1703,45</b>         | <b>1%</b>              |

Fuente: ENERGÍA | Portal SUI | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [Anónimo]. | Portal SUI | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [página

web]. [Consultado el 25, junio, 2025]. Disponible en Internet:  
<https://sui.superservicios.gov.co/Reportes-del-Sector/Energia>.

Como se observa en la tabla 18, los porcentajes de error mensuales en su mayoría está por debajo del 3%, con excepción de marzo y agosto, aun así el porcentaje de error anual es de 1%, lo que indica una alta correlación entre los valores medidos y los obtenidos mediante la simulación.

Tabla 19. Comparación de consumos con el SUI y Datos Obtenidos - Medellín.

| Mes          | SUI [kWh-mes]  | Obtenidos [kWh-mes] | Porcentaje de error |
|--------------|----------------|---------------------|---------------------|
| Enero        | 123,49         | 128,71              | 4,2%                |
| Febrero      | 120,69         | 112,96              | 6,4%                |
| Marzo        | 122,2          | 126,74              | 3,7%                |
| Abril        | 121,69         | 122,15              | 0,4%                |
| Mayo         | 122,8          | 125,17              | 1,9%                |
| Junio        | 122,42         | 123,71              | 1,1%                |
| Julio        | 123,13         | 125,96              | 2,3%                |
| Agosto       | 125,48         | 126,74              | 1,0%                |
| Septiembre   | 123,58         | 121,36              | 1,8%                |
| Octubre      | 124,37         | 125,17              | 0,6%                |
| Noviembre    | 121,98         | 122,93              | 0,8%                |
| Diciembre    | 122,87         | 126,74              | 3,1%                |
| <b>TOTAL</b> | <b>1474,70</b> | <b>1488,35</b>      | <b>1%</b>           |

Fuente: ENERGÍA | Portal SUI | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [Anónimo]. | Portal SUI | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [página web]. [Consultado el 25, junio, 2025]. Disponible en Internet:  
<https://sui.superservicios.gov.co/Reportes-del-Sector/Energia>.

En la Tabla 19, los porcentajes de error son menores del 6,4%, con un promedio anual del 1%, lo que respalda la exactitud del modelo energético utilizado.

Tabla 20. Comparación de consumos con el SUI y Datos Obtenidos - Cali

| Fecha        | SUI<br>[kWh-mes] | Obtenidos<br>[kWh-mes] | Porcentaje<br>de error |
|--------------|------------------|------------------------|------------------------|
| Enero        | 148,11           | 150,06                 | 1,3%                   |
| Febrero      | 150,26           | 134,34                 | 10,6%                  |
| Marzo        | 150,86           | 151,22                 | 0,2%                   |
| Abril        | 145,86           | 145,60                 | 0,2%                   |
| Mayo         | 150,97           | 148,90                 | 1,4%                   |
| Junio        | 148,48           | 147,91                 | 0,4%                   |
| Julio        | 146,49           | 150,06                 | 2,4%                   |
| Agosto       | 148,08           | 151,22                 | 2,1%                   |
| Septiembre   | 149,44           | 144,44                 | 3,3%                   |
| Octubre      | 149,26           | 148,90                 | 0,2%                   |
| Noviembre    | 147,48           | 146,75                 | 0,5%                   |
| Diciembre    | 145,69           | 151,22                 | 3,8%                   |
| <b>TOTAL</b> | <b>1780,98</b>   | <b>1770,625</b>        | <b>0.6%</b>            |

Fuente: ENERGÍA | Portal SUI | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [Anónimo]. | Portal SUI | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [página web]. [Consultado el 25, junio, 2025]. Disponible en Internet: <<https://sui.superservicios.gov.co/Reportes-del-Sector/Energia>>.

En la Tabla 20, los porcentajes de error mensuales se mantienen en su mayoría por debajo del 4%, a excepción de febrero. El resultado anual muestra un error del 0,6% lo que confirma la exactitud del consumo energético para la ciudad.

Tabla 21. Comparación de consumos con el SUI y Datos Obtenidos - Barranquilla.

|            | SUI<br>[kWh-mes] | Obtenidos<br>[kWh-mes] | Porcentaje<br>de error |
|------------|------------------|------------------------|------------------------|
| Enero      | 204,86           | 205,352                | 0%                     |
| Febrero    | 189,60           | 188,046                | 1%                     |
| Marzo      | 193,83           | 202,865                | 5%                     |
| Abril      | 208,57           | 197,925                | 5%                     |
| Mayo       | 212,38           | 207,839                | 2%                     |
| Junio      | 217,66           | 192,951                | 11%                    |
| Julio      | 221,10           | 205,352                | 7%                     |
| Agosto     | 233,80           | 202,865                | 13%                    |
| Septiembre | 231,33           | 200,413                | 13%                    |
| Octubre    | 227,95           | 207,839                | 9%                     |

|              | SUI<br>[kWh-mes]  | Obtenidos<br>[kWh-mes] | Porcentaje<br>de error |
|--------------|-------------------|------------------------|------------------------|
| Noviembre    | 216,55            | 195,438                | 10%                    |
| Diciembre    | 216,30            | 202,865                | 6%                     |
| <b>TOTAL</b> | <b>2573,90214</b> | <b>2409,75</b>         | <b>6%</b>              |

Fuente: ENERGÍA | Portal SUI | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [Anónimo]. | Portal SUI | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [página web]. [Consultado el 25, junio, 2025]. Disponible en Internet: <<https://sui.superservicios.gov.co/Reportes-del-Sector/Energia>>.

En la Tabla 21 los porcentajes de error varían entre 0% y 13%, con los valores mas altos en agosto y septiembre. El promedio anual es del 6%, esto indica que, a pesar de las desviaciones puntuales, el modelo mantiene un nivel adecuado para representar el comportamiento energético de la ciudad.

Es importante señalar que en el diseño del modelo se incluyeron 17 días festivos con el fin de aproximarse más a la realidad. Estos días suelen pasarse mayormente en casa, lo que implica un aumento en el consumo energético.

Las simulaciones tuvieron en cuenta el modelado de la ventilación natural. Para la apertura de las ventanas de corredera se usó una apertura del 50% del área total. Esto quiere decir que el aire que ingresa depende del porcentaje de apertura y las características geométricas de la ventana. Los valores aplicados se representan en la ilustración 40 y 41, se mantuvieron idénticos para todos los casos debido a la limitada disponibilidad de datos específicos en la literatura. Esta decisión se fundamentó y validó con el apoyo de especialistas con experiencia en el análisis y modelado en edificaciones.

Ilustración 40. Apertura de ventanas Semana para cada una de las ciudades

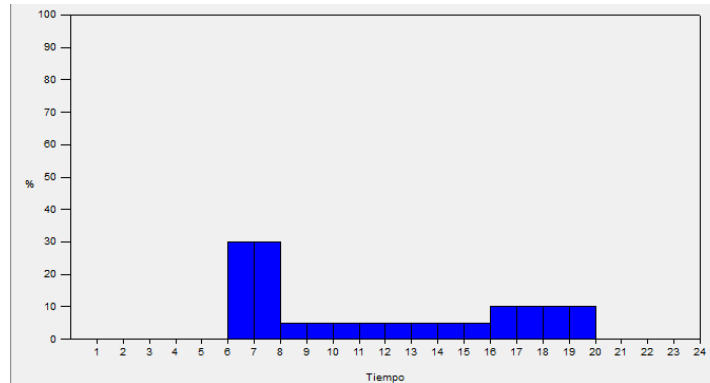
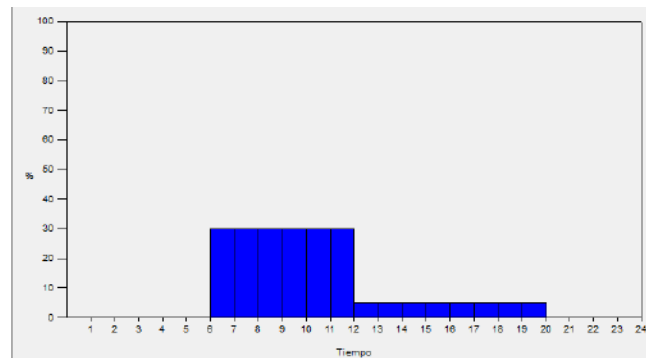


Ilustración 41. Apertura Ventanas Fin de Semana para cada una de las ciudades



Para los análisis de ventilación natural y climatización, un aspecto considerado en el modelo fue la influencia de la vestimenta a las condiciones de confort, particularmente en climas fríos. Para el caso de Bogotá, se establecieron distintos niveles de aislamiento térmico clo a lo largo del día: desde las 7:00 a.m. hasta las 8:00 p.m. tiene un clo de 0,93 y desde las 8:00 p.m. hasta las 7:00 a.m. tiene un clo de 2,4. Esta configuración responde al hecho de que en horas nocturnas y de madrugada, las personas suelen utilizar cobijas. Para las demás ciudades se mantuvo un valor constante de 0,5 clo, correspondiente a vestimenta ligera.

En todos los modelos se consideró una tasa metabólica correspondiente a la condición standing relaced, que representa aproximadamente  $1,2[met]$  y se aplicó un factor de corrección de 0,9 para aproximar un valor entre hombres y mujeres. Estos términos se explican con mayor detalle en el capítulo correspondiente a evaluación de modelos de

confort térmico adaptativo.

Asimismo, se adoptó un caudal de aire exterior de 7 [L/s – *persona*] (equivalente a 15 [cfm – *persona*]) conforme lo establecido en la Tabla E-2 de la norma *ASHRAE 62.1- Outdoor Air Requirements for Ventilation of Residential Facilities*.<sup>19</sup>

## 7. EVALUACIÓN DE MODELOS DE CONFORT TÉRMICO ADAPTATIVO

Según el Dr. Victor Fuentes Freizanet (2004), el confort es un estado tanto físico como mental, en el que el individuo experimenta satisfacción con las condiciones de su entorno, esta percepción está influenciada por factores fisiológicos y psicológicos.<sup>20</sup>

La Norma ISO 7730 define el confort térmico como “La condición mental en la que una persona está satisfecha con el ambiente térmico”<sup>21</sup>

El confort térmico es fundamental no solo para el bienestar de los ocupantes, sino también por su impacto en el consumo energético. La ausencia de neutralidad térmica implica la necesidad de emplear sistemas de calefacción o refrigeración, lo que a su vez incrementa el consumo de energía y afecta la sostenibilidad ambiental.

La ilustración 42 compara dos enfoques utilizados para analizar el confort térmico en edificaciones. Estos modelos responden a distintas formas de entender la relación entre las personas y el ambiente.

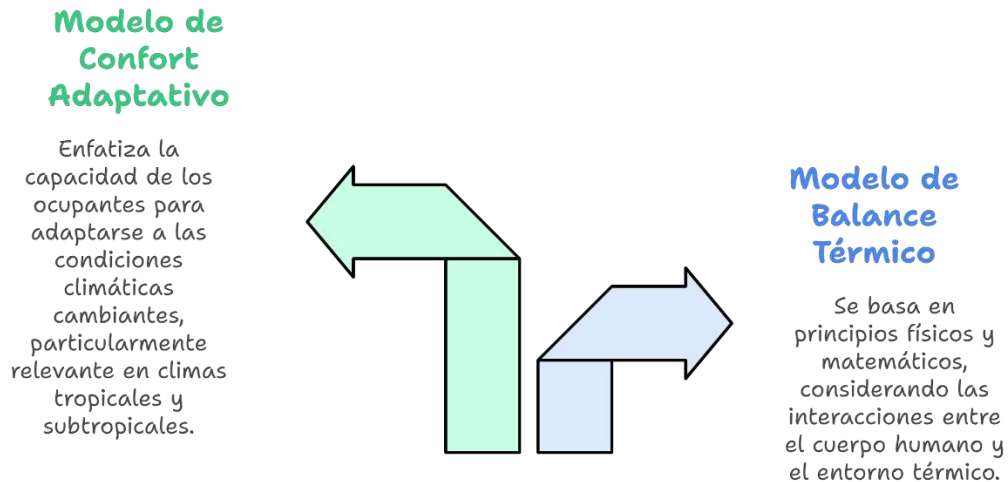
---

<sup>19</sup> ANSI/ASHRAE. *Addendum n al ANSI/ASHRAE Standard 62-2001: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality* [norma técnica]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2003.

<sup>20</sup> CANAL CONUEE. ¿Qué es el confort adaptativo? y su impacto en el consumo de energía de un edificio [video]. YouTube. (3, agosto, 2022). [Consultado el 20, marzo, 2025]. 76:25 min

<sup>21</sup> GODOY MUÑOZ, Alfonso. El Confort térmico adaptativo. Aplicación en la edificación en España. Página inicial de UPCommons [página web]. (Junio, 2012). [Consultado el 20, marzo, 2025].

Ilustración 42. Comparación entre el Modelo de Confort Adaptativo y el Modelos de Balance Térmico.



Las principales variables que intervienen en esta sensación de confort son:

- Temperatura interior
- Humedad relativa
- Velocidad del aire
- Temperatura media radiante

Existen otras variables que dependen de los ocupantes de las viviendas como lo es la vestimenta (clo) y el nivel de actividad física (met). El metabolismo humano actúa como un motor y la energía se mide en (met), donde 1 met equivale al metabolismo de una persona en reposo o en estado sedentario y durante la práctica o ejercicio intenso puede superar los 10 met. Por otro lado, la vestimenta actúa como una barrera que reduce la pérdida de calor del cuerpo, y su grado de aislamiento térmico se mide en clo. La escala parte del 0,0 clo para una persona desnuda, y va aumentando según las capas de ropa utilizadas.

### 7.1. CARACTERÍSTICAS Y LIMITACIONES DE LAS NORMAS

En el caso de la norma ASHRAE 55, el modelo de confort térmico adaptativo se define en función de la temperatura media exterior prevaeciente, calculada a partir de un periodo comprendido entre 7 y 30 días previos al día de estudio. Su validez se respalda

por 160 estudios en edificaciones de distintos continentes, lo que otorga un alcance global<sup>22</sup>. La norma establece un rango de aplicación entre 10 [°C] y 33,5 [°C] y se considera tasas metabólicas entre 1,0[*met*] y 1,3 [*met*]. Sin embargo, presenta algunas limitaciones como no especificar los tipos de edificios en los que puede aplicarse y cuando la temperatura exterior media no se encuentra dentro del rango señalado, deja de ser aplicable y se debe recurrir al modelo de Fanger.

Por su parte, la norma EN 15251 / prEN 16798-1 establece un rango de aplicación más restringido, válido para temperatura medias exteriores entre 10[°C] y 30 [°C] de temperatura media exterior. Su enfoque está dirigido principalmente a edificios de oficinas y otros de tipología similar, como lo son edificios residenciales. Igual que en la norma ASHRAE 55 cuando no se cumple el rango se debe utilizar el modelo de Fanger.

## **7.2. ECUACIONES DE LOS MODELOS DE CONFORT ADAPTATIVO**

En este estudio se emplean las ecuaciones propuestas por las normas ASHRAE 55<sup>23</sup> y EN 15251<sup>24</sup>, las cuales definen rangos de aceptabilidad térmica mediante ecuaciones lineales en función de la temperatura media exterior.

**7.2.1. Modelo adaptativo según ASHRAE 55.** La norma ASHRAE 55 define la temperatura operativa a partir de la temperatura media exterior predominante ( $T_{pma(out)}$ ). A partir de este valor se establecen límites superiores e inferiores de confort para distintos niveles de aceptabilidad (80% y 90%).

En el presente estudio se adopta el criterio de aceptabilidad del 80%. Las ecuaciones

---

<sup>22</sup> CARLUCCI, S., *et al.* Op. cit., p. 75.

<sup>23</sup> THERMAL ENVIRONMENTAL Conditions for Human Occupancy [Anónimo]. ASHRAE 55. [s.l.]: [s.n.], 2020.

<sup>24</sup> CARLUCCI, S., *et al.* Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents. En: Building and Environment [en línea]. Junio, 2018. vol. 137 [consultado el 20, marzo, 2025], p. 77.

empleadas se presentan a continuación:

$$\textit{limite superior 80\%} = 0.31 (T_{pma(out)}) + 21.3 \quad (1)$$

$$\textit{Optimo} = 0.31 (T_{pma(out)}) + 17.8 \quad (2)$$

$$\textit{limite inferior 80\%} = 0.31 (T_{pma(out)}) + 14.3 \quad (3)$$

La temperatura media exterior predominante se calcula mediante una media móvil ponderada, que considera las temperaturas medias diarias del aire exterior correspondientes a los días previos al día de análisis, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$T_{pma(out)} = (1-\alpha) * [t_e(d_{-1}) + \alpha * t_e(d_{-2}) + \alpha^2 * t_e(d_{-3}) + \alpha^3 * t_e(d_{-4}) + \dots] \quad (4)$$

En donde;

$(T_{pma(out)}) =$  Temperatura media del aire exterior

$t_e(d_{-1}) =$  temperatura media diaria del aire exterior

$\alpha =$  es constante de 0 a 1

De acuerdo con la norma, la temperatura exterior media predominante ( $T_{pma(out)}$ ) puede determinarse a partir del promedio aritmético de las temperaturas medias diarias del aire exterior, calculadas con una secuencia de 7 a 30 días previos al día de análisis. Este procedimiento puede expresarse mediante una media móvil ponderada, como se muestra en la ecuación 4.

Adicionalmente, la norma ASHRAE55 2004 permite utilizar los promedios meteorológicos mensuales del aire exterior y se calcula como el promedio aritmético de las temperaturas medias diarias correspondientes al mes de análisis, según la ecuación (5)

$$(T_{pma(out)}) = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N tmd_{(out,i)} \quad (5)$$

Donde;

$(T_{pma(out)}) =$  *Temperatura media del aire exterior*

$tmd_{(out,i)}$  = *Temperatura media diaria del aire exterior del día i*

$N$  = *es el número de días del mes*

**7.2.2. Modelo adaptativo según EN 15251.** La norma EN 15251 establece el confort térmico adaptativo mediante la temperatura media exterior ponderada  $\Theta_{rm}$ , a partir de la cual se definen categorías de confort (I, II y III), asociadas a distintos niveles de exigencia.

En este estudio se adopta la categoría II, el cual es equivalente con el 80% de aceptabilidad de la norma ASHRAE 55. Esta elección hace posible una comparación entre ambos estándares. Las ecuaciones empleadas son las siguientes:

$$\text{limite superior de categoría II} = 0.33 (\Theta_{rm}) + 18.8 + 3 \quad (6)$$

$$\text{Confort temperatura optima} = 0.33 (\Theta_{rm}) + 18.8 \quad (7)$$

$$\text{limite inferior de categoría II} = 0.33 (\Theta_{rm}) + 18.8 - 3 \quad (8)$$

La temperatura media exterior ponderada  $\Theta_{rm}$  se calcula mediante una expresión análoga a la media móvil empleado en ASHRAE 55:

$$\Theta_{rm} = (1-\alpha) * [(\Theta_{ed-1}) + \alpha * (\Theta_{ed-2}) + \alpha^2 * (\Theta_{ed-3}) + \alpha^3 * (\Theta_{ed-4}) + \dots] \quad (9)$$

En donde:

$\Theta_{rm}$  = *Temperatura media del aire exterior*

$\Theta_{ed} - 1$  = *Temperatura media diaria del aire exterior*

$\alpha$  = *es constante de 0 a 1*

Tanto la norma EN 15251 como ASHRAE 55 la temperatura media del aire exterior se calculó a partir de la temperatura de bulbo seco exterior horaria obtenida del archivo climático EPW. Para cada día se realizó un promedio aritmético de las 24 horas para tener la temperatura media diaria del aire exterior.

El término  $\Theta_{ed} - 1$  representa la temperatura media diaria exterior del día anterior al día

de análisis, mientras que  $\theta_{ed} - 2$  corresponde al día inmediatamente anterior a este, y así sucesivamente para los días previos.

Por su parte,  $\alpha$  es una constante con valores entre 0 y 1. En este estudio, se adoptó un valor de  $\alpha = 0,8$ .

**7.2.3. Cálculo de la temperatura media del aire exterior.** Para la norma ASHRAE 55, se utilizan las ecuaciones 1,5 y 7, siguiendo el procedimiento empleado por el software Climate Consultant 6.0.

A partir de los datos horarios de temperatura de bulbo seco, se calcula el promedio mensual de la temperatura exterior, conforme a la ecuación 7 de la norma ASHRAE 55. Este valor representa la temperatura exterior media predominante mensual.

Los resultados para la ciudad de Bogotá se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22. Temperatura media mensual para Bogotá

| Mes        | Temperatura media mensual [°C] |
|------------|--------------------------------|
| Enero      | 13,99                          |
| Febrero    | 14,27                          |
| Marzo      | 14,36                          |
| Abril      | 14,34                          |
| Mayo       | 14,57                          |
| Junio      | 14,22                          |
| Julio      | 14,06                          |
| Agosto     | 13,95                          |
| Septiembre | 14,12                          |
| Octubre    | 13,96                          |
| Noviembre  | 14,11                          |
| Diciembre  | 14,06                          |

Una vez obtenida la temperatura media mensual, se aplica la ecuación 1 para el cálculo del límite superior de confort y la ecuación 3 para el cálculo del límite inferior ambas correspondientes a un 80% de aceptabilidad, según ASHARA 55.

Ejemplo para el mes de enero:

$$\text{limite superior } 80\%_{\text{enero}} = 0.31 (13.99) + 21.3 = 25.64[^\circ\text{C}]$$

$$\text{limite inferior } 80\%_{\text{enero}} = 0.31 (13.99) + 14.3 = 18.64[^\circ\text{C}]$$

Los resultados para todos los meses se presentan en la Tabla 23:

Tabla 23. Resultados de Bogotá según la norma ASHARAE

| Mes        | Lim Sup<br>[°C] | Lim inf<br>[°C] |
|------------|-----------------|-----------------|
| Enero      | 25,64           | 18,64           |
| Febrero    | 25,72           | 18,72           |
| Marzo      | 25,75           | 18,75           |
| Abril      | 25,75           | 18,75           |
| Mayo       | 25,82           | 18,82           |
| Junio      | 25,71           | 18,71           |
| Julio      | 25,66           | 18,66           |
| Agosto     | 25,63           | 18,63           |
| Septiembre | 25,68           | 18,68           |
| Octubre    | 25,63           | 18,63           |
| Noviembre  | 25,67           | 18,67           |
| Diciembre  | 25,66           | 18,66           |

Con el fin de facilitar la comparación con los resultados obtenidos mediante el software Climate Consultant 6.0 y de permitir una evaluación uniforme de las horas de confort y desconfort térmico, se define un rango anual constante de confort térmico. Para ello el límite inferior anual se toma como el valor mínimo de los límites inferiores mensuales y el límite superior anual se toma como el valor máximo de los límites superiores mensuales.

Para la ciudad de Bogotá, el rango anual de confort según ASHRAE 55 (80%) queda definido como:

$$\text{limite inferior } 80\%_{\text{Bogotá}} = 18.63[^\circ\text{C}] \approx 18.6[^\circ\text{C}]$$

$$\text{limite superior } 80\%_{\text{Bogotá}} = 25.82[^\circ\text{C}] \approx 25.9[^\circ\text{C}]$$

Para la norma EN15251 se utilizan las ecuaciones 6, 8 y 9.

Dado que los datos climáticos se encuentran en formato horario, se calcula inicialmente el promedio diario de la temperatura de bulbo seco exterior. A partir de estas temperaturas medias diarias se determina la temperatura exterior media predominante mediante la ecuación 15, utilizando un valor de  $\alpha = 0,8$ , recomendado por la norma.

Con la temperatura exterior media predominante se calculan los límites diarios de confort adaptativo, empleando la ecuación 6 para el límite superior y la ecuación 8 para el límite inferior.

Con el fin de establecer un rango anual constante de confort térmico, el límite inferior anual se define como el valor mínimo de los límites inferiores diarios obtenidos durante el año, mientras que el límite superior anual corresponde al valor máximo de los límites superiores diarios. Este rango anual se utiliza después para el análisis de horas de cumplimiento y desconfort térmico en las viviendas.

La Tabla 24 resume los resultados calculados de los límites de confort adaptativo establecidos en las normas ASHRAE 55 y EN15251.

Tabla 24. Temperaturas de rangos de confort adaptativo (ASHRAE 55; EN 15251)

|  | Bogotá    | Medellín  | Cali      | Neiva     | Barranquilla |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| Límite inferior de confort adaptativo ASHRAE55 (80%)                                 | 18,6 [°C] | 20,2 [°C] | 21,3 [°C] | 22,4 [°C] | 22,7 [°C]    |
| Límite superior de confort adaptativo ASHRAE55 (80%)                                 | 25,9 [°C] | 27,6 [°C] | 28,7 [°C] | 30,0 [°C] | 30,2 [°C]    |
| Límite inferior de confort adaptativo EN 15251 (80%)                                 | 19,2 [°C] | 20,4 [°C] | 21,3 [°C] | 22,0 [°C] | 22,6 [°C]    |
| Límite superior de confort adaptativo EN 15251 (80%)                                 | 26,8 [°C] | 28,8 [°C] | 29,6 [°C] | 30,8 [°C] | 31,1 [°C]    |
| <b>La velocidad del aire es controlada mediante el cierre y apertura de ventanas</b> |           |           |           |           |              |

Al comparar los límites de confort térmico obtenidos mediante el cálculo manual según la norma ASHRAE 55 con los proporcionados por el programa Climate Consultant 6.0, se evidencia que los resultados son equivalentes. Esto valida el procedimiento metodológico empleado para la determinación de los rangos de confort térmico.

En la Tabla 25 se presentan los rangos anuales utilizados para la determinación de las

horas de confort y desconfort térmico. Estos rangos se obtuvieron a partir de los valores mostrados en la Tabla 24, incorporando un margen de  $\pm 0,1[^\circ\text{C}]$ .

Este margen se adoptó debido al manejo de valores decimales en los cálculos horarios. En ausencia de dicho margen, temperaturas muy cercanas al límite de confort (por ejemplo, un valor de  $15,9999 [^\circ\text{C}]$  frente a un límite inferior de  $16 [^\circ\text{C}]$ ) podrían ser clasificadas como horas de desconfort, aun cuando desde el punto de vista físico y térmico se encuentren prácticamente dentro del rango de confort.

Tabla 25. Rangos de confort para ASHRAE 55 y EN15251

| Ciudad       | Rango de confort ASHRAE 55[ $^\circ\text{C}$ ] | Rango de confort EN 15251 [ $^\circ\text{C}$ ] |
|--------------|--|--|
| Bogotá       | $18,5 \leq Top \leq 26,0$                      | $19,1 \leq Top \leq 26,9$                      |
| Medellín     | $20,1 \leq Top \leq 27,7$                      | $20,3 \leq Top \leq 28,9$                      |
| Cali         | $21,2 \leq Top \leq 28,8$                      | $21,2 \leq Top \leq 29,7$                      |
| Neiva        | $22,2 \leq Top \leq 30,1$                      | $21,9 \leq Top \leq 30,9$                      |
| Barranquilla | $22,6 \leq Top \leq 30,3$                      | $22,5 \leq Top \leq 31,2$                      |

En la Tabla 26 se definió la configuración de los set-point del sistema de climatización empleado en las simulaciones energéticas de las viviendas. Debido a que el sistema requería un valor único de referencia por escenario, se realizaron simulaciones independientes para cada una de las normas consideradas (ASHARA 55 80% de aceptabilidad y EN15251 categoría II, ajustando los set-point de acuerdo con los criterios de confort definidos por cada una de ellas.

En el caso de la calefacción, se tomó como referencia el límite inferior de la banda de confort, mientras que para la refrigeración se empleó el óptimo. Esta metodología permitió establecer condiciones representativas y comparables, garantizando la coherencia en la evaluación del comportamiento energético de las edificaciones frente a los diferentes escenarios normativos.

Tabla 26. Valores de temperatura de set-point para calefacción y refrigeración utilizados en las simulaciones energéticas según la norma y ciudad.

| Ciudad       | Consignas Refrigeración [ASHRAE 55] | Consignas Calefacción [ASHRAE 55] | Consignas Refrigeración [EN 15251] | Consignas Calefacción [EN 15251] |
|--------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Bogotá       | 22,3 [°C]                           | 18,6 [°C]                         | 23,0 [°C]                          | 19,2 [°C]                        |
| Medellín     | 23,9 [°C]                           | 20,2 [°C]                         | 24,6 [°C]                          | 20,4 [°C]                        |
| Cali         | 25,0 [°C]                           | 21,3 [°C]                         | 25,5 [°C]                          | 21,3 [°C]                        |
| Neiva        | 26,2 [°C]                           | 22,4 [°C]                         | 26,4 [°C]                          | 22,0 [°C]                        |
| Barranquilla | 26,5 [°C]                           | 22,7 [°C]                         | 26,9 [°C]                          | 22,6 [°C]                        |

## 8. PROCESAMIENTO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1. Influencia normativa en el porcentaje anual de horas de discomfort

Se obtuvieron los datos para cada ciudad y se realizaron los cálculos térmicos conforme a los modelos de confort adaptativo seleccionados. Posteriormente, se evaluó el grado de cumplimiento de cada modelo en las edificaciones multifamiliares analizadas bajo condiciones de ventilación natural (sin sistemas de climatización), considerando las horas de discomfort.

Se asumió que las viviendas no se encuentran ocupadas entre las 8:00 a.m. y las 3:00 p.m.; en consecuencia, dicho intervalo no se contabilizó como horas de discomfort. Las horas anuales de discomfort se determinaron mediante un postproceso de la temperatura operativa horaria durante un año de simulación de los edificios representativos.

Con el fin de mejorar la representatividad estadística, se modelaron 28 apartamentos en Bogotá, 36 en Medellín, 16 en Cali / Neiva y 20 en barranquilla. Los valores de temperatura operativa se contrastaron con el rango de confort adaptativo en la tabla 27. Aquellas horas en que la temperatura operativa se encontró por fuera de dicho rango, y dentro del horario evaluado, se contabilizaron como horas de discomfort térmico.

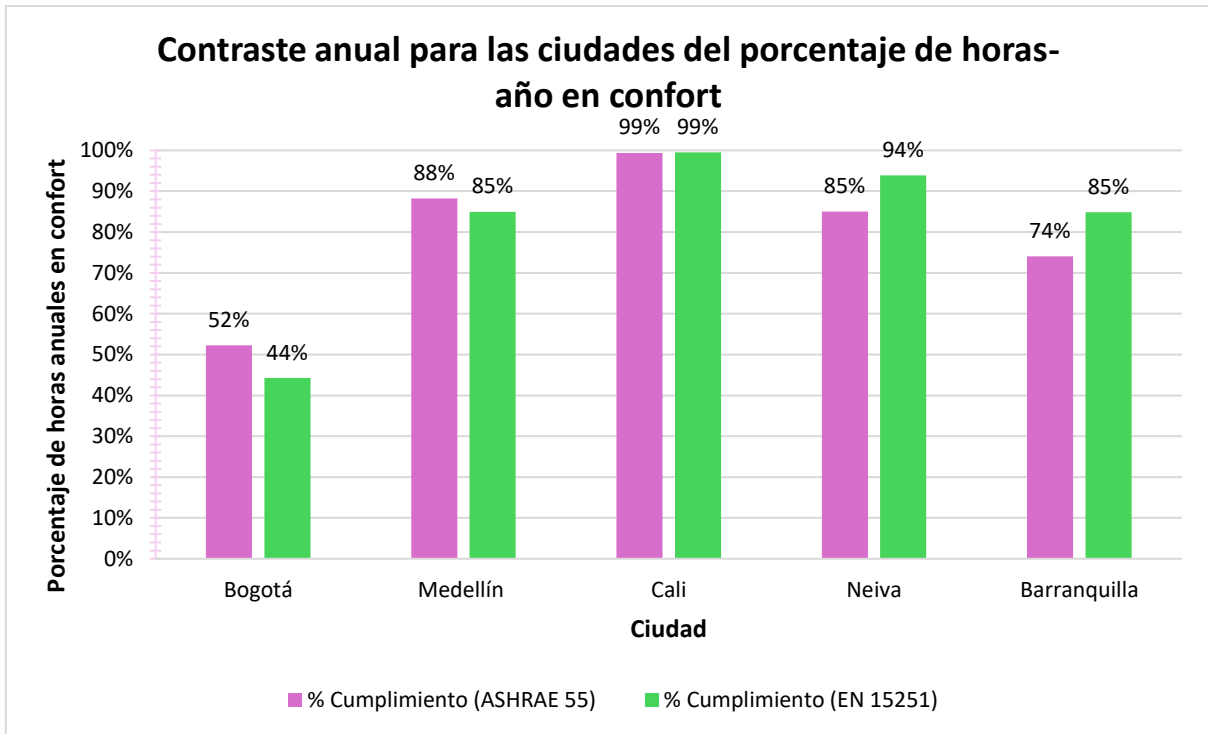
Finalmente, los resultados de la Tabla 27 incluyen el consumo eléctrico, las emisiones de CO2 y las horas de disconfort obtenidas de acuerdo con la norma ASHRAE 55 y la norma EN 15251 con ventilación natural. En la Ilustración 43 se encuentra la comparación del cumplimiento de las dos normas según las horas de confort en el año.

Tabla 27. Indicadores de consumo energético, emisiones de CO2 y desempeño de confort térmico en ventilación natural según ASHRAE 55 (80% de aceptabilidad) y EN 15251 (Categoría II)

| Ciudad       | Consumo eléctrico y total [kWh/m2/año] | kgCO <sub>2</sub> eq/m2/año | Horas de disconfort (ASHRAE 55) | Horas de disconfort (EN 15251) | % Cumplimiento (ASHRAE 55) | % Cumplimiento (EN 15251) |
|--------------|--|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Bogotá       | 43,58                                  | 4,88                        | 4178                            | 4882                           | 52%                        | 44%                       |
| Medellín     | 33,00                                  | 3,70                        | 1029                            | 1317                           | 88%                        | 85%                       |
| Cali         | 32,52                                  | 3,64                        | 56                              | 44                             | 99%                        | 99%                       |
| Neiva        | 32,52                                  | 3,64                        | 1311                            | 536                            | 85%                        | 94%                       |
| Barranquilla | 41,96                                  | 4,70                        | 2271                            | 1324                           | 74%                        | 85%                       |

En el cálculo del consumo eléctrico se consideraron los equipos de uso doméstico, incluyendo computador personal, equipos de sonido y dispositivos similares, televisor, licuadora, refrigerador, plancha para ropa y cabello, lavadora e iluminación.

Ilustración 43. Comparación del porcentaje anual de horas en confort térmico en ventilación natural según ASHRAE 55 (80% de aceptabilidad) y EN 15251 (Categoría II).



La Tabla 27 presenta el porcentaje anual de horas en confort térmico con ventilación natural obtenido para las ciudades de Bogotá, Medellín, Cali, Neiva y Barranquilla, evaluado con la norma ASHRAE 55 y la norma EN 15251.

Los resultados muestran que el porcentaje anual de horas en confort térmico varía significativamente según la norma aplicada. Mientras que la norma ASHRAE 55 presenta porcentajes mayores de cumplimiento en las ciudades de Bogotá y Medellín, la norma EN 15251 tiene mayores porcentajes en las ciudades de Neiva y Barranquilla, ambas normas en la ciudad de Cali tienen el mismo porcentaje.

Estudios previos han evidenciado que las diferencias entre la norma ASHRAE 55 y la EN15251 no solo responden a la amplitud de las bandas de confort, sino también a los

criterios empleados para definir las horas evaluables dentro de los límites de aplicabilidad<sup>25</sup>. Aunque este trabajo no analiza las horas evaluables, los resultados obtenidos confirman que la sección de la normativa influye significativamente en los porcentajes de confort.

Teniendo en cuenta los resultados que se obtuvieron en la sección de caracterización climática, donde se estimó el potencial de la ventilación natural (Figuras 13, 14, 15, 16 y 17), se observa un incremento notable en el cumplimiento de la norma en todas las ciudades cuando se incorpora la simulación a escala edificatoria.

Estas diferencias ponen a evidencia la importancia de considerar factores propios del edificio y las personas, tales como la ventilación de las ventanas y la interacción edificio ocupante. En este sentido, el análisis climático resulta útil para identificar tendencias generales, mientras que la evaluación con el edificio se vuelve una herramienta para la toma de decisiones de diseño y la verificación del cumplimiento normativo para las viviendas VIS.

## **8.2. Cálculo de energía virtual para confort**

La energía virtual se define como la cantidad de energía necesaria para suplir deficiencias en el confort de los ocupantes de un edificio. Es decir, es la energía que se requeriría en situaciones donde el diseño original del edificio no proporciona las condiciones ambientales óptimas y en algún momento se deba incorporar sistemas mecánicos al edificio para asegurar el confort térmico. [13]

Esta aproximación permite cuantificar, de manera indirecta, el impacto energético del disconfort térmico, constituyéndose en una herramienta útil para evaluar.

---

<sup>25</sup> Sánchez-García D., Rubio-Bellido C., Pulido-Arcas J. A., Guevara-García F. J., Canivell J. *Adaptive Comfort Models Applied to Existing Dwellings in Mediterranean Climate Considering Global Warming, Sustainability*, vol. 10, núm. 10, p. 3507, 2018. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su10103507>

Para el cálculo de la energía virtual se adoptó un sistema de climatización estándar que corresponde al recomendado en el Apéndice G de la norma ASHRAE 90.1<sup>26</sup>. El sistema seleccionado corresponde a un PTHP (Packaged Terminal Heat Pump- Bombas de Calor terminal Compacta), el cual integra en una sola unidad los principales componentes del sistema HVAC, incluyendo ventilador, serpentines, compresor, válvulas de expansión y baterías de refrigeración y calefacción.

Este tipo de sistema funciona bajo un ciclo reversible bomba de calor, lo que permite suministrar tanto calefacción como refrigeración según las condiciones térmicas del espacio y las necesidades de los ocupantes.

El desempeño del sistema se definió como COP de 3.0 para refrigeración, con el objetivo de representar un escenario realista de operación, al tiempo que permite evaluar el potencial de mejora energética mediante la sustitución futura por equipos de mayor eficiencia. En el caso de calefacción, se definió una eficiencia igual a 1.0, asumiendo el desempeño estándar equivalente a una resistencia eléctrica, lo cual representa la condición más básica y conservadora de conversión de energía eléctrica a calor.

Con el fin de incorporar el efecto de la ventilación natural en la reducción de demanda energética, se habilitó el modo mixto, el cual permite alternar entre ventilación natural y climatización mecánica. Esta estrategia aprovecha los periodos en los que las condiciones exteriores son favorables.

A partir de las simulaciones realizadas se extrajeron las variables Cooling Coil Total

---

<sup>26</sup> ASHRAE. *ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2019: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings* [norma técnica]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2019.

Cooling Rate, Heating Coil Heating Rate, Fan Electric Power, Electric Equipment y Electric Equipment Generallights. Estas variables fueron empleadas para cuantificar la energía virtual.

Finalmente, los resultados consolidados en la Tabla 28 y 29 corresponden al promedio ponderado por el número de pisos del edificio de las simulaciones realizadas para unidades ubicadas en diferentes niveles del edificio (primer piso, un piso intermedio y el último piso), así como en distintas posiciones dentro de la planta como se muestra en la Ilustración 44. En este análisis no se incluyeron las zonas comunes.

Ilustración 44. Selección de zonas térmicas representativas del edificio para la simulación energética



La Ilustración 45 muestra un ejemplo del procedimiento utilizado para calcular el promedio de los resultados. Se evidencia la importancia de analizar apartamentos ubicados en distintos niveles del edificio, ya que los resultados pueden variar significativamente en función de su ubicación. Por ejemplo, en los apartamentos situados en la planta baja presenta una demanda anual de refrigeración prácticamente nula, mientras que los apartamentos ubicados en la planta superior alcanzan valores de 200 a 500 kWh/año. Debido a que la simulación de todo el edificio no es posible por su tamaño, se realizó el promedio ponderado para representar adecuadamente el comportamiento energético del conjunto.

Ilustración 45. Consumo de energía para Bogotá en el caso de refrigeración y calefacción con la Norma EN15251.

| Consumo                       |         |         |         |              |           |                |              |
|-------------------------------|---------|---------|---------|--------------|-----------|----------------|--------------|
| Tipo                          | Piso 1  | Piso 8  | Piso 18 | Num de pisos | Area Apto | Area total tip | kWh/m2-año   |
| 1,00                          | 1712,08 | 1712,84 | 1738,61 | 18,0         | 39,1      | 703,6          | 43,9         |
| 2,00                          | 1717,21 | 1716,95 | 1741,57 | 18,0         | 39,3      | 706,9          | 43,8         |
| 3,00                          | 1712,38 | 1713,36 | 1737,44 | 18,0         | 39,1      | 704,2          | 43,8         |
| 4,00                          | 1718,20 | 1717,78 | 1741,78 | 18,0         | 39,3      | 707,4          | 43,7         |
| 5,00                          | 1713,02 | 1713,87 | 1739,13 | 18,0         | 39,1      | 703,4          | 43,9         |
| 6,00                          | 1711,39 | 1711,92 | 1739,61 | 18,0         | 39,1      | 703,6          | 43,8         |
| 7,00                          | 0,00    | 1716,64 | 1742,80 | 17,0         | 39,3      | 667,6          | 43,8         |
| 8,00                          | 0,00    | 1706,00 | 1730,19 | 17,0         | 38,7      | 658,4          | 44,1         |
| 9,00                          | 1710,40 | 1710,80 | 1735,98 | 18,0         | 39,0      | 702,0          | 43,9         |
| 10,00                         | 1712,66 | 1713,39 | 1741,09 | 18,0         | 39,1      | 703,4          | 43,9         |
| <b>Promedio consumo total</b> |         |         |         |              |           |                | <b>43,85</b> |

| Calentamiento total (kwh/año) |         |         |         |              |             |                |              |
|-------------------------------|---------|---------|---------|--------------|-------------|----------------|--------------|
| Tipo                          | Piso 1  | Piso 6  | Piso 12 | Numero de ap | Area de uno | Area total tip | kWh/m2-año   |
| 1,00                          | 867,56  | 951,03  | 3230,44 | 18,0         | 39,1        | 703,6          | 27,5         |
| 2,00                          | 565,06  | 535,66  | 2666,76 | 18,0         | 39,3        | 706,9          | 16,7         |
| 3,00                          | 941,37  | 859,15  | 2991,28 | 18,0         | 39,1        | 704,2          | 25,1         |
| 4,00                          | 537,22  | 491,31  | 2582,55 | 18,0         | 39,3        | 707,4          | 15,5         |
| 5,00                          | 959,27  | 1049,94 | 3454,87 | 18,0         | 39,1        | 703,4          | 30,2         |
| 6,00                          | 785,47  | 852,37  | 3130,26 | 18,0         | 39,1        | 703,6          | 24,9         |
| 7,00                          | 0,00    | 472,94  | 2558,51 | 17,0         | 39,3        | 667,6          | 15,2         |
| 8,00                          | 0,00    | 1897,76 | 3995,73 | 17,0         | 38,7        | 658,4          | 52,2         |
| 9,00                          | 1097,79 | 1146,77 | 3300,33 | 18,0         | 39,0        | 702,0          | 32,4         |
| 10,00                         | 904,16  | 1002,08 | 3280,34 | 18,0         | 39,1        | 703,4          | 28,7         |
| <b>Promedio demanda</b>       |         |         |         |              |             |                | <b>26,84</b> |

| Refrigeración total (kwh/año) |        |        |         |              |             |                |             |
|-------------------------------|--------|--------|---------|--------------|-------------|----------------|-------------|
| Tipo                          | Piso 1 | Piso 6 | Piso 12 | Numero de ap | Area de uno | Area total tip | kWh/m2-año  |
| 1,00                          | 0,13   | 0,00   | 226,96  | 18,0         | 39,1        | 703,6          | 0,3         |
| 2,00                          | 0,00   | 0,00   | 264,68  | 18,0         | 39,3        | 706,9          | 0,4         |
| 3,00                          | 0,00   | 0,00   | 210,43  | 18,0         | 39,1        | 704,2          | 0,3         |
| 4,00                          | 0,00   | 0,00   | 246,32  | 18,0         | 39,3        | 707,4          | 0,3         |
| 5,00                          | 0,13   | 0,00   | 222,83  | 18,0         | 39,1        | 703,4          | 0,3         |
| 6,00                          | 34,26  | 25,43  | 457,02  | 18,0         | 39,1        | 703,6          | 1,3         |
| 7,00                          | 0,00   | 53,95  | 525,26  | 17,0         | 39,3        | 667,6          | 2,1         |
| 8,00                          | 0,00   | 0,27   | 250,88  | 17,0         | 38,7        | 658,4          | 0,4         |
| 9,00                          | 4,79   | 0,86   | 312,51  | 18,0         | 39,0        | 702,0          | 0,5         |
| 10,00                         | 41,67  | 24,89  | 444,71  | 18,0         | 39,1        | 703,4          | 1,3         |
| <b>Promedio demanda</b>       |        |        |         |              |             |                | <b>0,71</b> |

En la Tabla 28 y 29 se presentan los resultados de demanda y consumo de refrigeración y calefacción obtenidos bajo diferentes casos de estudio. La demanda corresponde a los valores calculados directamente por el software de simulación. Con el

fin de facilitar la comparación con referencias normativas, se estimó el consumo energético a partir de la demanda, considerando la operación de los sistemas de climatización.

El caso “solo calefacción” corresponde a simulaciones en las que el sistema de climatización se configuró exclusivamente para aportar calefacción, desactivando la función de refrigeración. De manera análoga, el caso “solo refrigeración” considera únicamente el funcionamiento del sistema de enfriamiento, sin aporte de calefacción. En el caso de “refrigeración y calefacción” ambos sistemas se encuentran habilitados.

Todos estos casos fueron simulados bajo un modelo Mixto, en el cual se considera la operación combinada de ventilación natural mediante la apertura y cierre de ventanas, junto con el uso de sistemas de climatización mecánica cuando las condiciones interiores se salen de la banda de confort. Asimismo, en esos escenarios se asumió un entorno sin edificaciones a los lados.

Finalmente, el caso “adosado” incorpora la presencia de dos bloques edificadas a ambos lados de la vivienda con se muestra en la Ilustración 46.

Ilustración 46. Ejemplo de Edificio Adosado

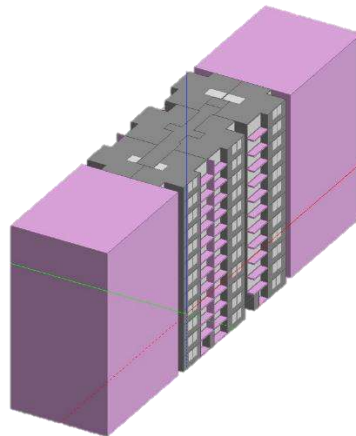


Tabla 28. Resultados de demanda y consumo de refrigeración y calefacción con la norma EN 15251

| CIUDAD       | CASO DE SIMULACIÓN [EN 15251] | Demanda de refrigeración kWh/m2/año | Demanda de Calefacción kWh/m2/año | Consumo de refrigeración kWh/m2/año | Consumo de calefacción kWh/m2/año | Consumo eléctrico kWh/m2/año | Consumo total kWh/m2/año | kgCO <sub>2</sub> eq/m2/año | Hora de disconfort según estándar adaptativo |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--|
| Bogotá       | Solo calefacción              | 0,00                                | 27,05                             | 0,00                                | 27,05                             | 43,76                        | 70,81                    | 7,93                        | 91   |
| Bogotá       | Refrigeración y calefacción   | 0,71                                | 26,84                             | 0,24                                | 26,84                             | 43,85                        | 70,93                    | 7,94                        | 15   |
| Bogotá       | Adosado                       | 0,52                                | 29,22                             | 0,17                                | 29,22                             | 43,87                        | 73,26                    | 8,21                        | 22   |
| Medellín     | Solo refrigeración            | 5,10                                | 0,00                              | 1,70                                | 0,00                              | 33,04                        | 34,74                    | 3,89                        | 2147   |
| Medellín     | Refrigeración y calefacción   | 5,95                                | 4,88                              | 1,98                                | 4,88                              | 33,09                        | 39,95                    | 4,47                        | 24   |
| Medellín     | Adosado                       | 5,06                                | 5,07                              | 1,69                                | 5,07                              | 33,08                        | 39,84                    | 4,46                        | 38   |
| Cali         | Solo refrigeración            | 45,95                               | 0                                 | 15,32                               | 0,00                              | 32,93                        | 48,25                    | 5,40                        | 41   |
| Cali         | Refrigeración y calefacción   | 46,10                               | 0,14                              | 15,37                               | 0,14                              | 32,94                        | 48,45                    | 5,43                        | 0  |
| Cali         | Adosado                       | 24,40                               | 6,08                              | 8,13                                | 6,08                              | 32,77                        | 46,98                    | 5,26                        | 0  |
| Neiva        | Solo refrigeración            | 118,76                              | 0,00                              | 39,59                               | 0,00                              | 33,57                        | 73,16                    | 8,19                        | 0  |
| Neiva        | Adosado                       | 86,27                               | 0,33                              | 28,76                               | 0,33                              | 33,20                        | 62,29                    | 6,98                        | 0  |
| Barranquilla | Solo refrigeración            | 148,00                              | 0,00                              | 49,33                               | 0,00                              | 43,56                        | 92,89                    | 10,40                       | 0  |
| Barranquilla | Adosado                       | 145,00                              | 0,00                              | 48,33                               | 0,00                              | 43,45                        | 91,78                    | 10,28                       | 0  |

Los resultados de la Tabla 28 de la norma EN 15251 se evidencia una variabilidad en la demanda y el consumo energético en función tanto de la ciudad como del caso de estudio analizado.

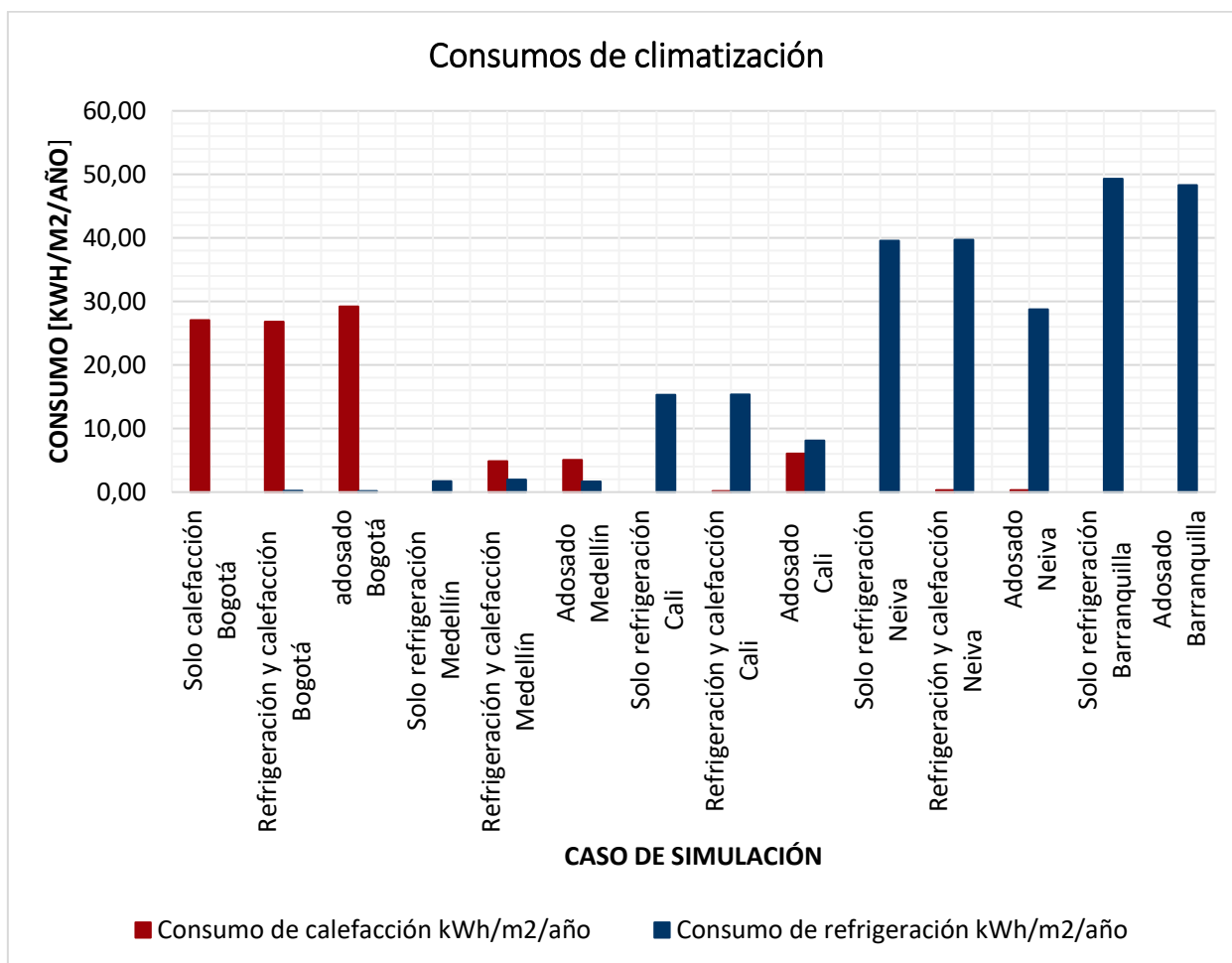
En el caso de Medellín se evidencia que la demanda de refrigeración y calefacción tienen casi el mismo valor, pero si revisamos las horas de disconfort cuando hay calefacción cambia notablemente.

En las ciudades de Bogotá y Medellín, la presencia de edificaciones cercanas en el

caso “adosado” genera un aumento en las horas de desconfort térmico. Este comportamiento se asocia a la reducción de la radiación solar incidente sobre las fachadas, lo que hace que las temperaturas interiores sean más bajas, en climas fríos y templados.

No obstante, únicamente en la ciudad de Bogotá este efecto se traduce en un aumento de la demanda y del consumo energético. En Medellín, aunque se observa un aumento en las horas de desconfort, las variaciones de la demanda y el consumo no resultan significativas. En las demás ciudades analizadas, la presencia de edificios al lado no tiene incidencia en las horas de confort térmico; sin embargo, sí se evidencia una disminución de la demanda y del consumo energético.

Ilustración 47. Comparación de consumos de calefacción y refrigeración en las ciudades analizadas con la norma EN15251



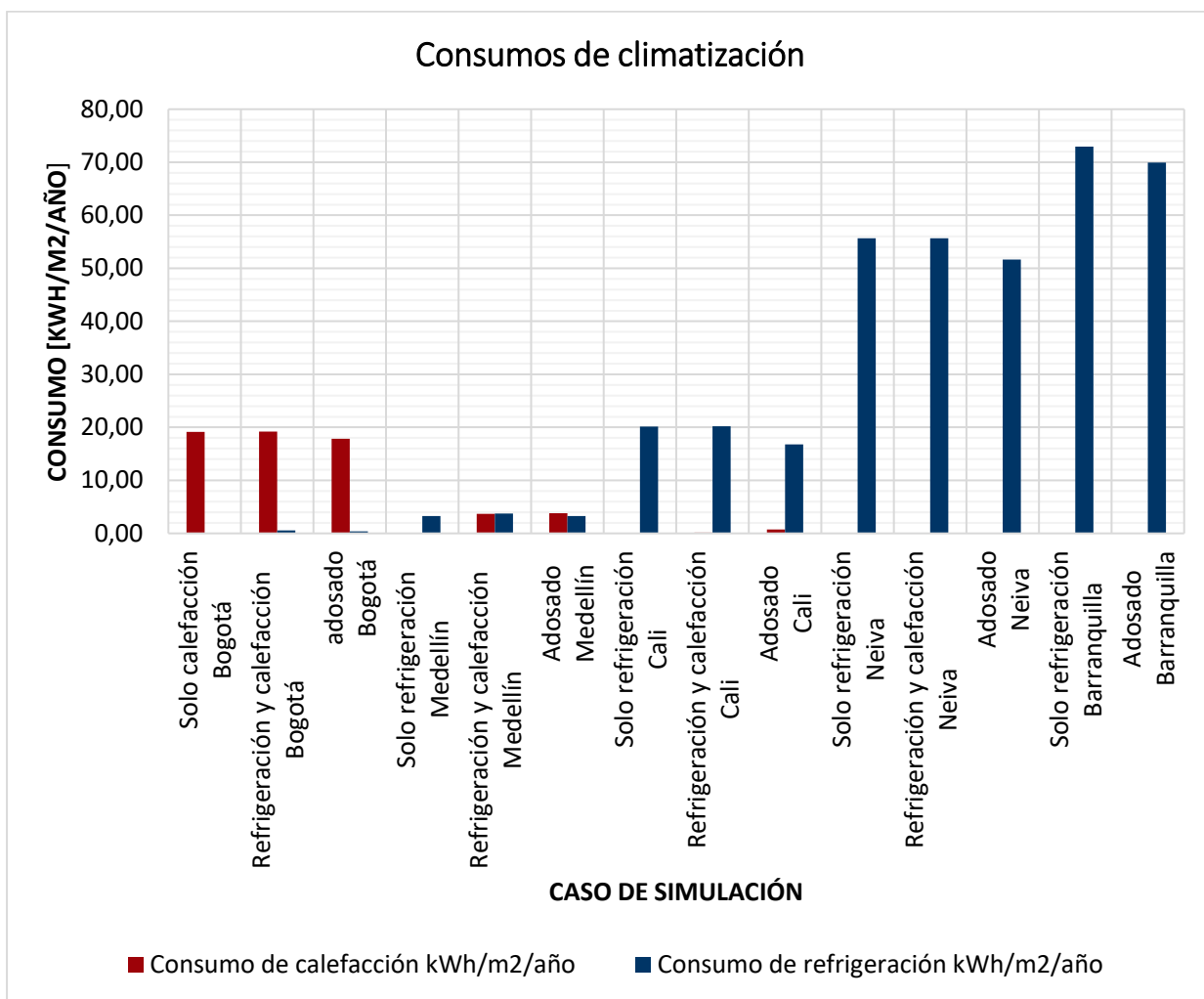
La ilustración 47 refuerza cómo la ubicación geográfica y el tipo de clima definen el tipo de carga. En las ciudades frías, como Bogotá el consumo se concentra en la calefacción, siendo prácticamente nula la necesidad de refrigeración. En climas templados, como Medellín también se presenta el mayor consumo en calefacción. Finalmente, en las ciudades cálidas, como Cali, Neiva y Barranquilla, predomina la refrigeración, aunque con diferencias notorias: mientras Cali refleja un consumo moderado, Neiva y Barranquilla registran los valores más altos, evidenciando el mayor consumo para garantizar el confort térmico.

Tabla 29. Resultados de demanda y consumo de refrigeración y calefacción con la norma ASHRAE 55.

| CIUDAD       | CASO DE SIMULACIÓN          | Demanda de refrigeración<br>kWh/m <sup>2</sup> /año | Demanda de Calefacción<br>kWh/m <sup>2</sup> /año | Consumo de refrigeración<br>kWh/m <sup>2</sup> /año | Consumo de calefacción<br>kWh/m <sup>2</sup> /año | Consumo eléctrico<br>kWh/m <sup>2</sup> /año | Consumo total<br>kWh/m <sup>2</sup> /año | kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> /año | Hora de discomfort según<br>estándar adaptativo<br>(Horas/año) |
|--------------|-----------------------------|---|---|---|---|--|--|--|--|
| Bogotá       | Solo calefacción            | 0,00  | 19,17   | 0,00  | 19,17   | 43,71  | 62,88                                    | 7,04                                     | 147  |
| Bogotá       | Refrigeración y calefacción | 1,67  | 19,18   | 0,56  | 19,18   | 43,79  | 63,53                                    | 7,11                                     | 7  |
| Bogotá       | adosado                     | 1,22  | 17,87   | 0,41  | 17,87   | 43,77  | 62,05                                    | 6,95                                     | 6  |
| Medellín     | Solo refrigeración          | 9,79  | 0,00  | 3,26  | 0,00  | 33,09  | 36,35                                    | 4,07                                     | 1887   |
| Medellín     | Refrigeración y calefacción | 11,29   | 3,67  | 3,76  | 3,67  | 33,13  | 40,56                                    | 4,54                                     | 11   |
| Medellín     | Adosado                     | 9,82  | 3,78  | 3,27  | 3,78  | 33,12  | 40,17                                    | 4,50                                     | 18   |
| Cali         | Solo refrigeración          | 60,4  | 0   | 20,13   | 0,00  | 33,07  | 53,20                                    | 5,96                                     | 45   |
| Cali         | Refrigeración y calefacción | 60,57   | 0,15  | 20,19   | 0,15  | 33,07  | 53,41                                    | 5,98                                     | 0  |
| Cali         | Adosado                     | 50,31   | 0,71  | 16,77   | 0,71  | 32,98  | 50,46                                    | 5,65                                     | 0  |
| Neiva        | Solo refrigeración          | 166,99  | 0,00  | 55,66   | 0,00  | 34,08  | 89,74                                    | 10,05                                    | 0  |
| Neiva        | Adosado                     | 155,00  | 0,00  | 51,67   | 0,00  | 33,94  | 85,61                                    | 9,59                                     | 0  |
| Barranquilla | Solo refrigeración          | 218,90  | 0,00  | 72,97   | 0,00  | 44,33  | 117,30                                   | 13,14                                    | 0  |
| Barranquilla | Adosado                     | 209,81  | 0,00  | 69,94   | 0,00  | 44,17  | 114,11                                   | 12,78                                    | 0  |

En la Tabla 29, correspondiente a los resultados bajo la norma ASHRAE 55, se observa un comportamiento muy similar al presentado en la Tabla 28, evaluada con la norma EN15251. No obstante, en las ciudades de Barranquilla y Neiva al aplicar la norma de ASHRAE 55 se evidencia un aumento significativo en la demanda energética, con diferencias que oscilan entre 70 y 48 kWh/m<sup>2</sup>-año. Las diferencias observadas se explican principalmente por el límite superior de temperatura operativa aceptable.

Ilustración 48. Comparación de los consumos de calefacción y refrigeración en las ciudades analizadas según la norma ASHRAE 55.



La Ilustración 48 presenta la comparación de los consumos de calefacción y refrigeración para los distintos casos de simulación en las ciudades analizadas, evaluados bajo los criterios de confort térmico establecidos por la norma ASHRAE 55.

En la tabla 30 se comparan los resultados de consumo energético total obtenidos en este estudio con los valores de referencia establecidos en la Resolución 0194 de 2025<sup>27</sup>. Esta comparación permite identificar similitudes y diferencias entre los resultados derivados

<sup>27</sup> Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio República de Colombia, 2025, p. 9

de las normas EN 15251 y ASHRAE 55 frente a la línea base normativa definida en Colombia.

Tabla 30. Comparación de resultados de consumo total y línea base resolución 0194

| Ciudad       | Clima         | Consumo total kWh/m2/año [EN 15251] | Consumo total kWh/m2/año [ASHRAE 55] | Consumo total kWh/m2/año Línea base Res 0194 |
|--------------|---------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Bogotá       | Frio          | 70,9                                | 63,5                                 | 93,7   |
| Medellín     | Templado      | 40,0                                | 40,6                                 | 77,7   |
| Cali         | Cálido seco   | 48,4                                | 53,4                                 | 86,7   |
| Neiva        | Cálido seco   | 73,6                                | 89,7                                 | 86,7   |
| Barranquilla | Cálido húmedo | 92,9                                | 117,3                                | 111,2  |

Fuente: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio República de Colombia. (2025). Por medio de la cual se definen los parámetros y lineamientos de construcción sostenible, se adopta la guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones, se sustituye la Resolución 0549 del 2015 y se dictan otras disposiciones (Resolución número 0194). <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/0194-2025.pdf>

De acuerdo con la línea base de la Resolución de 0194 para la vivienda VIS multifamiliar varía según la zona climática. Estos valores se utilizan como referencia para evaluar el cumplimiento del desempeño energético del edificio simulado. Al comparar con los valores obtenidos en la simulación, se evidencia que en los climas cálido seco y cálido húmedo (Neiva y Barranquilla) los consumos anuales superan la línea base normativa, lo que indica que el desempeño energético del edificio no cumple con los valores de referencia. Esta diferencia se asocia principalmente al incremento de la demanda de refrigeración, especialmente en los pisos superiores. En contraste, en los climas frío y templado los consumos se mantienen muy por debajo de la línea base.

Para la determinación de la energía virtual, se calculó la diferencia entre el consumo

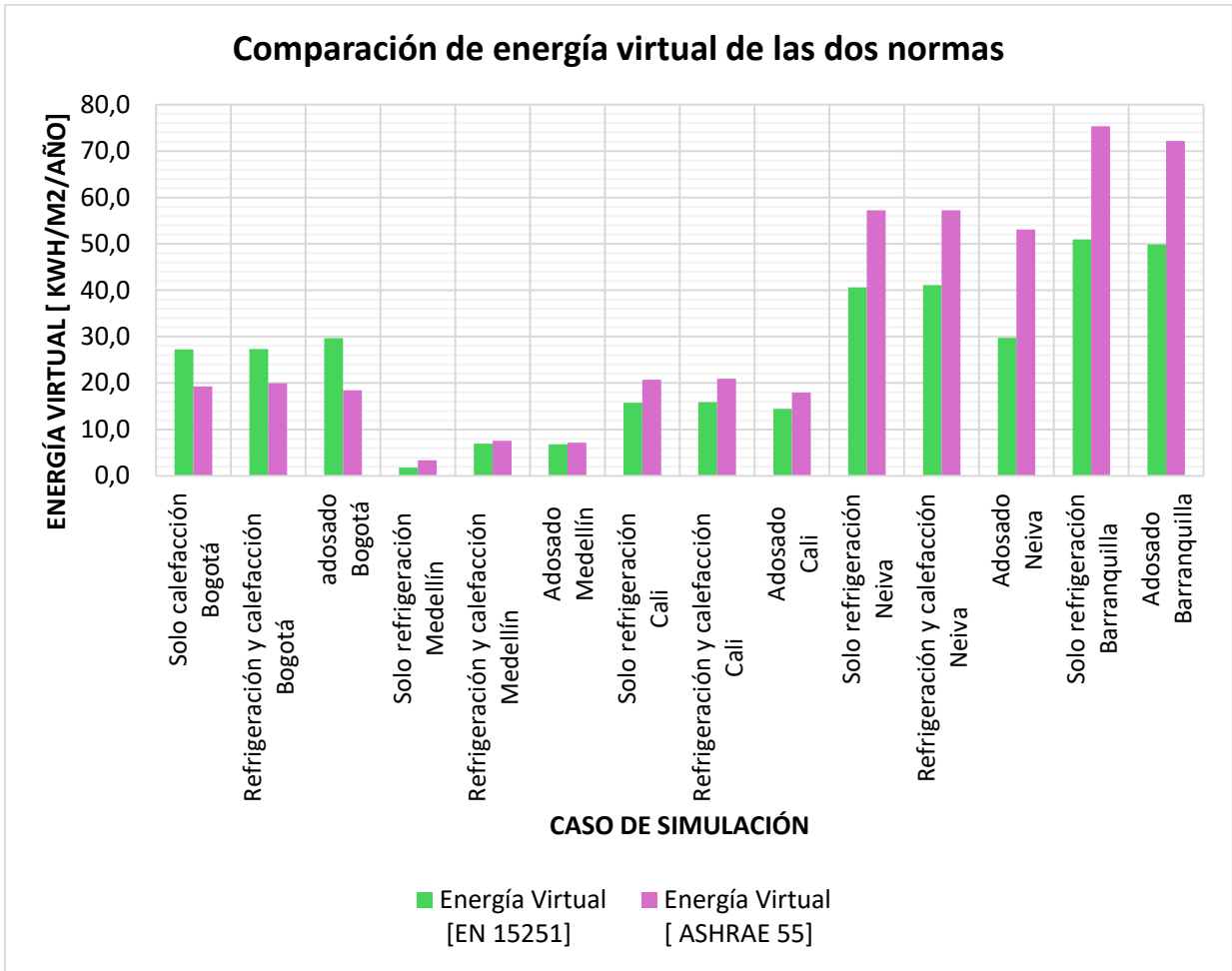
energético del edificio operando con el sistema de climatización estándar y el consumo correspondiente al escenario de ventilación natural.

Los valores de energía virtual obtenidos se consolidaron en la tabla 31. Con el fin de facilitar la comparación entre las normas EN 15251 y ASHRAE 55, la ilustración 49 sintetiza gráficamente estos resultados, permitiendo identificar de manera clara las diferencias en el impacto energético.

Tabla 31. Resultados de energía virtual para las normas ASHRAE 55 y EN15251.

| CIUDAD       | Caso de simulación          | Energía Virtual [EN 15251] | Energía Virtual [ASHRAE 55] | Diferencia de kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> /año de ventilación natural y con climatización [EN 15251] | Diferencia de kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> /año de ventilación natural y con climatización [ASHRAE 55] |
|--------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|---|
| Bogotá       | Solo calefacción            | 27,2                       | 19,3                        | 3,05   | 2,16  |
| Bogotá       | Refrigeración y calefacción | 27,3                       | 19,9                        | 3,06   | 2,23  |
| Bogotá       | adosado                     | 29,7                       | 18,5                        | 3,32   | 2,07  |
| Medellín     | Solo refrigeración          | 1,7                        | 3,4                         | 0,19   | 0,38  |
| Medellín     | Refrigeración y calefacción | 7,0                        | 7,6                         | 0,78   | 0,85  |
| Medellín     | Adosado                     | 6,8                        | 7,2                         | 0,77   | 0,80  |
| Cali         | Solo refrigeración          | 15,7                       | 20,7                        | 1,76   | 2,32  |
| Cali         | Refrigeración y calefacción | 15,9                       | 20,9                        | 1,78   | 2,34  |
| Cali         | Adosado                     | 14,5                       | 17,9                        | 1,62   | 2,01  |
| Neiva        | Solo refrigeración          | 40,6                       | 57,2                        | 4,55   | 6,41  |
| Neiva        | Refrigeración y calefacción | 41,1                       | 57,2                        | 4,60   | 6,41  |
| Neiva        | Adosado                     | 29,8                       | 53,1                        | 3,33   | 5,95  |
| Barranquilla | Solo refrigeración          | 50,9                       | 75,3                        | 5,70   | 8,44  |
| Barranquilla | Adosado                     | 49,8                       | 72,1                        | 5,58   | 8,08  |

Ilustración 49. Comparación del consumo de energía virtual según las normas EN 15251 y ASHRAE 55.



Más allá de evidenciar qué ciudades alcanzan mayores consumos en cada caso, el contraste revela que entre las normas no solo difieren en magnitud, sino también en la forma en que responden a las condiciones climáticas. En particular, la norma ASHRAE 55 tiende a incrementar la energía virtual en clima cálidos y templados, como Cali, Neiva, Barranquilla y Medellín, mientras que la EN 15251 presenta valores relativamente más moderados en estos contextos.

## CONCLUSIONES

1. Los resultados de ventilación natural muestran que el cumplimiento con las normas de confort adaptativo varía según la ciudad y la norma aplicada. En algunos casos, los porcentajes superan el 80%, como ocurre en Medellín, Cali, Neiva bajo la norma ASHRAE 55 y en Medellín, Cali, Neiva y Barranquilla bajo la norma de EN 15251. No obstante, en otras ciudades los niveles de cumplimiento descienden hasta valores cercanos al 44% lo que refleja una disparidad importante en el desempeño de las viviendas VIS frente al confort térmico adaptativo. En ningún caso se alcanza el 100% de cumplimiento, lo que confirma la necesidad de sistemas de climatización para garantizar condiciones óptimas de habitabilidad.
2. La inclusión de la ciudad Neiva permitió corregir las limitaciones de representabilidad del fichero climático de Cali, asociadas principalmente a la ubicación de la estación meteorológica en el aeropuerto, en un entorno con alta presencia de vegetación y alejado del núcleo urbano, de esta manera se garantizó que el análisis del comportamiento térmico en climas cálidos secos.
3. Considerando el margen de error entre los consumos energéticos simulados y los valores reportados por el SUI, se encontró una diferencia menor al 10%. Esto permite concluir que los modelos energéticos empleados en el estudio son representativos de la realidad y ofrecen resultados confiables para el análisis del confort térmico y de la energía virtual en las viviendas VIS multifamiliares.
4. Al comparar los resultados de simulación con los reportados en la Resolución 0194, se identificó que la cercanía de los valores depende tanto de la ciudad como de la norma aplicada. En algunas ciudades, la norma EN 15251 se aproxima más a los datos oficiales, mientras que en otras se aproxima más la norma ASHRAE 55. Esta variación demuestra que ninguna de las dos normas es plenamente representativa en todos los contextos, y que la selección del modelo normativo debe hacerse considerando las particularidades climáticas.

5. Al nivel arquitectónico, en la mayoría de las ciudades en la tipología adosadas se registró una disminución en el consumo energético y en las normas de discomfort respecto a las viviendas aisladas. Este hallazgo confirma que la cercanía con otros edificios influye en algunas ciudades positivamente en el desempeño energético.
6. Los porcentajes de horas en confort térmico obtenidos en este estudio es una estimación basada en modelos adaptativos y no una medición directa de la percepción térmica de los ocupantes. Para saber si los rangos de confort definidos por las normas reflejan la percepción térmica de los usuarios, sería necesario complementar los estudios de simulación con encuestas de sensación térmica.
7. Los resultados permiten concluir que el análisis climático es una etapa inicial útil para identificar el potencial teórico de la ventilación natural, la evaluación del confort térmico a escala edificatoria resulta indispensable para estimar de manera más realista el desempeño térmico de viviendas VIS y verificar el cumplimiento de los criterios normativos de confort.
8. La variabilidad energética observada entre apartamentos según su ubicación demuestra la necesidad del uso de promedios ponderados para obtener indicadores energéticos más representativos del comportamiento del edificio. Para los apartamentos Tipo 1 se observa un incremento del 272.5% en la carga de calentamiento entre el piso 1 y el piso 12 en Bogotá.
9. Los resultados obtenidos permiten concluir que se cumplió el objetivo de evaluar el confort térmico en edificaciones residenciales familiares Vis en Barranquilla, Bogotá, Cali y Medellín mediante la comparación de dos modelos de confort térmico.

10. Se logró caracterizar adecuadamente las condiciones climáticas y arquitectónicas de una edificación multifamiliar VIS representativa por cada ciudad, considerando los planos, materiales, ocupación y uso de equipos.
11. Se obtuvieron modelos energéticos representativos para cada ciudad, capaces de producir el comportamiento térmico para evaluar el cumplimiento de los modelos de confort adaptativo y para cuantificar las horas de desconfort.
12. Se evaluó el grado de cumplimiento de cada una de las normas ASHRAE 55 y EN 15251 y de las edificaciones analizadas, evidenciando los porcentajes de confort.
13. Se determinó la energía virtual necesaria en las viviendas de estudio, demostrando que tanto las demandas energéticas como los consumos dependen del clima local. Considerando los resultados de la simulación de refrigeración y calefacción, el incremento porcentual del consumo con climatización respecto al escenario con ventilación natural fue: para Bogotá 63% con la norma EN 15251 y 46% con ASHRAE 55; para Medellín 21% y 23%; para Cali 49% y 64%; para Neiva 126% y 176%; y para Barranquilla 121% y 180%. Los incrementos superiores al 100% observados en Neiva y Barranquilla indican que el consumo con climatización es mas del doble que en el escenario con ventilación natural.
14. Este trabajo me permitió fortalecer el manejo del software DesigBuilder. El proceso de modelación y simulación evidenció que pequeñas decisiones en el planteamiento del modelo pueden tener impactos relevantes en los resultados.
15. La participación en reuniones con expertos aportó una visión crítica y aplicada del modelamiento. El desarrollo del estudio requirió un alto nivel de paciencia y rigurosidad, especialmente en la resolución de errores y la repetición de simulaciones. Me fortaleció las competencias analíticas.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] UCLA ENERGY DESIGN TOOLS GROUP. *Climate Consultant*. Versión 6.0 [software en línea]. Los Ángeles (Estados Unidos): University of California, Los Angeles, 2016. Disponible en Internet: <https://climate-consultant.informer.com/6.0/> [consultado: 23 de enero de 2026].
- [2] Callejas Ochoa, L. F., Marín Echeverri, M., Puerta Sepúlveda, M. S., Arroyave Molina, V., & Silva Neves, M. (2023). CAMBIO CLIMÁTICO Y CONFORT TÉRMICO EN LA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL COLOMBIANA. *Revista hábitat Sustentable*, 13(1), 68–83. <https://doi.org/10.22320/07190700.2023.13.01.06>
- [3] OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE [Anónimo]. Naciones Unidas [página web]. [Consultado el 20, marzo, 2025]. Disponible en Internet: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.
- [4] POBLACIÓN DE las ciudades capitales 2023 [Anónimo]. Asociación Colombiana de Ciudades Capitales [página web]. [Consultado el 20, marzo, 2025]. Disponible en Internet: <https://www.asocapitales.co/2023/05/poblacion-de-las-ciudades-capitales-2023/>.
- [5] CASTAÑEDA, Walter Giraldo; CZAJKOWSHI, Jorge Daniel y GÓMEZ, Analía Fernanda. Confort térmico en vivienda social multifamiliar de clima cálido en Colombia. *En: Revista de Arquitectura* [en línea]. 2021. p. 115-124. [Consultado el 20, marzo, 2025]. Disponible en Internet: <https://doi.org/10.14718/RevArq.2021.2938>.
- [6] A GAMBLE, Janet L., et al. Analyses of the effects of global change on human health and welfare and human systems: Final report, synthesis and assessment product 4.6 : report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. Washington, D.C: U.S. Climate Change Science Program, 2008. 204 pHEALTH & Wellbeing Framework [Anónimo]. World Green Building Council [página web]. [Consultado el 20, marzo, 2025]. Disponible en Internet: <https://worldgbc.org/healthy-equity-resilience/health-framework/>.
- [7] HEALTH & Wellbeing Framework [Anónimo]. World Green Building Council [página web]. [Consultado el 20, marzo, 2025]. Disponible en Internet: <https://worldgbc.org/healthy-equity-resilience/health-framework/>.
- [8]. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. ANEXO NO. 2: INFORMACIÓN CLIMÁTICA POR MUNICIPIOS [En línea]. Bogotá: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2024. Disponible en: <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/anexo-2-informacion-climatica-por-municipios.pdf> [Consulta: 11 de septiembre de 2025].

- [9]. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO REPÚBLICA DE COLOMBIA. RESOLUCIÓN NÚMERO 0549 [en línea], 2015 [consultado el 14, junio, 2025]. 4 p. Disponible en Internet:  
<<https://camacol.co/sites/default/files/Resolución%20549%20de%202015%20con%20Anexos.pdf>>.
- [10] CLIMATE.ONEBUILDING.ORG [Anónimo]. climate.onebuilding.org [página web]. [Consultado el 24, julio, 2025]. Disponible en Internet:  
<<https://climate.onebuilding.org>>.
- [11] DECRETO 1607 de 2022 - Gestor Normativo [Anónimo]. Inicio - Función Pública [página web]. [Consultado el 20, marzo, 2025]. Disponible en Internet:  
<<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=192813>>.
- [12] DANE - Censo de Edificaciones [Anónimo]. DANE [página web]. [Consultado el 20, marzo, 2025]. Disponible en Internet:  
<<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/censo-de-edificaciones>>.
- [13] ENERGÍA | Portal SUI | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [Anónimo]. | Portal SUI | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [página web]. [Consultado el 25, junio, 2025]. Disponible en Internet:  
<<https://sui.superservicios.gov.co/Reportes-del-Sector/Energia>>.
- [14] CÁRDENAS RANGEL, JORGE LUIS; JARAMILLO IBARRA, JULIÁN E.; OSMA PINTO, GERMAN A. *Lineamientos técnicos para el sistema de etiquetado energético de edificaciones de Colombia: Anexo A* [documento técnico]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander; Minciencias; UPME, abril 2021.
- [15] ANSI/ASHRAE. *Addendum n al ANSI/ASHRAE Standard 62-2001: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality* [norma técnica]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2003.
- [16] CANAL CONUEE. ¿Qué es el confort adaptativo? y su impacto en el consumo de energía de un edificio [video]. YouTube. (3, agosto, 2022). [Consultado el 20, marzo, 2025]. 76:25 min. Disponible en Internet:  
<<https://www.youtube.com/watch?v=GSgXnXiRShU>>.
- [17] GODOY MUÑOZ, Alfonso. El Confort térmico adaptativo. Aplicación en la edificación en España. Página inicial de UPCommons [página web]. (Junio, 2012). [Consultado el 20, marzo, 2025]. Disponible en Internet:  
<[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/18763/TFM\\_Alfonso%20Godoy%20Munoz.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/18763/TFM_Alfonso%20Godoy%20Munoz.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>.
- [18] THERMAL ENVIRONMENTAL Conditions for Human Occupancy [Anónimo]. ASHRAE 55. [s.l.]: [s.n.], 2020.
- [19] CARLUCCI, S., et al. Review of adaptive thermal comfort models in built

environmental regulatory documents. En: Building and Environment [en línea]. Junio, 2018. vol. 137 [consultado el 20, marzo, 2025], p. 73-89. Disponible en Internet: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>>. ISSN 0360-1323.

[20] VIS 4.0: Estrategias para la vivienda de interés social sostenible en Colombia 2024 [Anónimo]. Camacol | Cámara Colombiana de la Construcción [página web]. (Septiembre, 2024). [Consultado el 20, marzo, 2025]. Disponible en Internet: <<https://camacol.co/revista/vis/>>.

[21] VIS Y VIP | Minvivienda [Anónimo]. Home Minvivienda | Minvivienda [página web]. [Consultado el 20, marzo, 2025]. Disponible en Internet: <<https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-vivienda-vis-y-vip>>.

[22] Sánchez-García D., Rubio-Bellido C., Pulido-Arcas J. A., Guevara-García F. J., Canivell J. *Adaptive Comfort Models Applied to Existing Dwellings in Mediterranean Climate Considering Global Warming, Sustainability*, vol. 10, núm. 10, p. 3507, 2018. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su10103507> .

[23] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio República de Colombia. (2025). *Por medio de la cual se definen los parámetros y lineamientos de construcción sostenible, se adopta la guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones, se sustituye la Resolución 0549 del 2015 y se dictan otras disposiciones* (Resolución número 0194). <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/0194-2025.pdf>