

Evaluación del impacto en el efecto térmico y consumo de energía generado por la implementación de techos verdes en una vivienda del municipio de Cimitarra, Santander

Jennifer Stephany Ariza Ruiz

Luis Carlos Andrés Camargo González

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

Carlos Fernando Arenas Jiménez

Magíster en ingeniería Civil

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías e Arquitecturas

Facultad de Ingeniería Civil

2022

Dedicatoria

Dedico este hermoso trabajo a mi abuela, un ser extraordinario cuyo amor incondicional han sido pilar fundamental en mi vida. Gracias a ella, he encontrado fortaleza en los momentos difíciles.

A mis padres, cuyo esfuerzo y trabajo incansable han hecho posible que hoy esté aquí. Su respaldo, sacrificio y constante motivación han sido el motor que me ha impulsado a superar obstáculos y alcanzar mis metas.

A mi querida profesora Bety Laudid Sanjuan, quien ha sido mi guía y orientadora desde mis años en el colegio hasta mi ingreso a la universidad. Su dedicación ha sido fundamental en mi trayectoria académica. Gracias a su visión he logrado alcanzar esta etapa crucial en mi vida. Su influencia ha dejado una huella en mi formación y desarrollo personal.

A mis adorables hermanitos, quienes son mi constante inspiración para convertirme en una mejor persona. Su alegría y amor incondicional me motivan a esforzarme cada día. Este logro también es para ustedes, que iluminan mi camino y son mi mayor tesoro (Jennifer Ariza)

A Dios y a mis padres, que son el motor de mi vida y sin la ayuda de ellos nada de esto sería posible (Luis Camargo)

Agradecimientos

Al M.Sc. Javier Peña, por su apoyo por su apoyo, sabiduría y orientación a lo largo de toda carrera universitaria.

Al Ing. Carlos Arenas que apadrino este proyecto con la mejor disposición del mundo, por ser esa guía en todo este proceso.

Al Ing. Edwin León que desde el primer momento se esforzó por este proyecto.

A todas y cada una de las personas que pusieron su granito de arena en este libro mil y mil gracias.

Contenido

Introducción	12
1. Evaluación del impacto en el efecto térmico y consumo de energía generado por la implementación de techos verdes en una vivienda del municipio de cimitarra- Santander	14
1.1 Planteamiento del problema.....	14
1.1.1 Formulación de la pregunta problema.....	16
1.2 Justificación.....	16
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo general	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	18
2. Estado del arte.....	18
2.1 Contexto Nacional.....	21
3. Marco teórico.....	23
3.1 Techos verdes.....	23
3.1.1 Clasificación primaria.....	23
3.1.2 Clasificación secundaria (Según peso).....	24
3.2 Consideraciones medioambientales	25
3.3 Efecto térmico en una vivienda.....	26
4. Marco legal	28
5. Metodología	30
5.1 Área de estudio: Cimitarra-Santander	32
5.2 Población.....	32
5.3 Elección de planta: Lengua de suegra.....	33

5.3.1 Aclimatación, plantación y establecimiento	34
5.4 Sustrato.....	35
5.5 Técnicas de construcción	36
5.6 Muestra.....	38
5.7 Técnicas de recolección	38
5.8 Análisis de datos	39
6. Resultados	41
6.1 Costo implementación techos verdes	55
6.2 Comparación costo-beneficio con techos comerciales.....	56
6.2.1 Techos verdes comerciales ofrecidos en Colombia.....	56
7. Discusión.....	56
8. Conclusiones	65
Referencias.....	67

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Reducción máxima de temperatura ambiente de cada modelo de techo verde implementado por cada mes.</i>	54
Tabla 2. <i>Costo individual de cada uno de los materiales para implementación techos verdes en Cimitarra.....</i>	55
Tabla 3. <i>Área ocupada por los modelos de techo verde.</i>	58
Tabla 4. <i>Comparación costo-eficiencia</i>	60
Tabla 5. <i>Modelo Óptimo</i>	61

Lista de figuras

Figura 1. <i>Intercambio de calor del cuerpo humano con el ambiente</i>	26
Figura 2. <i>Temperaturas operativas aceptables para edificios pasivos según la norma ASHRAE 55</i>	27
Figura 3. <i>Metodología</i>	31
Figura 4. <i>Ubicación de Cimitarra, Santander</i>	32
Figura 5. <i>Plano</i>	33
Figura 6. <i>Planta lengua de suegra escogida para el proyecto.</i>	34
Figura 7. <i>Extracción y disposición de plantas en las bolsas.</i>	35
Figura 8. <i>Preparación del sustrato</i>	35
Figura 9. <i>Cubierta en donde se implementó el proyecto</i>	37
Figura 10. <i>Disposición del sustrato, tablonces de madera prensada implementados para realzar la contención de cada modelo</i>	37
Figura 11. <i>Visualización del modelo intensivo de 25 cm, modelo semi-intensivo de 15 cm y modelo extensivo de 5 cm finalizado</i>	37
Figura 12. <i>Visualización de los tres modelos de techo verde de 1 m²</i>	38
Figura 13. <i>Termómetro higrómetro usado para tomar las temperaturas y humedades relativas</i>	39
Figura 14. <i>Tabla de valores de sensación térmica por calor.</i>	40
Figura 15. <i>Tabla de los valores de sensación térmica elaborada en Excel</i>	41
Figura 16. <i>Resultados de la temperatura ambiente del 29 de septiembre a 31 de octubre de 2021</i>	42
Figura 17. <i>Resultados de la temperatura de la placa en el mes de septiembre 29 al 31 de octubre de 2021</i>	43

Figura 18. <i>Humedad del 29 de septiembre y 31 de octubre de 2021.....</i>	44
Figura 19. <i>Valores de sensación térmica por calor del 29 de septiembre al 31 de octubre de 2021.....</i>	44
Figura 20. <i>Resultados de la temperatura ambiente del mes de noviembre de 2021.....</i>	45
Figura 21. <i>Resultados de la temperatura de la placa en el mes de noviembre de 2021.....</i>	46
Figura 22. <i>Resultados de la humedad en el mes de noviembre de 2021.....</i>	47
Figura 23. <i>Valores de sensación térmica por calor noviembre de 2021.</i>	47
Figura 24. <i>Resultados de la temperatura ambiente del mes de diciembre de 2021.</i>	48
Figura 25. <i>Resultados de la temperatura de la placa en el mes de diciembre de 2021.....</i>	49
Figura 26. <i>Resultados de la humedad en el mes de Diciembre de 2021.....</i>	49
Figura 27. <i>Valores de sensación térmica por calor de Diciembre de 2021.</i>	50
Figura 28. <i>Resultados de la temperatura ambiente del mes de Enero de 2022.....</i>	51
Figura 29. <i>Resultados de la temperatura de la placa en el mes de Enero de 2022.</i>	52
Figura 30. <i>Resultados de la humedad en el mes de Enero de 2022.....</i>	53
Figura 31. <i>Valores de sensación térmica por calor de Enero de 2022</i>	53

Resumen

La implementación de techos verdes es fundamental para tratar aspectos relacionados con el desarrollo sostenible en las construcciones verdes. Al diseñar una cubierta verde se apunta a reducir la temperatura y mejorar la sensación térmica, a aumentar la absorción de dióxido de carbono (CO₂), y a disminuir la escorrentía pluvial. Estos factores benefician el control de altas temperaturas en lugares donde el calor se vuelve una dificultad para el cumplimiento de actividades cotidianas, con lo cual, se afecta la calidad de vida. La siguiente investigación se enfoca en evaluar el efecto térmico y el consumo de energía en una vivienda de Cimitarra (Santander) mediante la implementación de tres modelos de techos verdes con diferentes alturas de sustrato. Este municipio ha tenido los registros más altos de temperatura en el departamento de Santander. Durante tres meses y a diario, se monitorearon las temperaturas de los modelos en el interior y en el exterior de la vivienda, siempre a las trece horas. Como resultado de este monitoreo, se observó que los modelos ofrecieron condiciones para mitigar los factores observados. En síntesis, la implementación de modelos similares resulta factible desde el punto de vista económico, sostenible, funcional y social, al involucrar a la comunidad en la apropiación de la tecnología de techos verdes.

Palabras clave: calentamiento global, sensación térmica, sostenibilidad, techos verdes

Abstract

The implementation of green roofs is fundamental for treating aspects related to sustainable development in green construction. Designing such a roof aims towards reducing temperature and improving thermal sensation, increasing the absorption of carbon dioxide (CO₂) and decreasing runoff. These factors help control high temperatures in places where heat constitutes a significant difficulty increase in everyday activities, which directly impacts quality of life. This research focuses on evaluating the thermal effect and energy consumption of a household in Cimitarra (Santander) through the implementation of three different models of green roofs with different substrate heights. This particular town has registered the highest temperature readings in the department of Santander. During three months, temperatures of the interior and exterior of the house were monitored daily, always at 13:00. As a result of this monitoring, it was observed that all models showed improvement in the aforementioned factors. In short, the implementation of similar green roof models is feasible from the economical perspective, while also being sustainable, functional and also social, by involving the community in the appropriation of green roof technology.

Keywords: green roofs, thermal sensation, temperature reduction, urban heat island, carbon dioxide absorption.

Glosario

Calentamiento global: incremento de calor en la tierra dado por varios factores, principalmente el humano.

Efecto térmico: capacidad de una vivienda de transmitir calor acumulado en la estructura.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

Huella ecológica: análisis de los patrones de consumo de recursos y producción de desechos en una población determinada, de la mano de la sostenibilidad y sustentabilidad.

Humedad: medida que indica la cantidad de vapor de agua presente en el ambiente, con relación a la atmosfera.

Sensación térmica: reacción del cuerpo humano a un conjunto de condiciones que determina el ambiente que habita desde el punto de vista térmico, como principales variables tiene la temperatura y la humedad relativa del ambiente.

Sostenibilidad: características del desarrollo que aseguran las necesidades del presente sin comprometer las del pasado.

Techos verdes: estructuras que cambian las tecnologías usadas en los techos para mejorar las condiciones de habitabilidad, ahorrar energía, entre otros.

Temperatura: magnitud que mide la cantidad de energía cinética que contiene un cuerpo con respecto al ambiente, puede determinarse como frio o calor.

UHI: Urban Heat Island, isla urbana de calor por sus siglas en inglés, refiere a el calor que rodea o que contienen las estructuras de hormigón y demás materiales absorbentes de calor, estabilizándose por el efecto de un anticiclón térmico.

Introducción

La temperatura de la superficie del planeta aumenta cada vez más. Así lo demuestran los registros históricos ya que, en los últimos 100 años, la media global ha incrementado en 0.76°C y en la última década 1.1°C [1]. Este aumento se ha denominado calentamiento global, y su causa principal es el incremento de los gases de efecto invernadero (GEI) que, a su vez, son producto de diversas actividades antropogénicas [2].

La construcción es uno de los sectores que genera mayor producción de estos gases y que crece rápidamente con la expansión urbana. Durante los próximos años, se construirán más de 230 mil millones de metros cuadrados de nuevas estructuras; con ello, la construcción se convierte en una de las mayores fuentes contaminantes a nivel mundial, pues consume el 36% de la energía global; además, provoca el 39% de las emisiones de CO_2 . Por estas razones, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) informa que la temperatura global de este siglo puede incrementar entre 0.3°C a 4.8°C [3]. Estos impactos tendrán una repercusión negativa en las construcciones y, en efecto, en la calidad de vida humana. Siendo así, resulta indispensable conocer, diseñar y adoptar medidas resilientes.

Así pues, la adopción de este tipo de medidas requiere intervenir en el diseño y la implementación de los procesos de urbanización. Esto representa un desafío, ya que el crecimiento de la población es acelerado y con tendencia a asentamientos en zonas de adaptación limitadas, sin planificación y de bajos o medianos ingresos. Así lo demuestran las estadísticas del (IPCC), ya que entre el 2015 y 2020, la población urbana mundial creció en más de 397 millones de personas, y más del 90% de este crecimiento tuvo lugar en las regiones menos desarrolladas. Lo que expone a la población vulnerable a situaciones de riesgo como las olas de calor y estrés

térmico. Para el manejo de esta situación, se plantea el uso de las soluciones basadas en la naturaleza (Nature-Based Solutions) (NBS), como los techos verdes [4].

Los techos verdes tienen múltiples beneficios: el primero de ellos es que disminuyen el efecto de la isla de calor; por otra parte, regulan el nivel de la escorrentía superficial, porque permiten que el sistema de alcantarillado pluvial sea eficaz; así mismo, los techos verdes reducen el consumo energético en las viviendas; a su vez, permiten recuperar los ecosistemas al manejar vegetación nativa. Finalmente, la adaptación de esta tecnología al entorno urbano resulta sencilla, ya que no representa transformaciones permanentes en el entorno.

Los techos verdes se dividen en tres tipos: intensivo, semi intensivo y extensivo. El intensivo tiene una capa de sustrato mayor de 15 cm, por lo que requiere una estructura con refuerzo, sin embargo, permite variedad en la vegetación incluyendo árboles y arbustos. Los semi intensivos tiene un sustrato de 10 a 15 cm, por lo que se puede implementar como vegetación arbustos y plantas pequeñas, es de mantenimiento y peso moderado. Por último, el techo verde extensivo, el sustrato es hasta 10 cm, con vegetación de suculentas y hierbas por lo que es liviano y de poco mantenimiento.

Teniendo en cuenta estos beneficios, este proyecto plantea la evaluación de un techo verde implantado en una vivienda urbana del municipio de Cimitarra, Santander. Para ello, se elaboró un modelo para cada tipo de techo verde (intensivo, semi intensivo y extensivo).

Este municipio presenta altas temperaturas y graves daños ambientales debido a la deforestación masiva de los bosques. Como consecuencia, presenta un aumento alarmante en la sensación térmica, con lo cual la población queda expuesta a riesgos de estrés y sobrecarga térmicos. Estas condiciones permitieron determinar varios beneficios térmicos y energéticos de

que mostró cada modelo de techos verde implementado en las condiciones climáticas de Cimitarra, Santander.

1. Evaluación del impacto en el efecto térmico y consumo de energía generado por la implementación de techos verdes en una vivienda del municipio de cimitarra- Santander

1.1 Planteamiento del problema

Actualmente, el calentamiento global es un tema que no puede pasar desapercibido. Es la razón por la cual se ha visto un aumento considerable en los desastres naturales, como inundaciones, sequías, huracanes, aludes, terremotos, nevadas históricas y el aumento de las temperaturas que a su vez han hecho que los glaciares pierdan su volumen, aumentando las probabilidades de grandes inundaciones en las zonas costeras [5].

Considerando que este problema aumenta junto con el crecimiento urbano, tal como lo menciona Mateo de Rhodes (2012), “El ser humano ha remplazado y desplazado la cubierta vegetal por una capa de asfalto, ladrillo y cemento”. Y ha provocado la pérdida del bosque, la impermeabilidad del suelo, la emisión de gases de efecto invernadero por la industrialización y actividades como la ganadería; La ONU advierte la necesidad de tomar medidas drásticas desde ya, de lo contrario será mucho más difícil y costoso adaptarse a sus efectos en el futuro [6].

Por esto, se han implementado sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), empresas como la Blue Planet han elaborado tecnologías para capturar el CO_2 y convertirlo en CO_3 , la inversión en energías limpias y se ha integrado el concepto de ciudades sostenibles [7]. Maurice Strong dice que la batalla de la sustentabilidad se ganará o perderá en las ciudades, siendo las más grandes consumidoras de recursos y productoras de desechos [8]. Son el foco de atención

para elaborar un plan que permita la reducción del impacto ambiental; los techos verdes es una opción que encaja perfectamente en el sector urbano.

Se habla de que los techos verdes encajan perfectamente en el sector urbano porque estos no reducen el espacio para actividades humanas [7], por lo contrario, adecúan superficies que se pueden utilizar. Así mismo, múltiples investigaciones confirman que estos techos tienen beneficios psicológicos para las personas [9]. Entre otros beneficios se señalan la reducción de la isla de calor en las ciudades, la reducción de la contaminación, la retención del agua, además de proteger del ruido, ahorrar energía y prolongar la vida útil de la cubierta con la impermeabilidad [10]. Como toda tecnología cuenta con unas desventajas, algunas de ellas son: costos por mantenimiento, peso en la estructura y las propias condiciones climáticas del lugar de implementación [11].

Cimitarra es un municipio joven, en el cual es fácil observar el crecimiento urbano. Por su parte, el director del Riesgo de Santander catalogó a Cimitarra como uno de los municipios en alerta roja por intenso calor, por lo cual, ingreso en las listas de los municipios más graves en este aspecto. Esta es una situación problemática para el municipio y sus habitantes, quienes están expuestos a golpes de calor, estrés y altos cobros en las tarifas del servicio eléctrico debido al uso constante de ventilación artificial. Por estas razones, resulta pertinente la adopción apremiante de tecnologías verdes. En consecuencia, se pretende estudiar la implementación de dichas estructuras en el municipio de Cimitarra.

1.1.1 Formulación de la pregunta problema

Por lo tanto, el centro de la investigación es ¿Cómo implementar de manera óptima la tecnología de los techos verdes en una vivienda del municipio de Cimitarra, de tal manera que se obtenga un impacto térmico y un consumo de energía favorable?

1.2 Justificación

Las ciudades son los mayores centros de consumo de recursos y, por tanto, de producción de desechos; es evidente que en ellas la huella ecológica se presenta con mayor gravedad. En consecuencia, y de acuerdo con el presidente de Global Footprint Network, profesor Mathis Wackernagel el conflicto mundial por la sustentabilidad se está librando y se librará en las ciudades. [12]. Por dicha razón, en la agenda mundial se han incorporado conceptos como huella ecológica, consumo responsable, ciudades sostenibles y con ellos, se espera evidenciar la urgencia de implementar tecnologías que permitan reducir el impacto antropogénico.

Para ello, la huella ecológica, permite medir los excesos antropogénicos frente a la capacidad de regeneración del Planeta. Gracias a su uso como indicador, se conoce que la deforestación, la escasez de agua, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático resultan de dichos excesos. Y se tiene evidencia de que dichas prácticas ponen en riesgo inminente el bienestar y desarrollo de todas las naciones. Lo que ayuda a que, los individuos o comunidades identifiquen y corrijan aquellas acciones que desequilibran la sostenibilidad de la que depende toda vida en el planeta [13].

Una de las limitaciones que la sostenibilidad encuentra es que sus beneficios siempre son medidos dentro del paradigma económico. Es así como la mayoría de las tecnologías sostenibles

se enfrentan a desventajas de costos y de espacio. En ese sentido, los techos verdes son una de las opciones más versátiles y multifuncionales para ofrecer beneficios climáticos a una vivienda. Algunas de sus ventajas son: que no ocupan espacios adicionales al área de la casa; reducen la contaminación, disminuyen la escorrentía, ayudan a la impermeabilidad de la cubierta, reducen el ruido, proporcionan espacios cómodos y, además, disminuyen el efecto de la isla de calor [9]. Sumado a lo anterior, cabe destacar que, según Trujillo (2015) con la reducción de este último efecto, los techos verdes generan un impacto en el ahorro de energía para la vivienda, gracias a la reducción del uso de aparatos de enfriamiento como aires acondicionados o ventilación eléctrica.

Por estos motivos, la presente investigación busca aportar una solución a los impactos climáticos que la población de Cimitarra-Santander padece. Uno de esos impactos son las altas temperaturas que a su vez conllevan a que los habitantes experimenten incomodidades constantes por la humedad, problemas de estrés, y en efecto, costos elevados de las facturas de servicios eléctricos. Por lo tanto, la mejora de la sensación térmica al interior de los hogares adquiere un sentido prioritario. En este punto, la implementación de techos verdes se muestra como una estrategia viable para aportar a la solución de esta problemática. En consecuencia, el principal objetivo de este proyecto es determinar la viabilidad de implementación de techos verdes, para viviendas en el municipio de Cimitarra-Santander con el fin de reducir el efecto térmico.

Sin embargo, toda tecnología presenta obstáculos; en este caso, el mayor de ellos es el peso estructural que el techo verde aporta a la vivienda; y, en segundo lugar, la necesidad de un mantenimiento constante. Debido a las desventajas recién señaladas, se hace necesario determinar cuáles son las condiciones necesarias para lograr un diseño óptimo que permita hacer asequible la implementación de estos techos en viviendas como las de Cimitarra. Por

consiguiente, el diseño del techo deberá contemplar variables tales como el tipo de techo, la altura del sustrato y el tipo de vegetación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el impacto de la implementación de tres modelos de techos verdes para una vivienda en el municipio de Cimitarra-Santander con el fin de reducir el efecto térmico y el consumo de energía, mediante el análisis de la variable de la altura del sustrato.

1.3.2 Objetivos específicos

Caracterizar las condiciones térmicas del municipio de Cimitarra para identificar amenazas por efecto de la ola de calor.

Determinar las características apropiadas para el diseño de techos verdes en el municipio de cimitarra.

Analizar de manera comparativa la relación costo eficiencia (comportamiento térmico vs costo de materiales) de los tres prototipos de techos verdes analizados para su implementación en el municipio de Cimitarra-Santander.

2. Estado del arte

Se ha observado que la salud del planeta ha cambiado, ya que la Tierra actualmente está sufriendo con el cambio climático y calentamiento global. Esta es la principal razón por la cual se ha visto el aumento considerable de desastres naturales, como inundaciones, sequías, huracanes, aludes, terremotos, nevadas históricas y el aumento de las temperaturas que a su vez

han hecho que los glaciares, pierdan su volumen aumentando las probabilidades de grandes inundaciones en las zonas costeras. Dicho problema aumenta significativamente con el crecimiento urbano [14].

Este crecimiento es acelerado, y riesgoso en la medida que la mayor parte de la población mundial vive en las ciudades y se considera que para el año 2050 cerca del 66% de la población viva en ellas. La situación sitúa a las ciudades como las causantes de cerca del 80 % de las emisiones totales de gases de efecto invernadero [15], por lo que se convierten en el epicentro fundamental para luchar contra el cambio climático. Esto implica una organización, planificación, gestión y suministros de energía de manera eficiente en el sector urbano [16]. Ya que, con su crecimiento, se genera el reemplazo y desplazamiento de la cubierta vegetal. Y, la disminución de la vegetación es la clave del aumento del fenómeno conocido como isla de calor urbano (UHI), considerado como un efecto directo del cambio climático y el calentamiento global [17].

La (UHI) es consecuencia de la absorción del calor por parte de las estructuras, que luego lo reflejan hacia la atmosfera. También, tiene influencia, las actividades antropogénicas, la combustión de los vehículos, entre otras. El UHI se considera como un problema de gravedad debido a niveles desastrosos en todo el mundo. Tiene una influencia directa en la disminución de la calidad del aire interior y exterior, en el deterioro del confort térmico, en las afectaciones de la salud de las personas [18] y en el aumento del consumo energético por el uso de aparatos de enfriamiento [17]. Se estima que la energía mundial implementada en los edificios representa entre el 30 % y el 40 % [19].

Los techos verdes son una tecnología de infraestructura verde urbana (UGI). Esta tecnología no solo disminuye el UHI, la absorción solar y el consumo energético, además,

mejora el microclima, mejora la calidad del aire, reduce la contaminación, disminuye las emisiones de GEI, aumenta las superficies permeables en la zona urbana, mejora la gestión de agua pluviales, aumenta la durabilidad de los techos [20], impulsa la sostenibilidad y la biodiversidad [18]. Por medio de las investigaciones, se ha encontrado que un techo verde puede reducir la temperatura hasta en 6°C [21]. Por otro lado, reemplazar el techo de hormigón por un techo verde se reduce entre un 1% y un 5.3 % los impactos ambientales [22].

Los techos verdes devuelven un poco de espacio robado de la naturaleza, brindando así espacios para que la fauna continúe con el ciclo de la vida. Sin embargo, el beneficio más estudiado es la disminución de la temperatura. Se ha llegado a demostrar que los techos verdes a escala de ciudad pueden disminuir la temperatura de 0.3 °C a 3° C [23].

Para su implementación, es necesario investigar de manera correcta la composición y altura del sustrato y las condiciones del sitio. Por ejemplo, en la aplicación de techos verde de la investigación “Green and cool roofs’ urban heat island mitigation potential in tropical climate” determinaron que la vegetación de altura corta es menos efectiva para disipar el calor. Por otro lado, determinaron cuatro variables que influyen en el comportamiento y desempeño de los techos verdes. En primer lugar, las variables climatológicas, en la cual, se considera la intensidad de la radiación solar, la temperatura del ambiente, la humedad ambiental y la velocidad del viento; en segundo lugar, las variables ópticas, en esta se considera el albedo y emisividad del techo verde; en tercer lugar, las variables térmicas y por último las variables hidrológicas [20].

El rendimiento energético de un techo verde debe considerar factores como el tamaño de este, la vegetación plantada, la fase de crecimiento de la planta, la composición del suelo y del tipo de edificación. Con una vegetación densa se reduce la ganancia térmica hasta en un 60 % [24].

Jim y Peng con los techos verdes registraron una disminución de 5.2°C en el día y una reducción de la carga de refrigeración de 0.9kWh/m² en un día soleado y 0.57 kWh/m² en un día nublado [25].

Se resalta, que los techos verdes extensos típicos están equipados con especies de plantas autóctonas y autosostenibles, por lo que requieren poco riego, ya que la vegetación está bien adaptada a las condiciones climáticas locales. Las plantas representan un elemento necesario para realizar el proceso de evapotranspiración en la capa de sustrato, crucial para los efectos de enfriamiento [26].

2.1 Contexto Nacional

La universidad Nacional de Colombia, con visión a la sostenibilidad, presentó el artículo de “Techos verdes: ¿Una herramienta viable para la gestión ambiental en el sector hotelero del Rodadero, Santa Marta?”. En el cual, determinaron que los techos verdes podían solucionar el problema de inundación por las aguas lluvias en el sector del rodadero. Pero, se ve obstaculizado por el clima, ya que, al presentar un clima cálido seco intenso y con periodos de sequías de hasta 5 meses; pone en riesgo inminente la supervivencia de la vegetación o, por el contrario, requeriría de un riego constante. Esta situación aumenta los costos de mantenimiento y, por ende, la viabilidad del techo verde. Por esta razón, sugirieron la búsqueda de especies nativas que se puedan adaptar a condiciones de intenso calor y poco riego [27].

Felipe Arango y Daniela Guevara, estudiantes de ingeniería civil de la Universidad EIA, implementaron un sistema de monitoreo de temperatura, humedad y temperatura radiante en el edificio Verde Avignon en el barrio San Lucas, en la ciudad de Medellín, en donde establecieron de una forma experimental las mejorías que otorgan los techos y fachadas verdes en lo que

respecta al confort térmico al interior de una vivienda. Y como resultado, obtuvieron buen amortiguamiento térmico, pero sin una mejoría en el confort, el cual mantiene la temperatura estable a lo largo del día. Con respecto a las fachadas determinaron que regulan mejor la temperatura, evitan los problemas de humedad además de no necesitar sistemas de riego, lo que disminuye los costos operacionales [28].

Carlos García, estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad Santo Tomás, aplicó el techo verde en el clima cálido- húmedo del municipio de Villavicencio, con temperaturas medias de 27 °C. El modelo constaba de implementar botellas plásticas, dentro de estas se incorporó el abono orgánico con una mezcla de cascarilla de arroz (relación 1:2), con el fin de reducir el peso del abono y como cobertura vegetal, se utilizó una grama (*Cynodon dactylon*). Sin embargo, no se redujo significativamente la temperatura debido a que no se cubrió gran parte del techo. Además, la vegetación no fue lo suficiente frondosa para soportar las condiciones climáticas [29].

Otro trabajo de grado perteneciente a la Universidad Santo Tomás implementó un techo verde en la ciudad de Chiquinquirá. La ciudad tiene un rango de temperatura de 12 a 18 °C, lo que la clasifica en un clima muy frío seco según la clasificación climática de Holdridge. En este trabajo de grado se generó una guía para la construcción de techos verdes en la ciudad de Chiquinquirá, en la cual, plantean una estructura y el costo con mantenimiento para cada modelo de techos verde: extensivo (\$138,000) e intensivo (\$169,000) [30].

3. Marco teórico

3.1 Techos verdes

Los techos verdes son una tecnología que permite incluir la vegetación en el sector urbano. Sin embargo, se debe considerar el tipo de vivienda, los factores climáticos, las necesidades y preferencias del beneficiario. Por esta razón presenta dos clasificaciones, una clasificación primaria y secundaria [31].

De acuerdo con esto, la Secretaría Distrital de Ambiente determina que, la clasificación primaria está relacionada de acuerdo con su intención de construcción y relaciona el debido mantenimiento que estos acarrearán. Por otro lado, la clasificación secundaria considera el grado del sistema empleado de acuerdo con la capacidad y requerimientos de la vegetación, además de la carga portante del mismo en estado saturado [32].

3.1.1 Clasificación primaria

Teniendo en consideración lo especificado en la guía, la clasificación primaria tiene ciertas características claras y concisas de acuerdo con la necesidad dada. Como primera instancia, están los techos verdes autorregulados, caracterizados en usar el mínimo de materiales, de inversión monetaria y de poca carga estructural; en segunda instancia, los ajardinados, que cuentan con tipos de plantas ornamentales sin tamaño específico y gran follaje; en tercera instancia, los especializados, los cuales aportan un hábitat dedicado para fauna y flora, con ciertas especificaciones de altura y peso. Por último, el tipo huerta, los cuales otorgan cierta producción y además cuentan con sistemas de irrigación específicos [33].

3.1.2 Clasificación secundaria (Según peso)

Por otra parte, los secundarios tienen una segmentación más específica en lo que refiere a la carga que aplican estas estructuras sobre las cubiertas, donde las livianas reducen el peso de una forma drástica, los moderados que aplican un poco más de carga sobre la estructura y los robustos que tienen la máxima carga admisible sobre la superficie por m².

3.1.2.1 Techos verdes livianos. Este tipo cumple la totalidad de los requisitos técnicos y el propósito de uso, empleando estrategias especiales para reducir significativamente el peso total en estado de saturación (lleno de agua) [34].

El techo verde autorregulado liviano debe tener una capa vegetal resistente a ambientes extremos con una altura máxima de 200 mm y peso total hasta 80 kg/m² en estado saturado. Por otro lado, el ajardinado liviano tiene plantas de jardín con altura máxima de 500 mm y peso total hasta 150 kg/m² en estado saturado. Por otra parte, el ecológico especial liviano contiene plantas cuya altura máxima es de 500 mm y un peso total hasta 200 kg/m² en estado saturado [32]. Y, por último, el tipo huerta presenta cultivos con altura máxima de 500 mm y peso total hasta 150 kg/m² en estado saturado [34].

3.1.2.2 Techos verdes moderados. Corresponden a una resistencia media con la implementación de componentes y metodologías convencionales.

Por lo tanto, el techo verde autorregulado moderado presenta una altura máxima de 500 mm y peso total de más de 80 kg/m² y hasta 120 kg/m² en estado saturado. Mientras que el ajardinado moderado tiene una vegetación con altura máxima de 2000 mm y peso total de más de 150 kg/m² y hasta 250 kg/m² en un estado saturado; el especial moderado sus plantas propias de

la región cuentan con una elevación máxima de 1500 mm y con peso total de más de 200 kg/m² y hasta 300 kg/m² en estado saturado; y los cultivos del tipo huerta moderada cuentan con altura máxima de 1000mm y peso total de más de 150 kg/m² y hasta 250 kg/m² en estado saturado [34].

3.1.2.3 Techos verdes robustos. Es un sistema que representa cargas significativas mayores al de los moderados. Por lo que el autorregulado robusto tiene una capa vegetal que soporta mayores condiciones ambientales con altura máxima de 500 mm y peso total de más de 120 kg/m² y hasta 150 kg/m² en estado saturado; el ajardinado robusto presenta una vegetación de jardín sin límites de altura y peso; el ecológico especial robusto tiene una vegetación máxima de 2000 mm y con peso total de más de 300 kg/m² y hasta 450 kg/m² en estado saturado; y el tipo huerta robusta con cultivos con límite de altura máxima de 1500 mm y peso total de más de 250 kg/m² y hasta 350 kg/m² en estado saturado [34].

3.2 Consideraciones medioambientales

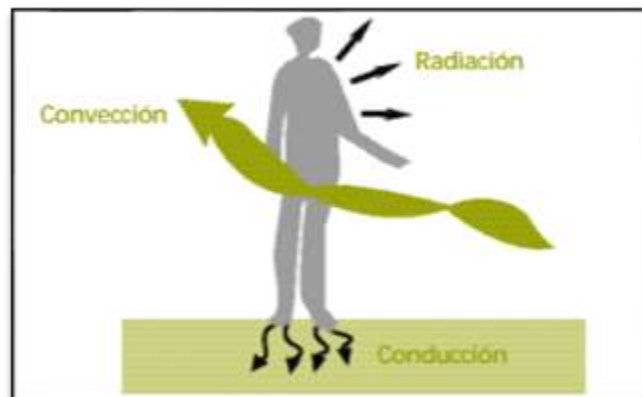
A pesar de que los techos verdes teóricamente son amigables con el medio ambiente, se debe evitar realizar ciertas prácticas que ponen en riesgo esta cualidad. Tales como, el uso de productos químicos y fertilizantes, ya que se corre el riesgo de contaminar las aguas de escorrentía. Por otro lado, se debe comprar materiales de proveedores locales, para así reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero producto del transporte y en el caso ideal, usar materiales reciclados [32].

3.3 Efecto térmico en una vivienda

Una vivienda debe garantizar el bienestar térmico con una demanda energética compatible con las actividades realizadas dentro de ella. Este confort depende de la temperatura y de la humedad relativa, de la velocidad del aire, la vestimenta de las personas, y de la temperatura de las superficies de los espacios [35], según la norma ISO 7730, la cual muestra los ideales de la sensación térmica general y el grado de incomodidad de los ambientes.

La sensación de confort térmico no es un valor constante para todas las personas, ya que está influenciada por la temperatura del aire, la velocidad del aire, la humedad, las actividades humanas, y la temperatura radiante media [36]. De igual manera, se debe considerar que existen diferentes mecanismos de transferencia de calor, los cuales son, conducción, convección y radiación. La conducción se produce con el intercambio de calor por medio del contacto de dos cuerpos, la convección ocurre con el intercambio entre un cuerpo y un fluido en movimiento y la radiación es la energía emitida por un cuerpo (ver figura 1) [37].

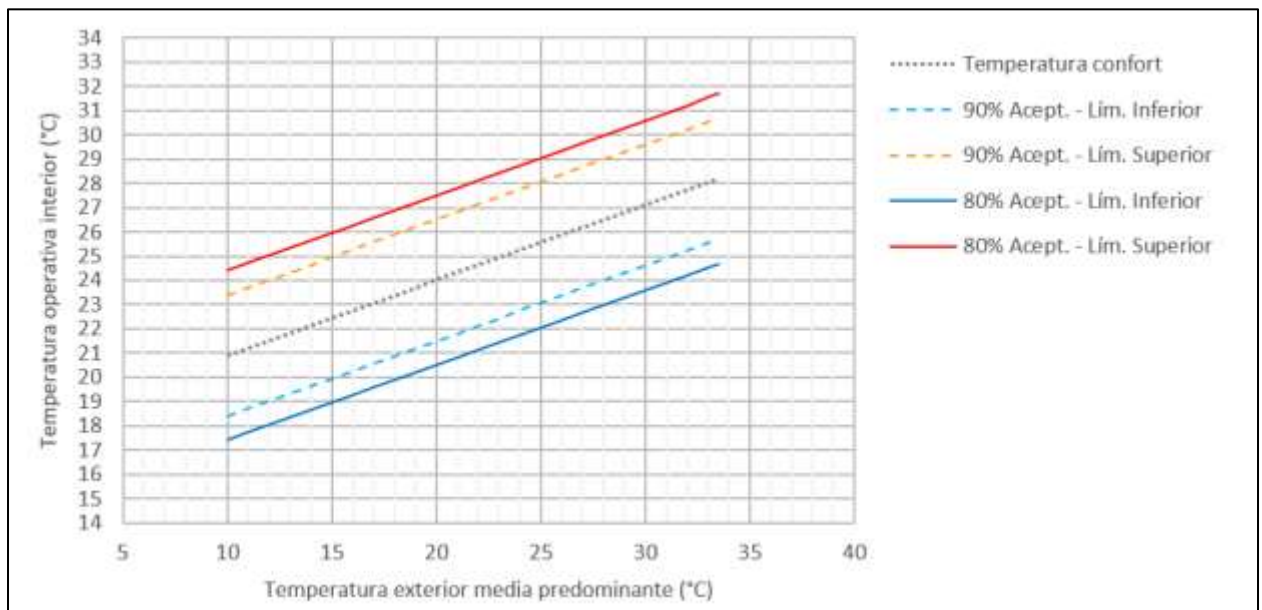
Figura 1. *Intercambio de calor del cuerpo humano con el ambiente*



Tomado de [38].

El confort térmico puede adoptarse con una temperatura efectiva de 22 a 26 °C, pero se puede clasificar como: cómodo fresco a 20.5 a 22.8 °C, comodidad óptima de 22.8 a 25.8 °C, cómodo cálido a 25.8 a 27.1 °C y el calor incómodo inicia a 27.1 °C [36]. Por medio de la norma ASHRAE 55, se estableció las condiciones térmicas aceptables dentro de las edificaciones (ver figura 2). Esta temperatura de confort se puede calcular por medio del promedio de la temperatura del aire y la temperatura radiante media [39].

Figura 2. *Temperaturas operativas aceptables para edificios pasivos según la norma ASHRAE 55*



Tomado de [39].

De acuerdo con la Agencia Estatal de Meteorología, (AEMET), a partir de estudios realizados se llegó a una Tabla de Valores De Sensación Térmica por Calor, la cual se basa principalmente en la relación de la temperatura del aire y la humedad relativa, todo esto tomado

con un termómetro higrómetro, tabulando la información recolectada de acuerdo a la sensación térmica calculada en base al estudio, del mismo salieron 4 rangos de sensación térmica de acuerdo a la temperatura y humedad, los cuales son:

- Precaución (27 a 32): Posible fatiga por exposición prolongada o actividad física.
- Precaución extrema (33 a 40): Insolación, golpe de calor, calambres. Posibles por exposición prolongada o actividad física.
- Peligro (41 a 53): Insolación, golpe de calor, calambres. Muy posibles por exposición prolongada o actividad física.
- Peligro extremo (54 o más): Golpe de calor, insolación inminente.

Los cuales determinan las posibles consecuencias de estar expuestos a estas variables climatológicas y su incidencia en los seres humanos. [40]

Sin embargo, garantizar este factor se ven obstaculizado por: el diseño arquitectónico, la superficie reducida con una alta tasa de ocupación o materiales con baja capacidad de aislación [35]. Por lo anterior, los habitantes de la vivienda para garantizar una temperatura interior confortable implementan aparatos de enfrenamiento o de calefacción, esto a su vez genera una demanda de energía y contribuye al efecto (UHI) [41].

4. Marco legal

Ley 164 de 1994, por el Congreso de Colombia, en el artículo 3 y 4, se aprueba la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático, nombrando los principios y compromisos para el cumplimiento de este y la prevención del cambio climático [42].

Ley 629 del 2000, el Congreso de Colombia en el artículo 2 y 3, se procede a la adaptación del protocolo Kioto en Colombia, reducción de CO₂ y empezar la búsqueda de la sostenibilidad [43].

La ley 788 de 2002, el Congreso de Colombia en el artículo 78, se establece la deducción por inversiones en control y mejoramiento del medio ambiente [44].

En el acuerdo 323 de 2008, se autoriza la inclusión del Estándar Único de Construcción Sostenible en el Código de la Construcción de Bogotá y se dictan otras disposiciones [45].

Acuerdo 391 de 2009, por medio del cual se dictan lineamientos para la formulación del Plan Distrital de Mitigación y Adaptación al cambio climático y se dictan otras disposiciones [46].

Acuerdo de ley 418 de 2009, por el cual se promueve la implementación de tecnología arquitectónica sustentable, como techos o terrazas verdes, en otras en el D.C. y se dictan otras disposiciones. En la cual, se promueve la inclusión de los techos verdes en Bogotá con el objetivo de disminuir el cambio climático [46]

En el 2011, la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, por medio de la resolución 6423 adopta la Guía Técnica de Techos Verdes”, en la cual, el capítulo 3 se determina los requerimientos mínimos de una cubierta verde para una edificación [46]

Resolución 619 de 2011, por la cual se establecen las características. y condiciones para el diseño e implementación de jardines verticales en el Distrito Capital. En la cual, se exponen los requerimientos mínimos y ciclo de vida y se toman otras determinaciones [46]

En el 2015, la alcaldía de Bogotá por medio del decreto 613, estableció incentivos para la adopción de medidas de construcción sostenible y ecourbanismo en ahorro de agua y energía en viviendas nuevas de interés social (VIS) e interés prioritario (VIP) [47]

El plan de desarrollo territorial de la ciudad de Villavicencio en el capítulo 3, artículo 13 se propone implementar la búsqueda de las zonas verdes. En el capítulo 4, artículo 34, tiene como objetivo implementar soluciones que permitan reducir el efecto de la isla de calor y proteger el aire. Y en el capítulo 6, artículo 243 tiene como objetivo generar y apoyar proyectos de sostenibilidad y reducción de cambio climático.

En la norma NSR 10 en el capítulo A-9, indica las consideraciones de los elementos no estructurales de las cubiertas. Y en el capítulo B-3, B-4 y B-6, permite tener claro las cargas muertas y de las cargas vivas de los elementos no estructurales, tales como, las cubiertas y generadas por los vientos.

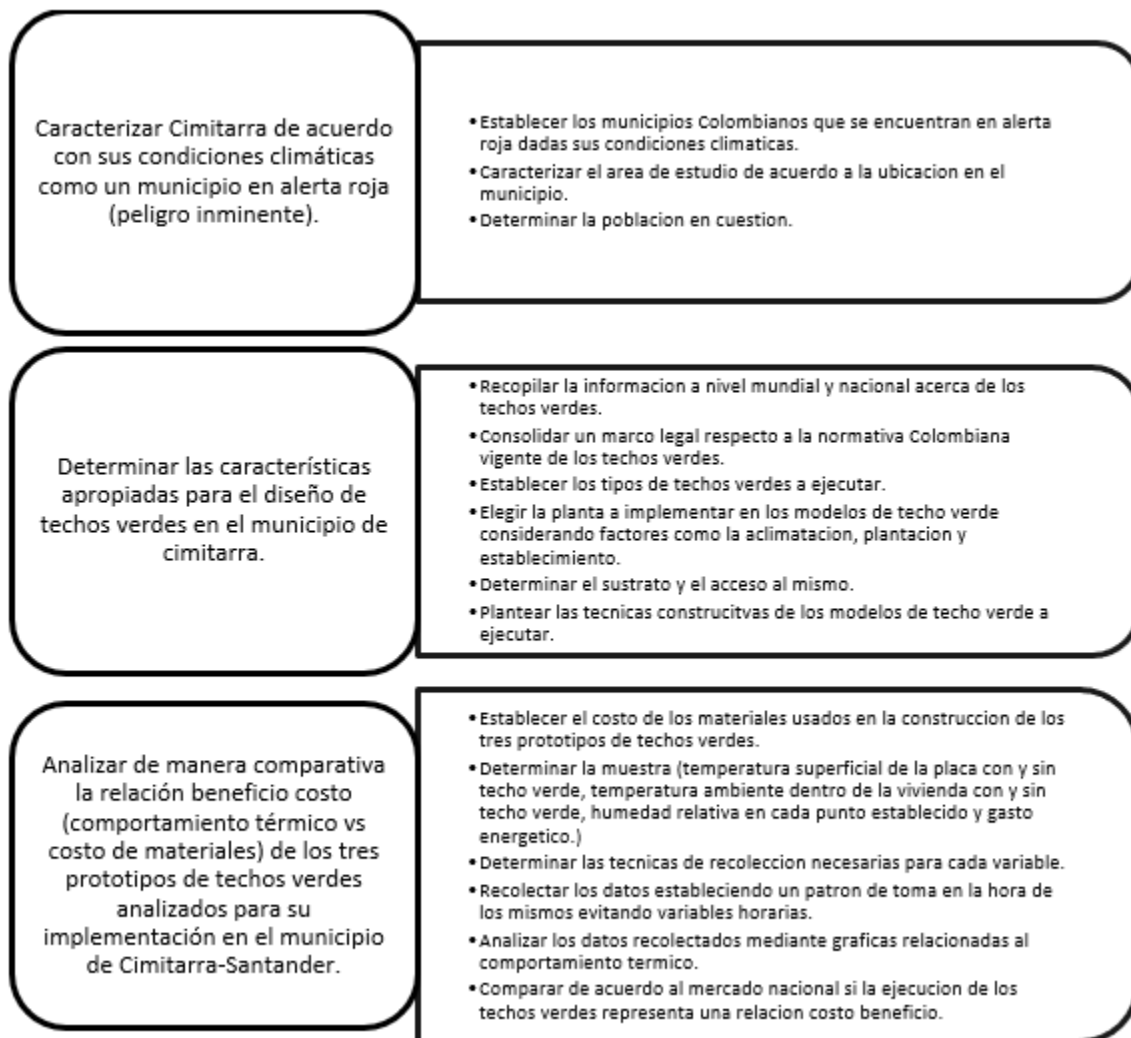
5. Metodología

El objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto de la implementación de tres modelos de techos verdes para una vivienda urbana en el municipio de Cimitarra-Santander, con el fin de reducir el efecto térmico en el interior de la vivienda y su consumo de energía. El impacto se evalúa mediante el análisis de la variable de la altura del sustrato en cada uno de los modelos. Para ello, se realizó una investigación descriptiva enfocada en las características que favorecen la mitigación térmica y energética.

Por lo que, se ejecutaron tres diseños experimentales en la misma vivienda. Cada uno de ellos se ubicó en condiciones ambientales similares a las de los demás con el fin de conocer, de manera más precisa, la variación de la temperatura en la vivienda a partir de los datos proporcionados por cada prototipo. La evaluación se hizo en un trascurso de tiempo de tipo longitudinal, esto quiere decir, que se observó el comportamiento de los techos verdes a lo largo de 109 días, en el periodo del 29 de septiembre al 15 de enero. Sumado a estos datos, se

agregaron otros que permitieron comparar el costo de cada modelo de techo verde con referencia al costo de un modelo comercial. Por último, se determinó una relación entre el costo y el beneficio al implementar cada modelo. Y de esta manera, se obtuvo el modelo de techo verde adecuado para una vivienda urbana en el municipio de Cimitarra, Santander.

Figura 3. Metodología



5.1 Área de estudio: Cimitarra-Santander

El municipio de Cimitarra se fundó el 23 de abril de 1967, está localizado al norte de Colombia con longitud al oeste de Greenwich $73^{\circ} 56' 02''$, Latitud Norte $6^{\circ} 18' 58''$ en el costado sur occidental del departamento de Santander. Este municipio se encuentra a 200 kilómetros de la capital del departamento, Bucaramanga (ver Figura 3) [48].

Con dos climas predominantes: cálido húmedo y cálido semihúmedo. Tiene una temperatura promedio anual de 27.5°C , pero hay una tendencia al aumento de la temperatura promedio a razón del aumento de la radiación solar [49].

Figura 4. *Ubicación de Cimitarra, Santander*

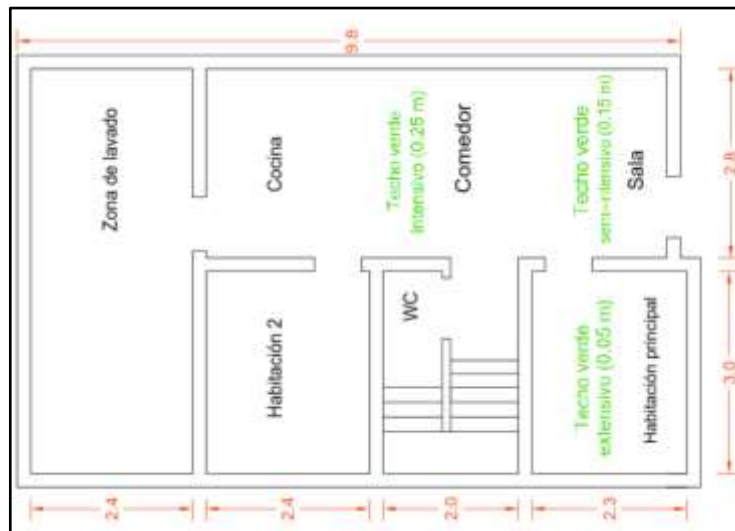


Tomado de [50].

5.2 Población

Se escogió una vivienda en el barrio de Altos de la Paz, ya que cuenta con una cubierta de concreto lo que permite la instalación de los modelos sin riesgo al daño de la estructura debido al peso de estos. La vivienda cuenta con 2 habitaciones, el comedor, la sala, la cocina, 1 baño y la zona de lavado. La vivienda se encuentra habitada por una familia que serán los sujetos de prueba de los beneficios de los modelos.

Figura 5. Plano



5.3 Elección de planta: Lengua de suegra

La elección de la planta es un factor crítico para el desempeño de un techo verde y para ello fue importante tener en cuenta la resistencia a la luz solar y el requerimiento de agua. En primera instancia el criterio de la tolerancia a luz solar directa especialmente en zonas con luz solar intensas como es el caso de Cimitarra. Por otro lado, para contribuir a la protección del agua, recurso no renovable que está en peligro de escasez se hizo necesario que los techos verdes tengan el menor consumo de agua posible o el ideal, sería que no necesiten un sistema de riego. Además, que al eliminar el sistema de riego se disminuye costos y tiempo de instalación y de mantenimiento [51].

Para este trabajo de grado se determinó el uso de la lengua de suegra de nombre científico *Sansevieria Trifasciata* (ver figura 5), ya que tiene como característica fundamental una alta resistencia a las condiciones ambientales desfavorables. Además, cuenta con un alto nivel de

purificación del aire, puede absorber sustancias tóxicas como lo son el benceno, el formaldehído y el tricloroetileno y reducen las concentraciones de los gases de dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre SO_2 , y monóxido de carbono (CO) [52]. Se ha demostrado que esta planta tiene aportes en la reducción de la demanda biológica de oxígeno (DBO) del 82.88%, de la demanda química de oxígeno (DQO) de 76.47 % y en la eliminación de aceite y grasa (O&G) del 33.33% [53].

La *Sansevieria* es una hierba perenne de 40 a 90 cm de alto. Hojas gruesas, linearlanceoladas, erguidas, terminan en punta a manera de espina, de color verde-oscuro con franjas blancas o amarillas. Las hojas nacen de un rizoma carnoso subterráneo. Flores blanco-verdosas, agrupadas en inflorescencias erguidas racimosas, muy fragantes (ver Figura 5) [52].

Figura 6. *Planta lengua de suegra escogida para el proyecto.*



Tomado de [54].

5.3.1 Aclimatación, plantación y establecimiento

Las plantas fueron extraídas y sembradas en bolsas de cultivo negras para permitir que estas presentaran un periodo de adaptación de 3 semanas. En las cuales se expusieron al sol directo con poca agua, para así garantizar su supervivencia (ver figura 6).

Después de este periodo, se procedió la plantación el día 24 de septiembre del 2021 en horas de la mañana con el motivo de evitar que el sustrato y la planta presentaran temperaturas elevadas y que esto representara un riesgo para su supervivencia (ver figura 6).

Figura 7. *Extracción y disposición de plantas en las bolsas.*



5.4 Sustrato

El sustrato se dispuso según la altura requerida para cada modelo (5 cm, 15 cm, 25 cm). Se determinó que este fuera compuesto por tierra y de material orgánico. Se garantizó un alto contenido orgánico para que el sustrato contara con una alta capacidad de retención de agua, porosidad de aire, la disminución del peso húmedo. Además, este es de fácil acceso en el sector y cuenta con un bajo precio.

Figura 8. *Preparación del sustrato*



5.5 Técnicas de construcción

Cada modelo de techo verde se realizó con un área de 1 m². Se implementó una membrana asfáltica para impermeabilizar y evitar daños en la cubierta (ver figura 8). No se implementó sistema de drenaje con el fin de observar la capacidad de retención de agua. Por lo que se dejó un drenaje libre correspondiente a la pendiente de la placa. Enseguida, como contención se emplearon tablonces de madera que fueron impermeabilizados para evitar el deterioro por la humedad (ver Figura 9).

Luego, se dispuso el sustrato en cada modelo, la altura para el diseño del modelo de tipo intensivo fue de 25 cm, el semi-intensivo de 15 cm, y el extensivo de 5 cm, en los tres modelos se implementaron como vegetación la lengua de suegra (*Sansevieria*)(ver Figura 10).

Esta planta se escogió debido a que es una planta perenne, resistente al sol directo, a las altas temperaturas, requiere poca agua y mantenimiento; lo que la hace de naturaleza casi indestructible. Además, se ha demostrado que debido a que es una planta donde su estructura es completamente foliar, que captura y sintetiza de una manera más apropiada los rayos UV y es una planta recomendada por la NASA como una especie purificadora del aire, eliminando tóxicos como el benceno y el formaldehído [55].

Figura 9. *Cubierta en donde se implementó el proyecto*

Nota: se dispuso dos recortes de manto asfáltico de tal forma que se logró un área de 1.44 m². Se dejó 10 cm de manto asfáltico en cada lado del modelo de techo verde. Y así se garantizó la protección a la humedad.

Figura 10. *Disposición del sustrato, tablonces de madera prensada implementados para realzar la contención de cada modelo*

Nota: mezcla de la tierra con materia orgánica, en el modelo intensivo se colocaron las plantas de mayor longitud, para el modelo extensivo se implantaron tablas cuya altura fue de 15 cm y para los otros dos modelos de 25 cm. Cada cuadrado es de 1 m².

Figura 11. *Visualización del modelo intensivo de 25 cm, modelo semi-intensivo de 15 cm y modelo extensivo de 5 cm finalizado*

Figura 12. *Visualización de los tres modelos de techo verde de 1 m²*



5.6 Muestra

Se tuvo en cuenta la variable principal, la altura del sustrato y se tomaron los siguientes datos, temperatura interna, humedad relativa, confort térmico (sensación térmica), y el gasto energético, reflejado en el consumo de la energía eléctrica. Los datos de la temperatura correspondieron a la medida registrada al interior de la vivienda. Lo que nos permitió conocer si hay garantía de un confort térmico.

5.7 Técnicas de recolección

Para la toma de las variables de temperatura y humedad se empleó un termómetro hidrómetro ambiental digital. Lo primero, fue medir las variables en los puntos donde se instalaron los tres modelos y enseguida se compararon con los de un área desprovista del techo verde. Esta medición se hizo en el interior de la vivienda, en un punto ubicado inmediatamente debajo de cada modelo, a una altura promedio de 1 m debajo de cada uno.

Este seguimiento de temperatura y humedad se realizó desde el 29 de septiembre de 2021 hasta el 15 de enero del 2022 siempre a la 1:00 p.m. dada la incidencia de la luz solar, de modo que los techos cumplieran con las mismas condiciones a la hora de tomar los datos, los cuales se recolectaron en un formato que facilitó su análisis.

Figura 13. *Termómetro higrómetro usado para tomar las temperaturas y humedades relativas*

5.8 Análisis de datos

Para un correcto análisis de datos, se hizo uso de las cifras correspondientes a la temperatura y humedad relativa en cada día medido. Se observó las variaciones de la temperatura ambiente y la temperatura superficial debajo y encima de la placa de la vivienda con y sin techo verde, además de la temperatura nominal de la placa con total incidencia de la luz solar, para contar con un valor guía, tomando así la humedad en los mismos puntos. Estos valores fueron tabulados y graficados por medio de la herramienta Microsoft Excel. De esta manera, se determinó la cantidad de grados que permitió disminuir cada techo verde. De esta manera, se identificó el techo verde con mayor eficiencia en la disminución de temperatura dentro de la vivienda.

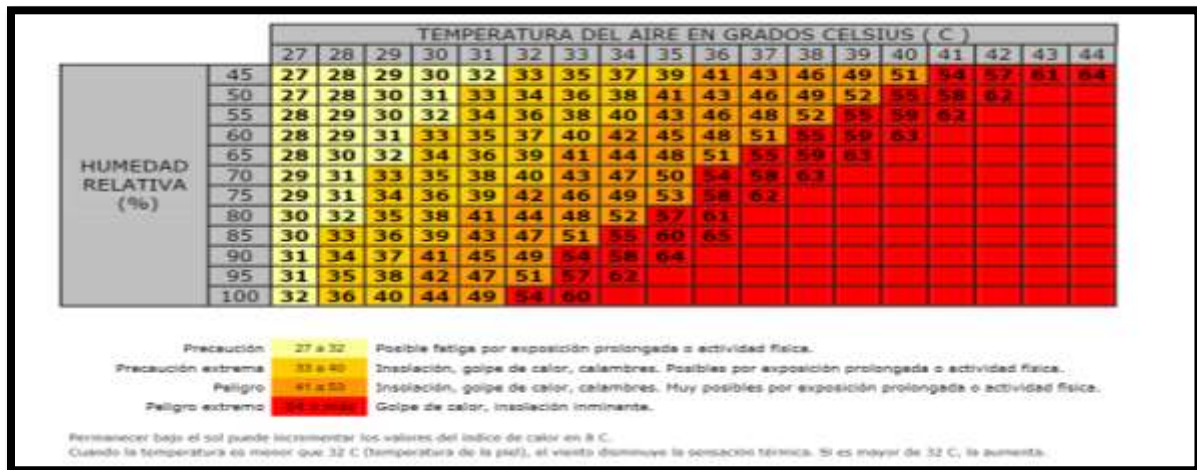
Se implementó como guía la tabla de valores de sensación térmica por calor (HEAT INDEX) (ver figura 13) y la ecuación de sensación térmica, elaboradas por AEMET [40]. Por medio de esta información, se elaboró una tabla dinámica en la herramienta de Microsoft Excel (ver figura 14), que permitió tabular los datos recolectado con el fin de observar con claridad su ubicación en los rangos: precaución, precaución extrema, peligro, peligro extremo. Lo que

permitió visualizar la eficiencia de los techos verdes al momento de garantizar la sensación térmica. De esta manera se logró analizar la sensación térmica en los lugares donde no se dispuso de techo verde y donde si, en la misma habitación de acuerdo con los valores obtenidos.

Para el análisis de la relación beneficio costos, se tabulo el costo de los materiales al momento de implementar cada modelo de techo verde. Este valor se relacionó con el rendimiento del modelo al disminuir la temperatura de la placa y mejorar la sensación térmica.

Y, por último, para determinar la diferencia del consumo energético de la vivienda con o sin techo verde, se recopilo los datos de las facturas de luz, y se hizo el contraste entre los consumos previos y posteriores a la implementación del techo verde, generando así la cantidad de KW/meses disminuidos a raíz de la implementación de las cubiertas verdes.

Figura 14. Tabla de valores de sensación térmica por calor.

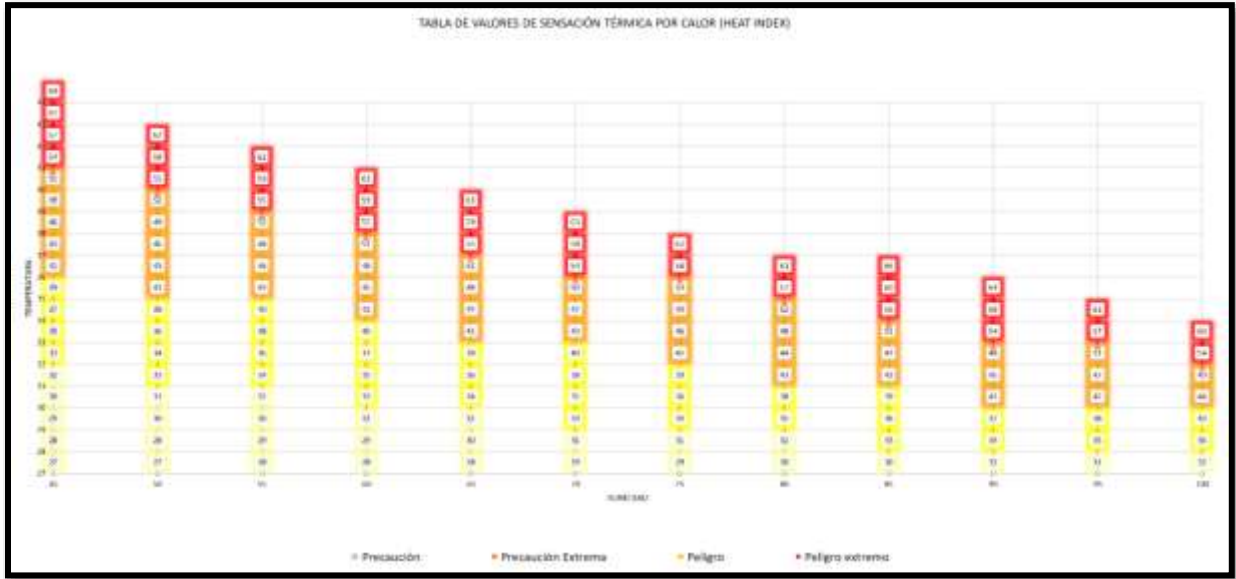


Tomado de [40]

Los valores de la sensación térmica están definidos por la siguiente ecuación, en donde T corresponde a la temperatura del aire ambiente en grados Celsius y HR es la humedad relativa del aire en % [40]

$$\begin{aligned}
 ST_C = & -8.78469476 + 1.61136411 * T + 2.338548839 * HR - 0.14611605 * T * HR \\
 & - 0.12308094 * T^2 - 0.016424828 * HR^2 + 0.0072546 * T * HR^2 \\
 & - 0.000003582 * T^2 * HR^2
 \end{aligned}$$

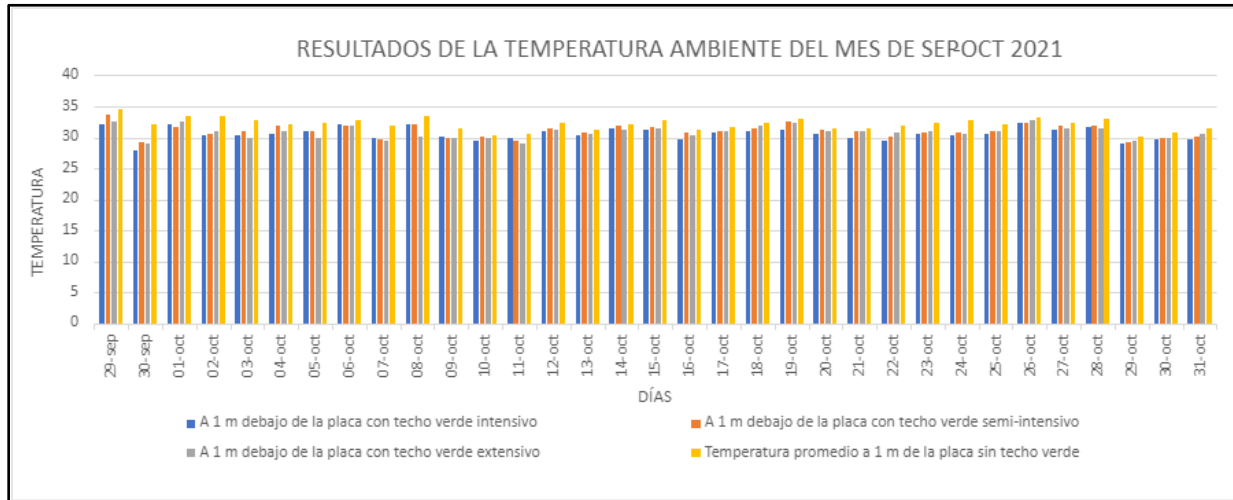
Figura 15. Tabla de los valores de sensación térmica elaborada en Excel.



6. Resultados

Se realizó la recolección de datos desde el 29 de septiembre de 2021 al 15 de enero de 2022, todos los días a la 1:00 p.m. De estos datos se realizó una comparación entre la temperatura ambiente de la sección de la casa sin techo verde con los modelos: intensivo, semi intensivo y extensivo. De igual forma, se realizó el mismo proceso para la temperatura por contacto.

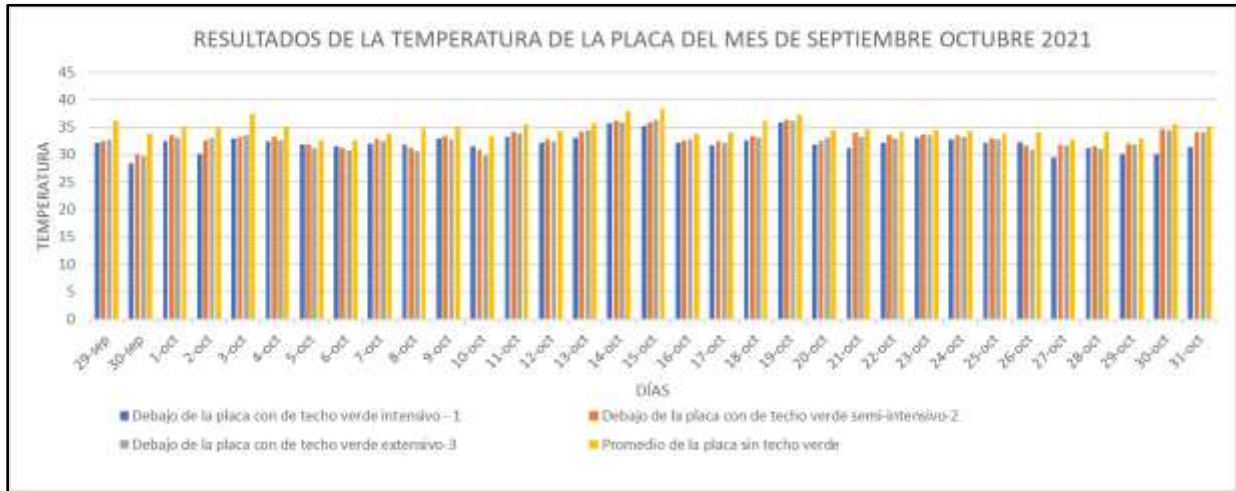
Figura 16. Resultados de la temperatura ambiente del 29 de septiembre a 31 de octubre de 2021.



En la figura 15, siendo el primer mes de la implementación de los modelos se observó una reducción de la temperatura ambiente en el techo intensivo con un rango que oscila entre 0.6 a 4.2 °C, el semi intensivo de 0.2 a 2.9 °C, y el extensivo de 0.33 a 3.17 °C. Se observó que, durante todos los días, se redujo la temperatura. Sin embargo, se contempló que durante los días 30 de septiembre y 14 de octubre se observó una variación significativa en la temperatura ambiente con el techo verde intensivo; ya que en el primero fue de 27.9°C y de 31.4 °C, generando una diferencia de 3.5 °C, a pesar de que en los dos días se presentó una temperatura ambiente sin techo verde de 32.1 °C. Esta diferencia también se observó en los otros dos modelos.

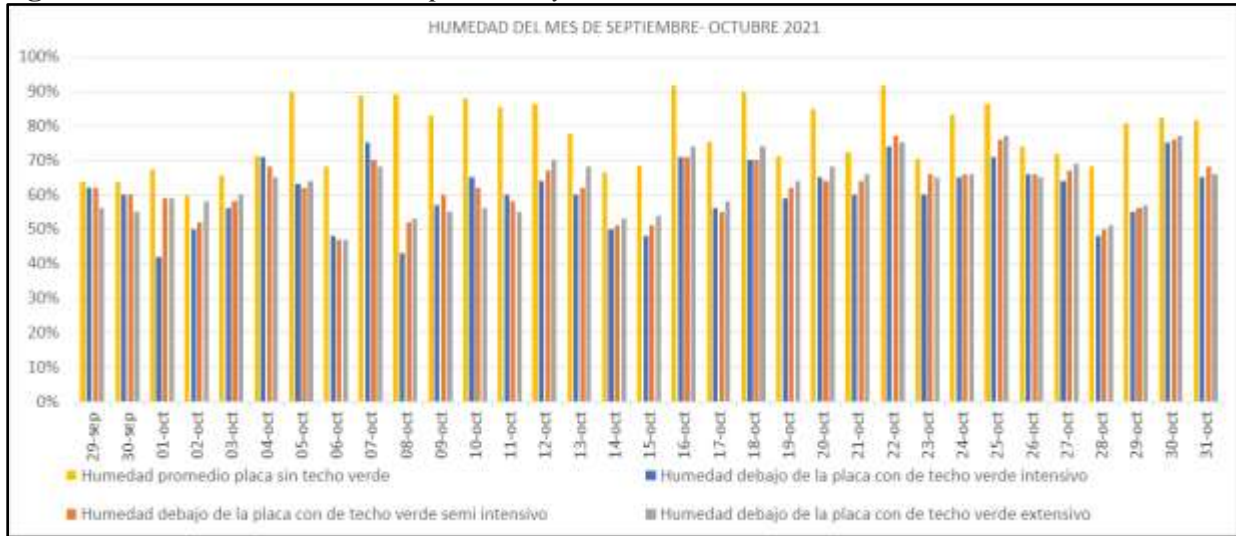
De igual manera, se recomienda ver el anexo 1, ya que la tabla expuesta permite observar los valores exactos de la reducción de la temperatura

Figura 17. Resultados de la temperatura de la placa en el mes de septiembre 29 al 31 de octubre de 2021.



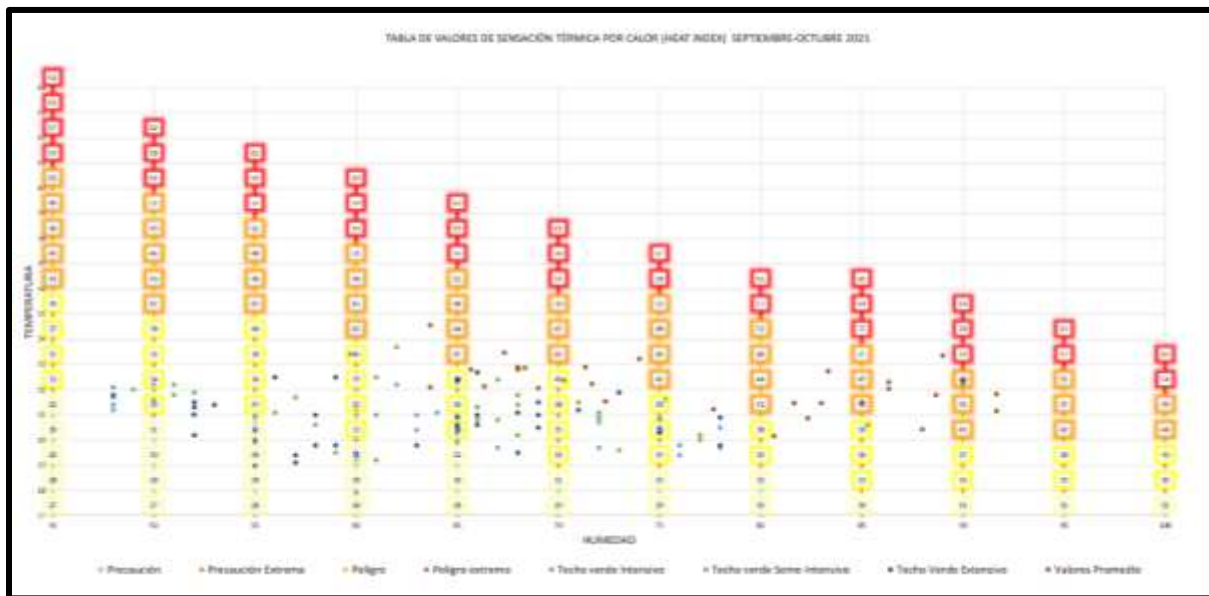
En la figura 16, se puede observar la disminución significativa de la temperatura de la placa con cada modelo de techo verde. El intensivo, mostró una reducción de 5.4 °C el segundo día de ser implementado, manteniéndose en un rango de 5.4 a 0.7 °C. En comparación con el Semi-intensivo, que presento un rango de 4.2 a 0.7 ° C y el extensivo de 4.2 a 1 °C. En comparación con el Semi-intensivo, que presentó un rango de 4.2 a 0.7 ° C y el extensivo de 4.2 a 1 °C. Los techos intensivo y semi-intensivo redujeron 0.7°C como mínimo, sin embargo, el extensivo presentó una reducción mínima de 1° C.

Figura 18. Humedad del 29 de septiembre y 31 de octubre de 2021.



En la figura 17, se observó que en la placa con techo verde se disminuye la humedad en promedio un 17% a 15 %. Sin embargo, se puede observar que el día 8 de octubre, el intensivo disminuyó un 46%, el semi intensivo 37% y el extensivo un 36%.

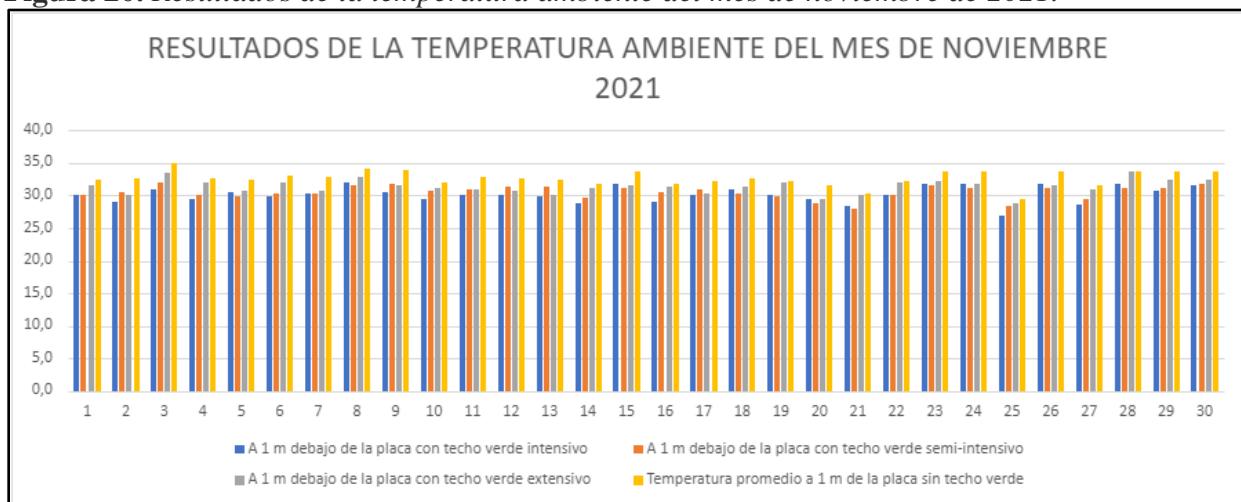
Figura 19. Valores de sensación térmica por calor del 29 de septiembre al 31 de octubre de 2021.



En la figura 18 muestra los valores de sensación térmica por calor (HEAT INDEX), que permite identificar el estado bajo unas directrices que de acuerdo con color nos indican qué tan eficiente es cada cubierta verde en relación con la ubicación de cada punto. De esta manera se identificó que, de los 33 días de muestra de septiembre a octubre, 28 días presentó una sensación térmica de peligro y 4 días de precaución extrema en el sector de la casa sin techo verde. Pero, en el sector con techo verde intensivo 29 días estuvieron en el rango de precaución extrema y 4 en el de precaución; en el techo verde semi intensivo, 2 días de peligro, 27 de precaución extrema y 4 en precaución; y, el extensivo, 2 en peligro, 26 en precaución extrema, y 5 en precaución.

Además, dadas las variaciones meteorológicas mencionadas, se presentó un deterioro en la vegetación lo cual influyó en la reducción de la temperatura.

Figura 20. Resultados de la temperatura ambiente del mes de noviembre de 2021.

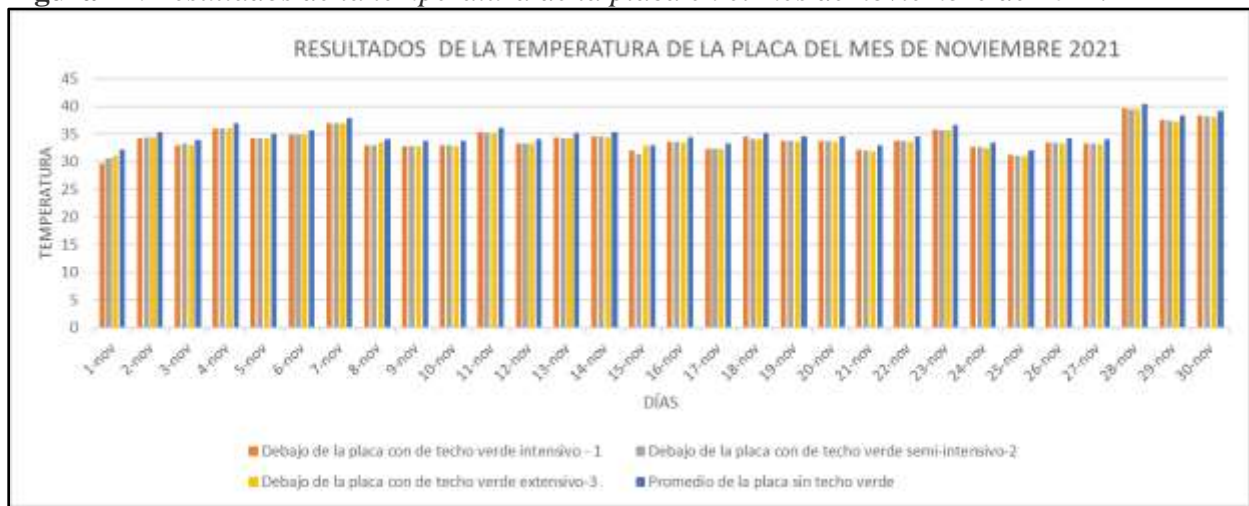


En la figura 19, se puede observar que el techo verde intensivo se mantiene como el modelo de mejor rendimiento para disminuir la temperatura dentro de la vivienda, sin embargo, dadas las condiciones meteorológicas en este mes (un sol muy intenso hasta el mediodía y

precipitaciones pluviales en la tarde) no se presentó una alta eficiencia en la reducción de dicha temperatura con un resultado de 3.9°C respecto al anterior, puesto que en dicho mes la reducción fue de 4.2°C.

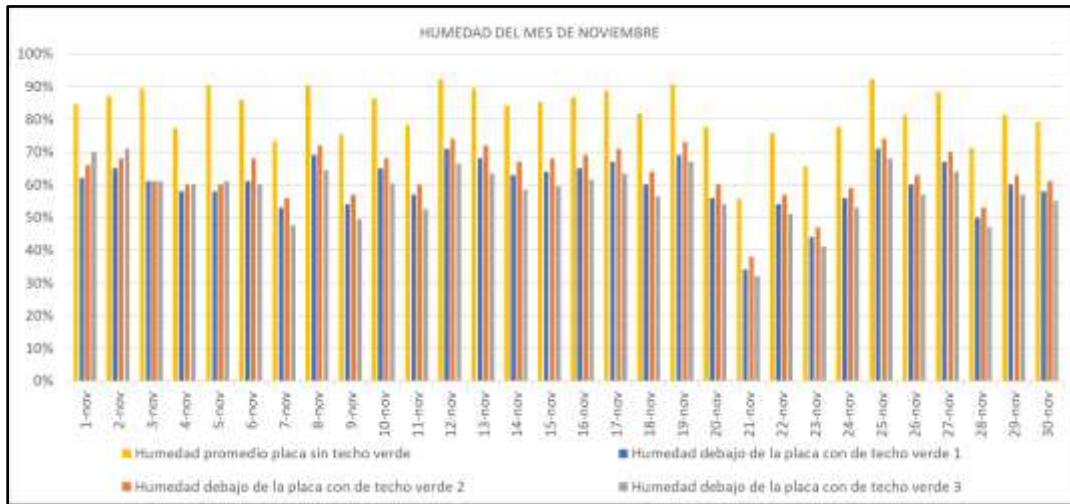
Además, dadas las variaciones meteorológicas mencionadas, se presentó un deterioro en la vegetación lo cual influyo en la reducción de la temperatura.

Figura 21. Resultados de la temperatura de la placa en el mes de noviembre de 2021.



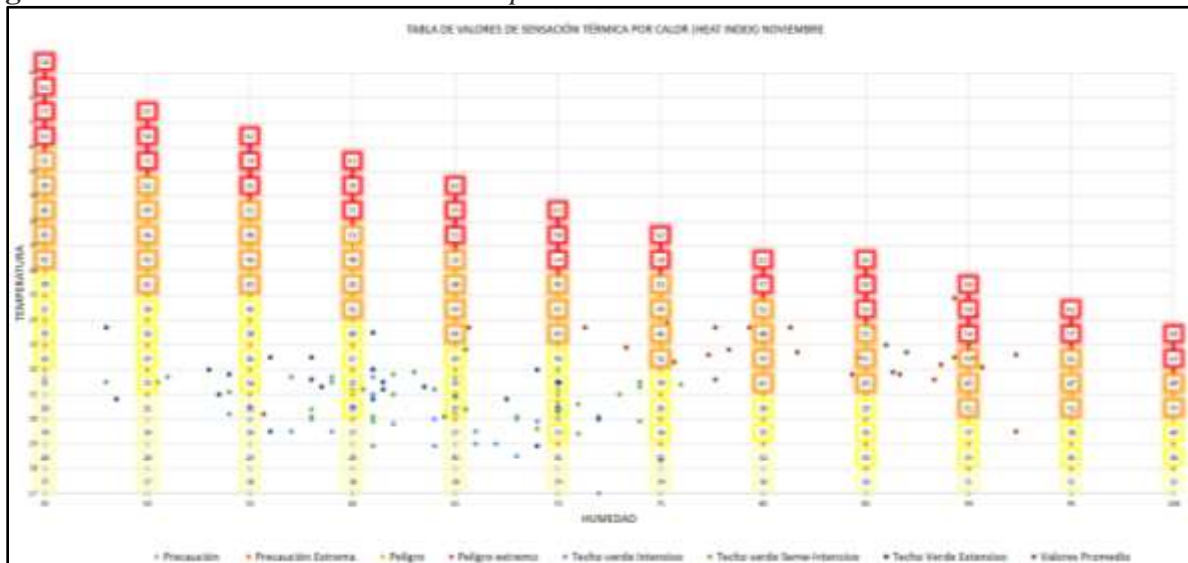
En la figura 20, se puede observar que los techos verdes presentaron un rendimiento similar, ya que en promedio todos redujeron 0.9 °C. Pero, en este mes, el techo verde intensivo solo redujo 2.5 °C, el semi intensivo de 1.6 °C, y el extensivo 1.1 °C.

Figura 22. Resultados de la humedad en el mes de noviembre de 2021.



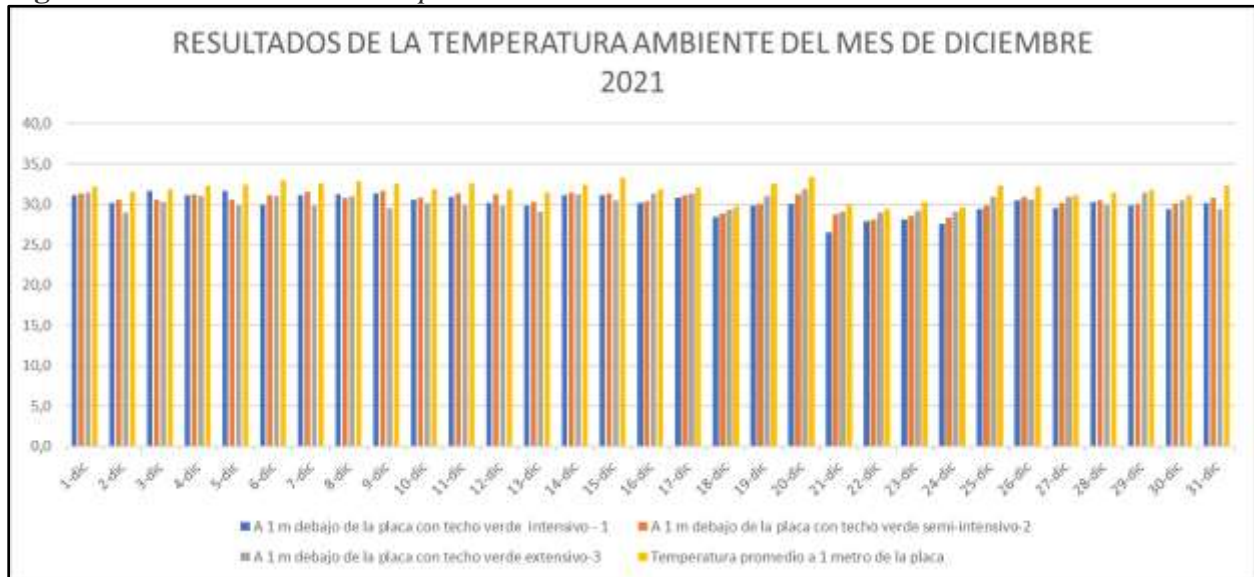
En la figura 21, en este mes el techo verde intensivo pudo reducir la humedad en un 24%, el verde semi intensivo 19% y el extensivo de 22%. Sin embargo, el extensivo se mantuvo en un rango de 15 a 29%, el semi intensivo de 17 a 30% e intensivo de 19 a 32%.

Figura 23. Valores de sensación térmica por calor noviembre de 2021.



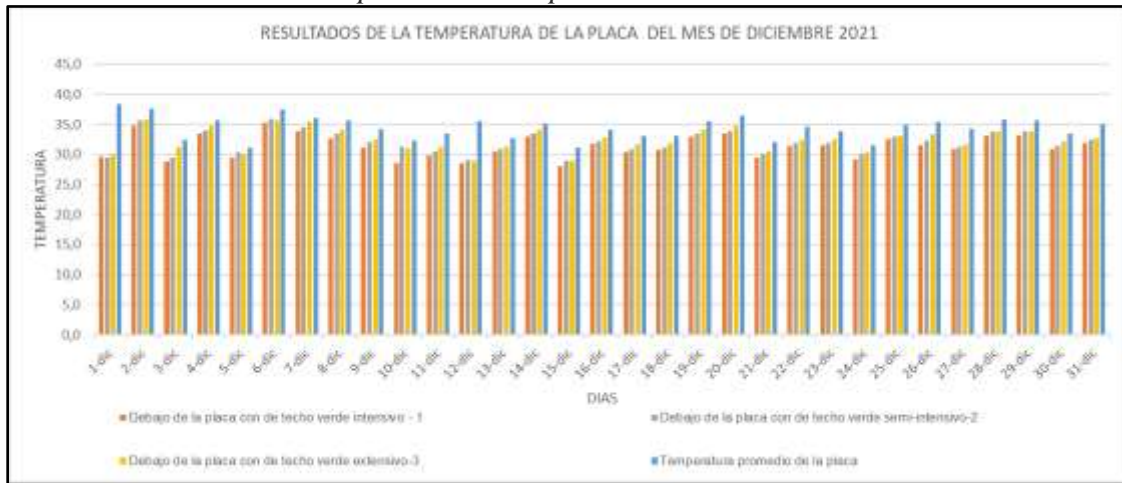
En figura 22, se puede observar que la placa sin techo verde se presentó 25 días de peligro y 2 de precaución extrema. Y el techo verde intensivo, logró obtener 7 días en el rango de precaución, 22 en el rango de precaución extrema y 1 en peligro. El techo verde semi intensivo, dio como resultado 2 días en precaución, 26 en precaución extrema y 2 en peligro. Y el techo verde extensivo, dio como resultado 2 días en precaución, 25 en precaución extrema y 3 en peligro, considerando que, de acuerdo con los valores promedio todos se lograron trasladar a una ubicación favorable para los habitantes de la vivienda experimenta.

Figura 24. Resultados de la temperatura ambiente del mes de diciembre de 2021.



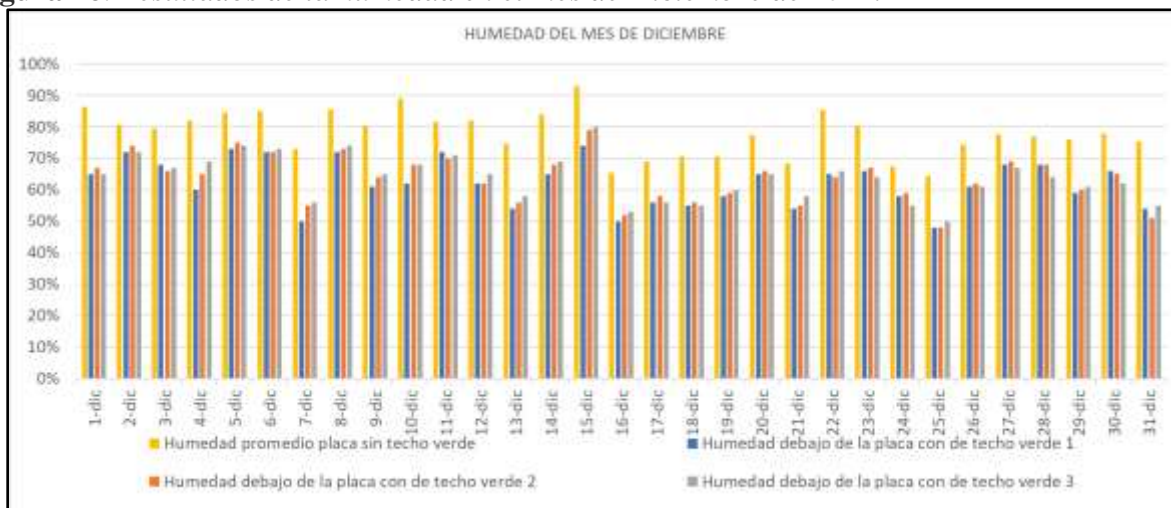
En la figura 23, el mes de diciembre se observó que el techo verde intensivo disminuyó en promedio 1.76 °C, el semi intensivo 1.37°C y el extensivo 1.54°C. Sin embargo, en este mes los rangos para cada modelo fueron de 0.20 a 3.5°C para el intensivo, de 0.7 a 2.5 °C para el semi intensivo y de 0.27 a 3.07 °C en el extensivo.

Figura 25. Resultados de la temperatura de la placa en el mes de diciembre de 2021.



En la figura 24, se observó una disminución significativa en la temperatura de la placa con todos los modelos en un día específico, 1 de diciembre, ya que el intensivo redujo 8.8°C, el semi intensivo 9°C y el extensivo de 8.3°C. Por otro lado, en promedio, cada techo disminuye, 3.1°C el intensivo, 2.4°C, semi intensivo, y 2°C en extensivo.

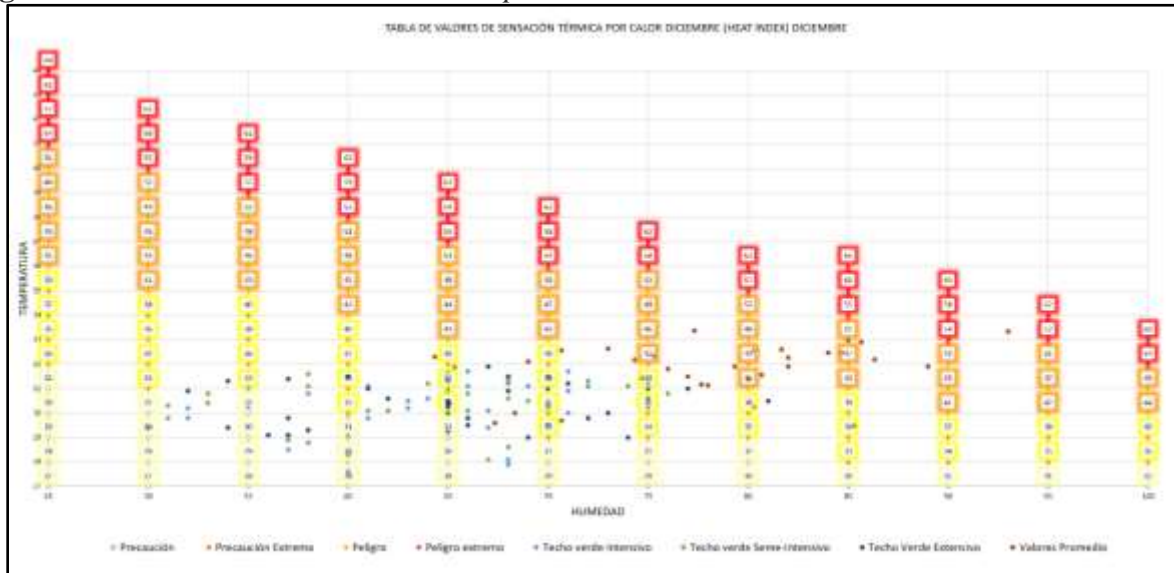
Figura 26. Resultados de la humedad en el mes de Diciembre de 2021.



En la figura 25, se puede observar que, en el mes de diciembre, el techo verde intensivo mantuvo una reducción promedio de 16%, el semi intensivo de 14% y el extensivo de 14%. Sin

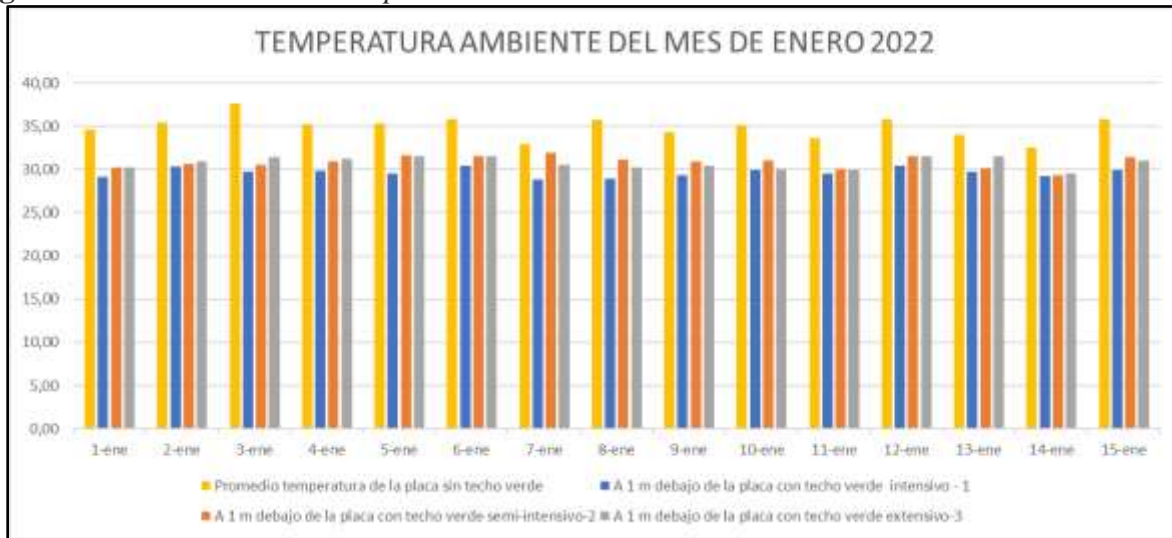
embargo, se presentaron días como el 10 de diciembre que el techo intensivo redujo un 27 %, el día 31 el semi intensivo de 4% redujo 24% y el 1 y 10 de diciembre el extensivo redujo el 21%.

Figura 27. Valores de sensación térmica por calor de Diciembre de 2021.



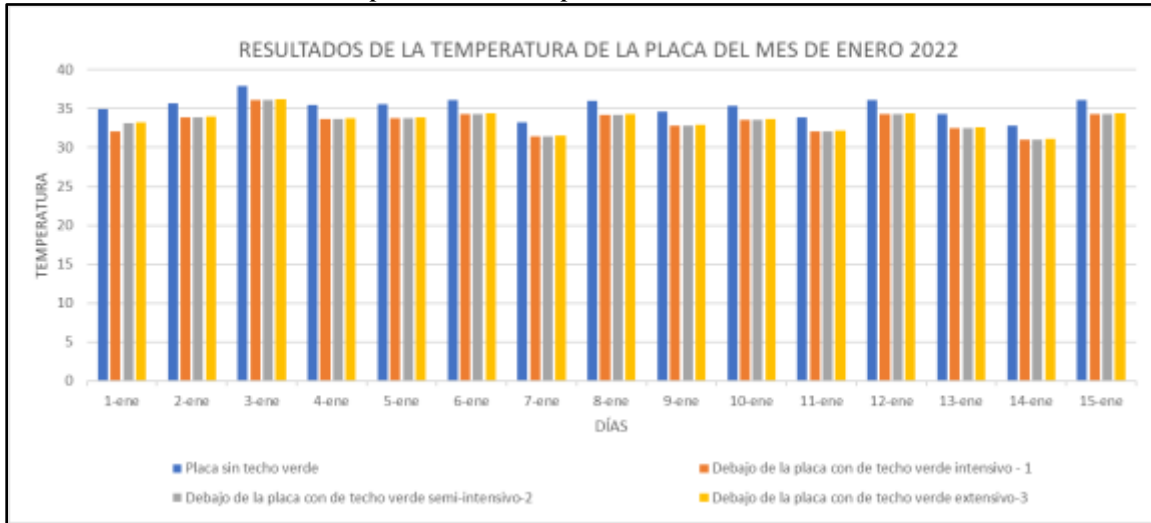
En la figura 26, en el mes de diciembre se observó que los techos verdes presentaron un mejor rendimiento al momento de disminuir la sensación térmica, ya que se tuvo en cuenta que, de los 31 días en el sector de la casa sin techo verde, se obtuvo un (1) resultado alarmante de peligro extremo, 23 fueron de peligro y 7 de precaución extrema, pero los modelos de techo intensivo y extensivo lograron mantener los rangos de precaución extrema y precaución. Con valores de 23 y 8 para el primero, y 25 y 6, respectivamente. El modelo semi-intensivo, dio como resultado, 1 día de peligro, 23 días en rangos de precaución extrema y 7 de precaución. En el día de peligro extremo, el 15 de diciembre, los habitantes de la casa afirmaron que sentían el cambio de la temperatura en cada parte de la casa, dado el confort generado por los modelos implementados

Figura 28. Resultados de la temperatura ambiente del mes de Enero de 2022.



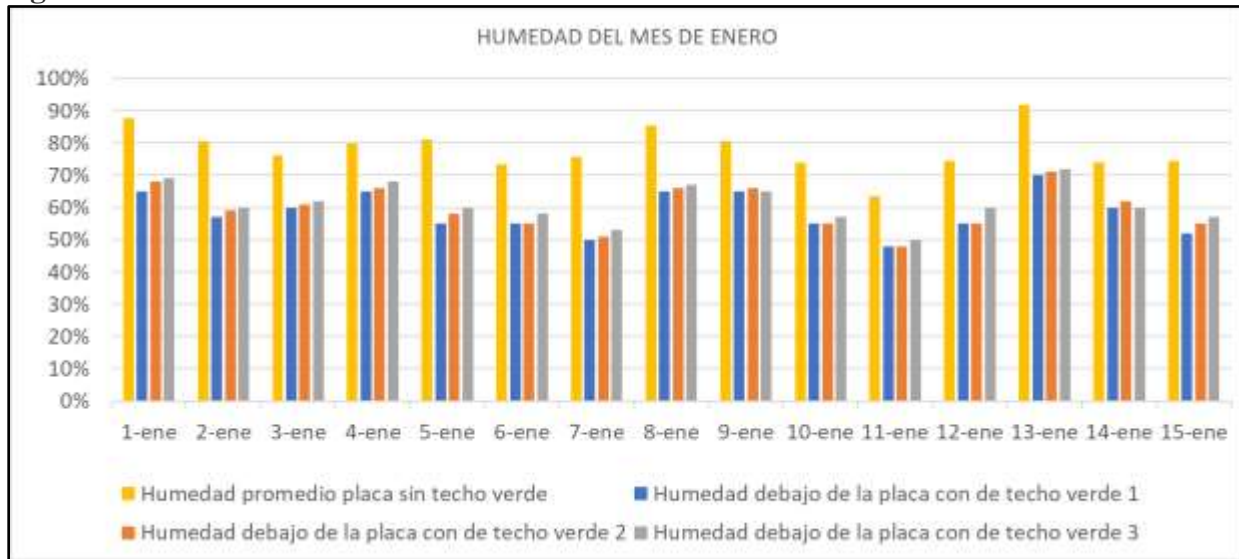
En la figura 27, el mes de enero se estableció un análisis más corto (15 días) dada la disponibilidad en la toma de datos, se observó que el techo verde intensivo disminuyó en promedio 5.31 °C, el semi intensivo 4.11°C y el extensivo 4.19°C. Sin embargo, en este mes los rangos para cada modelo fueron de 3.33°C a 7.93°C para el intensivo, de 1.03°C a 7.13°C para el semi intensivo y de 2.43°C a 6.23°C en el extensivo, siendo este el mes que tiene más amplio el rango en cada modelo.

Figura 29. Resultados de la temperatura de la placa en el mes de Enero de 2022.



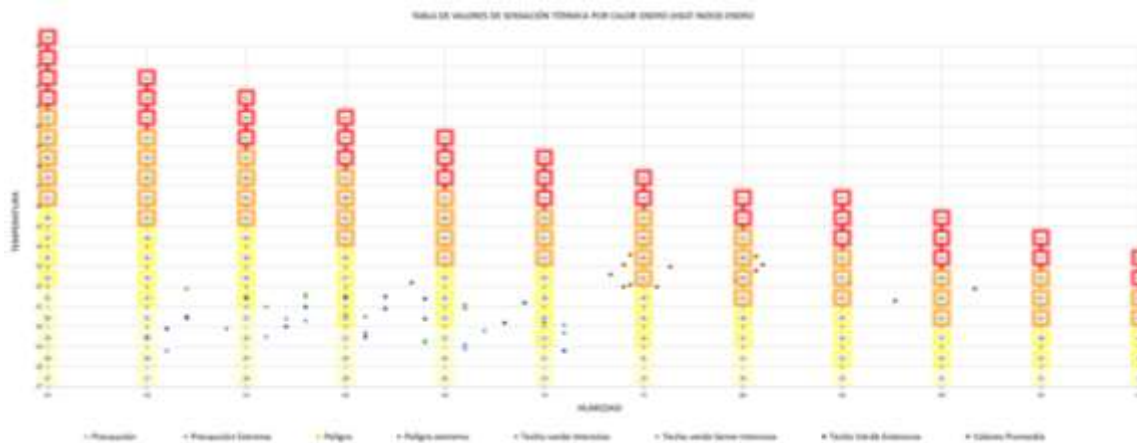
En la figura 28, se observó una disminución progresiva en base a la temperatura de cada día, dado que la planta se estableció correctamente en cada uno de los modelos, se logró una homogeneidad en los resultados de la temperatura de la placa con todos los modelos por día, ya que el intensivo redujo 2.2°C, el semi-intensivo 2°C y el extensivo de 1.9°C, respectivamente, aunque predominando el techo intensivo en cuanto a la reducción en la temperatura inmediata de la placa.

Figura 30. Resultados de la humedad en el mes de Enero de 2022.



Respecto a la figura 29, en este mes el techo verde intensivo pudo reducir la humedad en un 19.7%, el verde semi intensivo 18.4% y el extensivo de 16.9%. Sin embargo, el modelo intensivo mantiene el mayor promedio de reducción en un rango de 14 a 26%, el semi intensivo de 12 a 24% y el extensivo de 11 a 22%, demostrando la reducción significativa que representa el modelo intensivo respecto a la humedad.

Figura 31. Valores de sensación térmica por calor de Enero de 2022



Según los datos obtenidos y reflejados en la figura 30, en la gráfica de Heat Index, la cual es una interpolación de humedad y temperatura, se encontró que de los 15 días analizados del mes de enero, se exceden los límites del confort térmico con creces, de los cuales 14 días se encontraron en peligro, donde la implementación de los techos verdes generó una reducción excepcional de la sensación térmica, todos los valores salvo uno, que se encuentra en la franja de peligro, de acuerdo a la gama de colores de los modelos establecidos de cubiertas verdes, estos llevan dichas interpolaciones a niveles normales, inclusive, el techo verde intensivo logra establecer la gran mayoría de los valores que se encontraban en peligro, en rangos de solo precaución (6 días), el resto los disminuye a precaución extrema (9 días), en el modelo semi-intensivo y extensivo se logró la disminución de peligro a precaución extrema (14 días) salvo un valor que se redujo en mayor medida, ubicándose así en precaución, lo cual y de acuerdo a los datos tomados y analizados, representan una gran disminución en lo que respecta a la sensación térmica generada por la temperatura y la humedad del municipio de Cimitarra.

Tabla 1. *Reducción máxima de temperatura ambiente de cada modelo de techo verde implementado por cada mes*

Reducción máxima de temperatura ambiente por techo verde				
Mes	Intensivo	Semi-intensivo	Extensivo	Promedio
Sep.-Oct	4,20	2,90	3,17	3,42
Noviembre	3,90	3,00	2,70	3,2
Diciembre	3,50	2,50	3,07	3
Enero	4,20	2,70	3,10	3,33

En la tabla 1, se realiza una recopilación del valor de la máxima temperatura que logró reducir cada techo verde en cada mes evaluado.

6.1 Costo implementación techos verdes

El costo de implementación de un techo verde radica en los materiales y en las plantas a usar, dicho esto y dependiendo del techo que se vaya a construir, la inversión se puede recuperar dado el ahorro generado en el consumo de energía para aumentar el confort térmico y disminuir la brecha de la sensación térmica entre el interior y el exterior del sitio de implementación.

Los precios pueden variar de acuerdo a la cantidad de techo verde a realizar, sale más costoso construir techos individuales, que hacer un techo a gran escala teniendo en consideración el modelo a realizar y el tipo de madera usada.

Tabla 2. Costo individual de cada uno de los materiales para implementación techos verdes en Cimitarra

Tipo de techo		Intensivo 25 cm M2		Semi - intensivo 15 cm M2		Extensivo 5 cm M2	
Producto	Lugar de adquisición	Precio UN	Total	Precio UN	Total	Precio UN	Total
Madera para cajón (diseño y corte)	Homecenter	30000	30000	30000	30000	20000	20000
Tornillos	Homecenter	3000	33000	3000	33000	3000	23000
Recubrimiento asfáltico "membrana"	Homecenter	30000	63000	30000	63000	30000	53000
Abono	Cimitarra	15000	78000	10000	73000	5000	58000
*Plantas lengua de suegra "sansevieria"	Cimitarra	0	78000	0	73000	0	58000

Nota. *Las plantas fueron cultivadas previamente, por ende, no tienen costo alguno, se reprodujeron solas.

Todos y cada uno de los modelos tienen un costo establecido en el valor nominal representado en la tabla, así el modelo intensivo tiene un costo de 78000 COP por metro cuadrado, fue el más costoso debido a que requiere más fertilizante por su espesor, el modelo semi-intensivo tiene un costo de 73000 COP por metro cuadrado y el modelo extensivo tiene un costo de 58000 COP por metro cuadrado, aproximadamente, la reducción del costo está en las medidas del cajón, es más pequeño y la cantidad de abono que se usó.

6.2 Comparación costo-beneficio con techos comerciales

6.2.1 Techos verdes comerciales ofrecidos en Colombia

Existen dos empresas en Colombia, situadas en Bogotá, líderes en la implementación, construcción y ejecución de techos verdes paredes verdes y jardines en vertical. estas son cubiertas verdes Bogotá y Semper Green, ambos con propuestas muy innovadoras y además poco económicas donde argumentan que los techos verdes se ha convertido en una solución ideal que ofrecen objetivos ambientales y sociales, funcionando como un bioretenedor de agua, regulando la temperatura y generando el aislamiento acústico.

Teniendo en consideración todas las ventajas que poseen los techos verdes, en primera instancia se analizaron los productos que ofrecen dichas empresas a el público en general, cubiertas verdes Bogotá en su repertorio más económico de techos verdes nos da un costo aproximado de \$300000 por metro cuadrado construido de techo verde, y Semper Green según su producto denominado por ellos tapete verde nos da un costo aproximado de \$350000 por metro de área ocupado.

7. Discusión

El techo verde funciona en la medida que parte de la radiación es absorbida por la hoja de la planta, y la disipa como calor sensible en la superficie del suelo; la otra parte de la radiación se transmite por conducción a través del sustrato [56]. Por lo que se observó, en las ocasiones en las que se presentaron fuertes lluvias, se ocasionó una reducción significativa de la temperatura de la placa debido al cambio del contenido de agua del sustrato, tal como se puede observar en la figura 16, en donde la temperatura de la placa presentó una reducción de 5.4°C el día 30 de

septiembre de 2021, ya que la noche del 29 de septiembre de 2021 se presentó una lluvia de alta intensidad. De igual manera, se observó que el día 8 de octubre de 2021 (ver figura 17), hay una gran diferencia en la humedad relativa debajo del techo verde, ya que el sustrato tuvo una alta ganancia de agua debido a las fuertes lluvias de los días anteriores, además de la alta nubosidad. En estos casos, se plantea en base a lo expuesto en el artículo “Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs”, que la evapotranspiración fue el factor determinante, ya que, en este artículo, se logró determinar que la superficie con saturación de 10% presentaba una temperatura máxima de 50°C y con saturación de 50% se presentó una temperatura de 35°C. También demostraron que la temperatura ambiente es menor cuando la saturación del sustrato es alta. Por tal razón, es razonable la diferencia de 3.5°C en la temperatura ambiente de los días 30 de septiembre y 14 de octubre, a pesar de que cuentan con la misma temperatura y humedad exterior (ver figura 15) [57].

Por otro lado, en la toma de datos del 29 de septiembre al 31 de octubre de 2021 (ver figura 18) se observó que, de los 33 días, 28 días presentaron una sensación térmica de la categoría de peligro y 4 días en precaución extrema. Esta situación sitúa en riesgo a los habitantes de la vivienda. Pero en el sector del techo verde intensivo logró cambiar la sensación de peligro por la de precaución extrema y de precaución; este efecto no se mantuvo en el mes de noviembre (ver figura 22), ya que presentó un día con *sensación de peligro*, pero si se mantuvo en el mes de diciembre y enero (ver figura 26). Los modelos semi intensivos y extensivos, lograron cambiar durante 27 y 26 días respectivamente, la sensación de peligro, pero, no garantizaron eliminarla siempre, tal como se puede observar en la figura 22 y 26. En la figura 22, la cual corresponde a la toma de datos de noviembre, se puede observar que el extensivo tiene 3

días en sensación de peligro y el semi intensivo 2. Esta situación demuestra, que el techo verde intensivo es el de mayor rendimiento para garantizar la sensación térmica.

En la tabla 1, se observó que en el primer mes de prueba (septiembre-octubre) el modelo de mayor rendimiento corresponde al intensivo, con una reducción de 4.2 °C, este modelo se mantuvo como el más eficiente en la reducción de la temperatura por contacto en todo el periodo de recolección de datos, ya que el intensivo presentaba mayor altura de sustrato respecto a los modelos semi intensivos y extensivos, lo que le permitió mantener un mayor contenido de humedad en el sustrato y por ende reducir la transferencia de calor. Esto fue demostrado en el artículo “Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs”, en donde analizaron el mecanismo de transferencia de calor y masa a través de un techo verde, en el cual, las variaciones del balance hídrico impactaron las propiedades físicas del sustrato y en la capacidad de evapotranspiración del mismo, lo que implicó una influencia del flujo de calor, mostrando una diferencia de 25 °C entre los techos verdes con un medio de cultivo seco y un medio de cultivo saturado [57].

Sin embargo, se observó que el rendimiento de los techos verdes disminuyó en el segundo mes. Se plantea la teoría que las plantas se estresaron, por el cambio de la irradiación, la temperatura y de sustrato [58]. Esto provocó la muerte de un porcentaje de las mismas, afectando la funcionalidad de los techos verdes, debido a esto, se requirió plantar nuevamente una cantidad de vegetación en los modelos.

Tabla 3. Área ocupada por los modelos de techo verde

Techo verde implementado	Zona	Área de la zona (m ²)	Área del techo verde (m ²)	Con techo verde (%)	Sin techo verde (%)
Intensivo	Comedor	5,6	1	17,9	82,1
Semi intensivo	Sala	6,4	1	15,5	84,5
Extensivo	Habitación	6,9	1	14,5	85,5

En investigaciones se ha observado que los techos verdes tienen como obstáculo el mantenimiento y la ocupación de los espacios [59]. Pero, en la tabla 3, se puede observar el porcentaje de techo verde que participa en la reducción de la temperatura de cada espacio. El intensivo representa el 17.8%, el semi intensivo el 15.53% y el extensivo el 14.49%. Y la placa, tiene un área de 31.2 m², es decir que los techos verdes solo representan el 9.6% de su ocupación, lo que permite, mantener una zona social o de lavado en la placa. Además, durante el periodo de ejecución de los modelos, no se requirió de mayor mantenimiento, riego y de suministro de sustrato.

En Colombia se han implementado muchos conceptos techos o cubiertas verdes ecológicas, que han servido como sustento para tesis y trabajos de grado de muchos estudiantes de diversas ingenierías, que han realizado un aporte considerable para la investigación.

En primera instancia se tiene en consideración una tesis denominada “Aporte los escudos verdes han confort térmico en viviendas de la ciudad de Medellín”, el cual arrojó una información muy importante y es que en cualquier tipo de vivienda se puede implementar un techo verde de bajo costo y de alto impacto, en esta tesis solo analizan el impacto que tenían los techos verdes que la misma comunidad había implementado de una forma sofisticada en el control de esorrentías en dichas viviendas. [28]

De la misma forma, la tesis titulada “Techos verdes en viviendas de estrato 1 aplicada al barrio Yomasa”, en la ciudad de Bogotá donde se implementó un techo verde realizado con materiales reciclables que tuvo un alto impacto en dichas viviendas y donde se argumenta que el costo por metro de cada una de los techos construidos no supera los 45000 COP, además que los gastos que tienen dichos techos verdes, su soporte, la tierra, las plantas, y el sistema de riego

implementado, donde además es muy interesante la propuesta ofrecida, un techo verde no solo tiene efectos energético sino que también puede ser auto sostenible para las personas que habitan la vivienda donde se implementa el techo verde, dado que el diseño de un techo verde de tipo huerta con un área de 24 m² donde el total fue 1100000 COP, dando así sustento alimenticio[60].

En la propuesta de la “guía implementación de techos verdes en la ciudad de Chiquinquirá”, una tesis de la Universidad Santo Tomás, dichos investigadores concluyeron que no es necesario un alto poder adquisitivo o económico para implementar un techo verde, se muestra cómo ejecutar un techo verde con materiales convencionales no económicos con pero que aun así no supera un valor de 100000\$ por metro cuadrado, y generando así los mismos efectos de cualquier otro sistema de techo verde [30].

La propuesta denominada “Implementación de un techo verde para la reducción de la temperatura interior en una vivienda de Villavicencio”, donde se implementó un sistema de cubiertas verdes botellas de plástico ecológica y de alto impacto, donde el metro cuadrado construido no supera los 25000\$, sin sacrificar ninguno de los beneficios que los techos verdes generan [29].

De acuerdo con la investigación realizada, el modelo de techo verde establecido en esta tesis, los modelos a usar y el precio por metro cuadrado se establece la siguiente tabla comparativa entre los modelos consultados (comerciales y artesanales), de una forma que se evidencie la comparación costo-eficiencia por metro cuadrado implementado.

Tabla 4. *Comparación costo-eficiencia*

Techo verde	Costo (COP)	Eficiencia
Cubiertas verdes bgt (intensiva)	300000	Depende el modelo (1°C) Aprox.
Sempergreen (intensiva)	350000	Depende el modelo (1°C) Aprox.
Yomasa (ligera)	45000	Alta (>2°C)
Chiquinquirá (intensivo)	100000	Alta (>2C)

Techo verde	Costo (COP)	Eficiencia
Villavicencio (ecológica)	25000	Alta (>2.5°C)
Techo verde implementado en esta tesis (Cimitarra)		
Intensivo	78000	Alta (>4°C)
Semi intensivo	73000	Alta (>3°C)
Extensivo	58000	Alta (>2°C)

Se mencionan los beneficios que se presentan al implementar de manera adecuada la correcta construcción de los techos, puesto que los materiales usados para su ejecución se pueden obtener en cualquier lugar, enfocándose más en la efectividad energética que estos aportan (a largo plazo), mientras que los autores consultados se enfocan más en la correcta construcción y ejecución de cada uno de los techos verdes, donde argumentan que no es el material con el que se construyan si no la correcta ejecución de la construcción de los mismos lo que se centra en la efectividad energética de los techos verdes implementados, además de otros beneficios generados.

Tabla 5. Modelo Óptimo

Techo verde implementado en esta tesis (Cimitarra)		
Techo Verde	Costo \$	Eficiencia
Intensivo	78000	Alta (>4°C)
Semi intensivo	73000	Alta (>3°C)
Extensivo	58000	Alta (>2°C)

Para las condiciones típicas del municipio de Cimitarra (temperatura promedio, el tipo de vivienda, además del clima que presenta la región), teniendo en cuenta las variables analizadas y considerando la eficiencia del techo verde, la reducción significativa de la temperatura y con ello la sensación térmica, en relación al costo de implementación de cada uno de los techos verdes, el modelo a implementar analizando las variables anteriormente mencionadas es el intensivo, dado que representa la eficiencia más alta sin incrementar el costo de implementación.

Puesto que no existe una disminución del consumo energético, se necesitaría establecer otro modelo de implementación con condiciones diferentes (por ejemplo, una mayor cobertura de área en la estructura) para cumplir con todos los propósitos de un techo verde (reducción en la sensación térmica y el consumo energético) resultados que son los más significativos a la hora de buscar una reducción energética apreciable.

Análisis extensión de cubierta : Para el caso del presente estudio, los modelos de techos verdes implementados representaron un porcentaje reducido en la extensión total del hogar equivalente al 5% en relación con el total del área superficial de la vivienda. Se considera que, al ser un porcentaje reducido respecto al área total de la vivienda, se establece la posibilidad para una futura investigación de llegar al 30 % de cobertura verde, donde se pueda cubrir una mayor parte del total construido de la placa y así mejorar la eficiencia en lo que respecta a la disminución de la temperatura, la reducción en la sensación térmica y, por tanto, la calidad de vida de los habitantes de la vivienda. Se establece también la hipótesis de que, al implementar un porcentaje mayor sobre las cubiertas de las habitaciones, se lograría reducir el uso de electrodomésticos (abanicos, ventiladores, aire acondicionado) los cuales representan un consumo significativo de la energía eléctrica del hogar. Esta reducción en el uso de los electrodomésticos mencionados aumentaría la eficiencia energética, amenizando los ambientes de las viviendas donde se implementan los techos verdes. De acuerdo con Trujillo [61], para medir la reducción del consumo se deben establecer dos viviendas con las mismas características, una de ellas con la implementación de una cubierta verde y la otra sin cubierta. Posteriormente monitorear cada una de ellas con medidores especializados, y de esta manera establecer la reducción en el consumo energético teniendo las mismas características en la estructura.

Análisis del mantenimiento: Una cubierta verde es una organización paisajística, que normalmente está encima del suelo sobre las losas o tejados de las viviendas, todo depende de los tipos de plantas escogidas, siendo este el único factor relevante a tener en cuenta a la hora de hablar específicamente del mantenimiento del techo verde; si se realiza de forma correcta la implementación del modelo propuesto, con su impermeabilización y las plantas idóneas según las condiciones climatológicas de la zona, esto, se podría llegar a garantizar un mantenimiento mínimo o casi nulo de la cubierta, exceptuando la adecuación y adaptación de la planta (proceso inicial). Esto a su vez asegura los mejores resultados cuando se habla de una reducción significativa de la sensación térmica establecida en el espacio o la vivienda, dependiendo de que tan grande sea el techo verde [56].

Para ejemplificar lo mencionado anteriormente, en la experiencia de la presente investigación se presentó un caso típico de estrés generado por la modificación del hábitat inicial de la planta, en donde se generaron modificaciones abruptas de variables como la radiación solar, la temperatura y la humedad sobre la planta. Dadas las condiciones de siembra y adaptación se establecieron los siguientes aspectos a tener en cuenta:

Extraer la planta cuidadosamente de su sitio de siembra, cuidando principalmente la raíz para su correcto traslado.

Mantener húmedas las plantas mientras se siembran nuevamente, promoviendo así una baja pérdida de humedad en ellas.

El abono o fertilizante debe, preferiblemente estar mezclado con suelo del sitio de extracción de las plantas, para que su adaptación sea más sencilla.

Cuando se vayan a sembrar las plantas en el techo verde, se deben tener en cuenta las horas con baja radiación solar. Esto es para garantizar la supervivencia de las plantas en el

momento de la adaptación. Así mismo, se deben regar en horas de la noche para evitar quemar las plantas.

Después de dos semanas de establecer la siembra de las plantas, se debe revisar si sufrieron alguna clase de estrés (se rompieron, se secaron, o se pudrieron). Estas se deben extraer para luego sembrar plantas de nuevo en los espacios que quedaron después de la extracción de las plantas enfermas o afectadas. También se puede esperar a que la misma especie repueble cada uno de los espacios, con las características de adaptación que ya tomaron las plantas.

Análisis del consumo energético: En el apartado del consumo energético, se tomaron las mediciones respectivas de los consumos en los meses de implementación del techo y se comparó con meses anteriores (recibos de consumo ESSA) pero no se pudo establecer una reducción significativa, a pesar de que en el mes de octubre llegó a ser de 112 kWh, teniendo un promedio de 136 kWh en el rango de 3 meses anteriores y posteriores a dicha toma, y en diciembre fue de 149 kWh, lo que en sí, no representa una disminución en el consumo energético, a pesar que se logró una disminución de la sensación térmica en el hogar, las costumbres de los habitantes de usar los electrodomésticos de mayor consumo los cuales son los térmicos (abanicos o ventiladores), no se vieron reducidos o llevados a cero en su uso [61]. (de lo anterior surge la hipótesis que para llegar a prescindir de dichos electrodomésticos y lograr un mayor confort térmico se debe implementar una mayor extensión de cubierta verde, además de su uso a lo largo del tiempo y la permanencia de dicha cubierta), teniendo en cuenta que según un estudio de la universidad nacional de Colombia, para lograr el 50% esperado en la reducción del consumo eléctrico de una cubierta verde, se tienen que considerar parámetros tales como la altura del edificio, el tipo de refrigeración del edificio, entre otros, además que las estructuras verdes solo aíslan el último piso de cada edificación [11].

8. Conclusiones

En este trabajo de investigación, se implementaron tres modelos de techos verdes de elaboración práctica, por tal razón, se hizo uso de la madera como medio de contención y del manto asfáltico como medio de protección de la placa. De esta manera, no se requirieron de herramientas de manejo complejo, logrando que este modelo fuera de la menor complejidad posible, disminuyendo así tiempo y costos para su elaboración.

El manto asfáltico fue eficiente para proteger la placa de las raíces de las plantas y de la humedad.

Se observó que la planta seleccionada, lengua de suegra (*Sansevieria Trifasciata*) no requiere de riego y es resistente a altas temperaturas. Sin embargo, esta alternativa requiere de cuidados en el primer mes, ya que el cambio del sustrato y de temperatura afectó la vida de algunas de ellas.

Se implementó un porcentaje de techo verde de 14.49 % para el semi intensivo, 15.53% para el extensivo y 17.8 % para el intensivo respecto a la zona de la vivienda que se pretendía aclimatar. Sin embargo, esta área de techo verde no fue suficiente para garantizar un confort térmico agradable para los habitantes de la vivienda.

Se mejoró la sensación térmica con cada modelo de techo verde obteniendo una reducción máxima de la temperatura ambiente de 4.2 °C con el intensivo, 3°C con el semi intensivo y 3.17 °C con el extensivo, se determinó que, para el municipio de Cimitarra, el modelo óptimo de techo verde es el intensivo implementado con la planta lengua de suegra.

Se evidenció que la altura del sustrato es el factor más importante en la reducción de la temperatura ya que los modelos redujeron cada uno diferentes rangos de temperatura a pesar de que se instalaron bajo las mismas condiciones. Esta diferencia radica en que cada modelo tiene

una capacidad de retención de agua diferente debido a la altura del sustrato. Esta capacidad de almacenamiento de humedad es la que permitió que el techo verde intensivo redujera 4.2 °C. De igual manera, se concluye que es gracias a esta capacidad, que los techos verdes redujeran diferentes temperaturas en condiciones climáticas similares. Por tal razón, se determinó que la evapotranspiración del sustrato es fundamental para reducir la temperatura superficial y por esto, se sugiere que, en periodos largos de sequía la cubierta debe regarse para así aprovechar el efecto de enfriamiento pasivo.

No se observó una disminución en el uso de aparatos de enfriamiento. A pesar de que de los techos verde redujeron la temperatura interior del hogar, no se redujo el consumo energético en la vivienda. Se requiere que los techos verdes garanticen el confort térmico para no recurrir a estos aparatos.

La implementación de un techo verde es económica y considerando que se obtuvo un buen rendimiento en la disminución de la temperatura, se concluye que, aunque no se disminuyó el consumo energético, esta tecnología presenta una relación beneficio/costo favorable. Además, este modelo no presentó obstáculos para su mantenimiento y tampoco requirió de un espacio amplio para su implementación, lo que rompe el paradigma de que tener un techo verde es costoso de implementar, de mantener y que requiere de espacios amplios.

Considerando que los techos verdes fueron construidos siguiendo un prototipo ligero para facilitar su instalación, se tuvo en cuenta su peso como carga muerta sobre la vivienda. Sin embargo, debido a que el modelo ideal de techo verde requiere un mantenimiento mínimo y la capacidad de retención de agua del sustrato y la capacidad de absorción de las plantas no se tuvieron en cuenta al cargar la losa como peso estructural para estos modelos específicos.

Referencias

- [1] C. Vera, R. Rodríguez Tornquist, A. Sorensson, J. Rivera, L. Ruiz y A. Di Luca, “Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación,” Agosto 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=_WIJfJ_WcCc.
- [2] Gobierno de Aragon, “El cambio climático,” 21 01 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.aragon.es/-/el-cambio-climatico#anchor2>.
- [3] L. Fernández , R. Yurivilca y L. Minoja, 11 02 2019. [En línea]. Disponible: <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/edificios-vs-cambio-climatico-construyendo-adaptacion-y-mitigacion/>.
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, “Climate Change 2022 Impacts, Adaptation and Vulnerability,” 2022.
- [5] Naciones Unidas, “Cambio climático y medioambiente,” 14 Enero 2021. [En línea]. Disponible: <https://news.un.org/es/story/2021/01/1486482>.
- [6] Naciones Unidas , “NACIONES UNIDAS,” s.f. Un. [En línea]. Disponible: <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>.
- [7] N. Oviedo , Estudio de la Atenuacion de la Escorrentia en Techos Verdes en Altos de Cazuca, Soacha, Bogota: PUJ, 2012. [En línea]. Disponible: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/11144>.
- [8] J. Aldana Domínguez, “Hacia una planificación socio-ecológica del Área Metropolitana de Barranquilla (Colombia): integrando la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas para el bienestar humano.,” Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de ciencias, Madrid, 2018. [En línea]. Disponible:

- <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=206238>.
- [9] ZinCo, S.f. [En línea]. Disponible: <https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/>.
- [10] G. Guerrero y P. Gámez , “Evaluacion y prediseño de cubiertas verdes para la reutilizacion de aguas lluvias en la universidad militar nueva granada: una perspectiva de la universidad saludable.,” Universidad militar Nueva Granada, Bogota, 2014. [En línea]. Disponible: <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/11478>.
- [11] M. Garcia y J. Vega , “Una herramienta viable para la gestion ambiental en el sector hotelero del Rodadero, Santa Marta,” *Gestion y Ambiente*, vol. 15, n° 1, pp. 91-104, 2012. [En línea]. Disponible: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/30820>.
- [12] Ministerio de relaciones exteriores Bolivia, “Conferencia mundial de los pueblos sobre el cambio climático y los derechos de la madre tierra: discursos y documentos seleccionados,” Bolivia, 2009. [En línea]. Disponible: <https://www.cancilleria.gob.bo/webmre/sites/default/files/libros/Cmpcc%20discursos%20y%20documentos%20seleccionados.pdf>.
- [13] M. Rhodes, “Implementación de un modelo de techo verde y su beneficio,” 2012. [En línea]. Disponible: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/53937270/RhodesValbuenaMateode2012-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1628796027&Signature=AOsZeSxhS4MsQjesArXisuTb1LuaBbnkKgqW~femrAM4ABjmLwlY8L0zwtWANX~Ev4k0HGuL8fGrQVHbnkUq~hG4ZmxKj3w kfQwCSocaYaALkBv7dc9a8aNEW6LcjiA1IZ>.

- [14] H. Imran, J. Kala, A. Ng y S. Munthukumaran, “Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 197, pp. 393-405, Octubre 2018. [En línea]. Disponible: <https://www-sciencedirect-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0959652618318298>.
- [15] ONU, “Objetivo 11:Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.,” *ONU*, pp. 24-25, 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.un.org/es/chronicle/article/objetivo-11-las-ciudades-desempenaran-un-papel-importante-en-la-consecucion-de-los-objetivos-de>.
- [16] H. Herath, R. Halwatura y G. Jayasinghe, “Modeling a Tropical Urban Context with Green Walls and Green Roofs as an Urban Heat Island Adaptation Strategy,” *Procedia Engineering*, vol. 212, pp. 691-698, 2018. [En línea]. Disponible: <https://www-sciencedirect-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S1877705818301073>.
- [17] R. Giridharan y R. Emmanuel, “The impact of urban compactness, comfort strategies and energy consumption on tropical urban heat island intensity: A review,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 40, pp. 677-687, 2018. [En línea]. Disponible: <https://www-sciencedirect-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S2210670717313446>.
- [18] R. Tan, D. Wijaya y H. Khoo, “LCI (Life cycle inventory) analysis of fuels and electricity generation in Singapore,” *Energy*, vol. 35, n° 12, pp. 4910-4916, 2010. [En línea]. Disponible:

- [19] J. Yang, D. Mohan, A. Pyrgou, A. Chong, M. Santamouris, D. Kolokotsa y S. Eang, “Green and cool roofs’ urban heat island mitigation potential in tropical climate,” *Solar Energy*, vol. 173, pp. 597-609, 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X18307667>.
- [20] D. Morau, T. Libelle y F. Garde, “Performance Evaluation of Green Roof for Thermal Protection of Buildings In Reunion Island,” *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 1008-1016, 2012. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1047>.
- [21] S. Saiz, C. Kennedy, B. Bass y K. Pressnail, “Comparative Life Cycle Assessment of Standard and Green Roofs,” *Environmental Science & Technology*, vol. 40, pp. 4312-4316, 2006. [En línea]. Disponible: <https://pubs.acs.org/toc/esthag/40/1>.
- [22] M. Santamouris, “Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments,” *Solar Energy*, vol. 103, pp. 682-703, 2014. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X12002447>.
- [23] P. Bevilacqua, D. Mazzeo, R. Bruno y N. Arcuri, “Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area,” *Energy and Buildings*, vol. 122, pp. 63-79, 15 Junio 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778816302183>.
- [24] L. Zhou, Q. Wang, Y. Li, M. Liu y R. Wang, “Green roof simulation with a seasonally variable leaf area index,” *Energy and Buildings*, vol. 174, pp. 156-167, 1 septiembre 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817325409>.

- [25] N. Cortés, “Evaluación experimental de la esorrentía y la evapotranspiración en techos verdes,” Bogotá, 2019. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77470>.
- [26] S. Zielinski, A. García y C. Vega, “¿Una herramienta viable para la gestión ambiental en el sector hotelero del Rodadero, Santa Marta?,” *Gestión y Ambiente*, pp. 91-104, 2012. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169424101008.pdf>.
- [27] F. Arango y D. Guevara, Aporte de los escudos verdes al confort térmico en viviendas VIS en la ciudad de Medellín., Envigado: Universidad EIA, 2019. [En línea]. Disponible: <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/2516>.
- [28] C. García, Implementación de un techo verde para la reducción de temperatura al interior de una vivienda en el municipio de Villavicencio, Meta., Villavicencio: Universidad Santo Tomás, 2020. [En línea]. Disponible: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/30258/2020carlosgarcia.pdf?sequence=9&isAllowed=y>.
- [29] W. A. Espitia y P. Camacho Quevedo, Propuesta de guía para la implementación de techos verdes en la ciudad de Chiquinquirá (Boyacá), Chiquinquirá: Universidad Santo Tomás, 2020. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/11634/31313>.
- [30] M. F. Benavides, “Propuesta del uso de techos verdes en el sector hotelero como estrategia de ecoinnovación en la ciudad de Bogotá,” Fundación universidad de América, Bogotá, 2021. [En línea]. Disponible: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8738/1/50370-2021-2-GA.pdf>.
- [31] Secretaría de Ambiente de Bogotá, “Techos verdes y jardines verticales,” *Alcaldía*

- Mayor de Bogotá D.C.*, p. 29, 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/techos-verdes-y-jardines-verticales>.
- [32] Toxement, “Guía básica para la especificación de techo verde,” Tocancipá, 2020. [En línea]. Disponible: https://www.toxement.com.co/media/4791/guia_especificacion_techo_vegetal.pdf.
- [33] Secretaria Distrital de Ambiente, “Guía de techos verdes en Bogotá,” *Alcaldía de Bogotá*, p. 87, 2011. [En línea]. Disponible: <http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/techos-verdes-y-jardines-verticales>.
- [34] S. Vera y M. Ordenes, “Evaluación del desempeño energé-termico de una vivienda social en Chile, utilizando un programa de simulación energética de edificios.,” *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 17, n° 3, pp. 133-142, 2002. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uc.cl/xmlui/bitstream/handle/11534/10119/000356302.pdf>.
- [35] M. A. Solano Maya, “Estudio experimental y simulación numérica del comportamiento térmico de una vivienda residencial con techo verde ventilado.,” CENIDET, México, 2022. [En línea]. Disponible: file:///D:/Users/USER/Downloads/MM_Manuel_Alejandro_Solano_Maya_2022.pdf.
- [36] M. E. Sosa y G. Siem, “Manual de diseño para edificaciones energéticamente eficientes en el trópico,” Caracas, 2004. [En línea]. Disponible: https://www.fau.ucv.ve/idec/racionalidad/pdf/manual_energia.pdf
- [37] W. Ratih y C. Wahyu, “Field measurement on the model of green facade systems and its effect to building indoor thermal comfort.,” *Measurement*, Diciembre 2020. [En línea].

- Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108212>
- [38] Seiscubos, “Estándar ASHRAE 55,” 19 Agosto 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.seiscubos.com/conocimiento/estandar-ashrae-55>.
- [39] Agencia estatal de meteorología, “Tabla de sensacion termica por calor,” [En línea]. Disponible:https://www.aemet.es/documentos/es/conocerlas/montana/sensacion_termica/SensacionTermicaPorFrio-Calor-AEMET.pdf.
- [40] Instituto de Salud Global de Barcelona (ISGlobal), “Èrica Martínez: El efecto ‘Isla de calor’,” 3 Abril 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.isglobal.org/-/erica-martinez-el-efecto-isla-de-calor->.
- [41] Ideam, “Ley 164 de 1994,” 1994. [En línea]. Disponible: http://www.ideam.gov.co/documents/24024/26915/C_Users_JGomez_Documents_LEY+164+DE+1994.pdf/85833e1c-6ceb-4554-bce5-21e433329019
- [42] Lexbase, “Ley 629,” *Lex Base*, 2000. [En línea]. Disponible: <https://www.lexbase.co/lexdocs/indice/2000/10629de2000#:~:text=Ley%20629%20de%202000%20%2D%20Colombia,la%20Resoluci%C3%B3n%202733%20de%202010>.
- [43] Departamento Administrativo de la Función Pública , “Ley 788 de 2002,” p. 30, 2002.[En línea].Disponible:https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=7260.
- [44] C. Escallón y C. Villate, “La necesidad de un Código de Construcción Sostenible para Bogotá: ¿ Cómo construir una propuesta ?,” *DOSSIER*, p. 5, 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n41/n41a15.pdf>.

- [45] Concejo de Bogotá D.C, “Acuerdo 391-418 de 2009/ guía de techos verdes-res 619 2011,”2009.[En línea].Disponible:<https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/listados/tematica2.jsp?subtema=23531>.
- [46] Alcaldía de Bogotá, “Decreto 613 de 2015,” s.f. [En línea]. Disponible: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/listados/tematica2.jsp?subtema=23098>
- [47] Alcaldía Municipal De Cimitarra, “Información general,” 10 Mayo 2018. [En línea]. Disponible: <http://www.cimitarra-santander.gov.co/municipio/informacion-general>.
- [48] Alcaldía Municipal de Cimitarra, “Plan de desarrollo municipal 2020-2023,” 2020. [En línea]. Disponible: https://cimitarrasantander.micolombiadigital.gov.co/sites/cimitarrasantander/content/files/000212/10591_plan-de-desarrollo-municipal-20202023.pdf
- [49] Alcaldía Municipal Cimitarra, Santander, “Plan municipal de gestión del riesgo de desastres,” Cimitarra, 2012. [En línea]. Disponible: <https://images.app.goo.gl/UCemTUdeHv2gRy7L8>
- [50] M. Reza Seyedabadi, U. Eicker y S. Karimi, “Plant selection for green roofs and their impact on carbon sequestration and the building carbon footprint,” ScienceDirect, Montréal, Canada, 2021. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100119>
- [51] W. R. Rosas Villanueva, “Eficiencia de la planta Lengua de Suegra (*Sansevieria trifasciata*) para la fitoremediación de los gases interiores (CO, SO₂, NO₂) presentes en la I.E.P Isaac Newton, SJL-2018,” Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 2018. [En línea].

- Disponible:https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/26194/ROSAS_VW.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [52] M. Christy Perdana, I. Setyawan Purnama y S. Hadisusanto, “Implementation of a full-scale constructed wetland to treat greywater from tourism in Suluban Uluwatu Beach, Bali, Indonesia,” ScienceDirect, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844020318818>
- [53] EXTRA, “Propiedades de la lengua de suegra,” 15 Julio 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.extra.com.pe/medicina-natural/propiedades-de-la-lengua-de-suegra/>. [En línea]. Disponible:
- [54] SEMPERGREEN, “Cubierta plana de 0 a 5 grados,” 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.sempergreen.com/co/soluciones/techo-verde/types/cubierta-vegetal-plana>.
- [55] R. Djedjig, S. E. Ouldboukhitine, R. Belarbi y E. Bozonnet, “Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs,” *ELSEVIER*, vol. 39, pp. 752-761, Julio 2012. [En línea]. Disponible:<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.03.024>
- [56] A. Yepes y M. S. Buckeridge, “Respuestas de las plantas antes los factores ambientales del cambio climático global,” *Colombia Forestal*, vol. 14 , n° 2, pp. 213-232, 2011. [En línea]. Disponible: <http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v14n2/v14n2a06.pdf>
- [57] D. Parra Montoya y M. E. Rivera, “Techo verde como medida de manejo a problemática ambiental relacionadas con el recurso hídrico,” 2020. [En línea]. Disponible: https://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/SEMINVE/article/view/4697/2744

- [58] D. Duarte y A. Moreno, Techos verdes en viviendas de estrato 1: aplicado al barrio Yomasa, Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2014. [En línea]. Disponible: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/309b25e8-6017-4817-ba44-3bc9836b3f71/content>.
- [59] R. Trujillo Samayoa, Y. Rangel Martínez y G. Castañeda Nolasco, “Potential green roof, to save electricity by air conditioning in the building,” *Nova scientia vol.7 no.15 León*, 2015. [En línea]. Disponible: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052015000300577
- [60] U. Berardi, “The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits,” *Energy and Buildings*, Toronto, 2016. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.021>
- [61] J. P. Pérez Correa, Evaluación económica del bienestar generado por techos verdes en Bogotá, Bogotá: Universidad de los Andes, 2015. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/18450/u721817.pdf?sequence=1>.
- [62] H. S. Rodriguez Cardenas, Estudio de riesgos bajo la metodología PMI enfocado en proyectos de construcción sostenible caso de estudio, cubierta verde torre ciudadela empresarial Sarmiento Angulo., Bogotá D.C: Universidad de la Salle, 2017. [En línea]. Disponible: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1047&context=ing_civil.
- [63] J. Wai y L. Kit, “From the ‘urban heat island’ to the ‘green island’? A preliminary

- investigation into the potential of retrofitting green roofs in Mongkok district of Hong Kong,” *Habitat International*, vol. 39, pp. 25-35, 2013. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0197397512000689>
- [64] H. Valencia, M. Vanegas y R. Ramírez, “Tendencia global en las investigaciones relacionadas con el rendimiento energético por la implementación de techos verdes en edificaciones: Importancia de su desarrollo en la costa Caribe colombiana.,” *Prospectiva*, vol. 20, n° 1, 2022. [En línea]. Disponible: <http://ojs.uac.edu.co/index.php/prospectiva/article/view/2499/2461>.
- [65] M. Santamouris, S. Haddad, M. Saliari, K. Vasilakopoulou, A. Synnefa, R. Paolini, G. Ulpiani, S. Garshasbi y F. Fiorito, “. On the energy impact of urban heat island in Sydney: Climate and energy potential of mitigation technologies,” *Energy and Buildings*, vol. 166, pp. 154-164, 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X12002447>
- [66] J. Robine, S. Cheung, S. Roy, H. Van, C. Griffiths, J. Michel y F. Herrmann, “Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003,” *Comptes Rendus. Biologies*, vol. 331, pp. 171-178, 2008. [En línea]. Disponible: <https://www-sciencedirect-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S1631069107003770>
- [67] A. Refahi y H. Talkhabi, “Investigating the effective factors on the reduction of energy consumption in residential buildings with green roofs,” *Renewable Energy*, vol. 80, pp. 595-603, 2015. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.030>
- [68] K. Liu y J. Minor, “Performance Evaluation of an Extensive Green Roof,” *National Research Council of Canada*, pp. 1-11, 2005. [En línea]. Disponible:

- https://sustainabletechnologies.ca/app/uploads/2013/03/NRC_EastviewGRrept.pdf
- [69] J. Liu, Y. Li y F. Ma, “The Effect of Anthropogenic Heat on Local Heat Island Intensity and the Performance of Air Conditioning Systems,,” *Advanced Materials Research*, Vols. %1 de %2250-253, pp. 2975-2978, 2011. [En línea]. Disponible: <https://www.scientific.net/AMR.250-253.2975>.
- [70] C. Hsieh, T. Aramaki y K. Hanaki, “The feedback of heat rejection to air conditioning load during the nighttime in subtropical climate,,” *Energy and Buildings*, vol. 39, pp. 1175-1182, 2007. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.06.016>
- [71] F. García, “Blu Radio,” 7 Enero 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.bluradio.com/nacion/habitantes-de-leticia-estan-con-el-agua-en-las-rodillas-por-aguacero-y-colapso-de-alcantarillado>.
- [72] H. Chow, Z. Li y J. Darkwa, “The effectiveness of retrofitting existing public buildings in face of future climate change in the hot summer cold winter region of China,,” *Energy and Buildings*, vol. 57, pp. 176-186, Febrero 2013. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778812006019?via%3Dihub>
- [73] A. Chan y T. Chow, “Energy and economic performance of green roof system under future climatic conditions in Hong Kong,,” *Energy and Buildings*, vol. 64, pp. 182-198, 2013. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.015>.
- [74] P. Boehme, M. Berger y T. Massier, “Estimating the building based energy consumption as an anthropogenic contribution to urban heat islands,,” *Sustainable Cities and Society*, pp. 373-384, 19. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2015.05.006>

- [75] P. Bevilacqua, D. Mazzeo, R. Bruno y N. Arcuri, “Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area,” *Energy and Buildings*, vol. 122, pp. 63-79, 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778816302183>
- [76] Anonymous New York, “Objetivo 11:Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.,” *Anonymous New York*, pp. 24-25, 2018.
- [77] Minsalud, 12 Octubre 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Minsalud-comprometido-con-la-salud-mental-de-los-colombianos.aspx>.
- [78] Unión Europea, “Gobierno de Aragon,” 04 10 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.aragon.es/-/el-cambio-climatico#anchor2>.
- [79] Universidad Nacional de la Plata, “El suelo,” 2008. [En línea]. Disponible: <https://unlp.edu.ar/frontend/media/98/27598/3f23fc987dbbeda82587753c9796000a.pdf>.
- [80] C. Haub y T. Kaneda, “Word Population Data Sheet,” pp., 2014. [En línea]. Disponible: www.prb.org/resources/2014-word-population-data-sheet/
- [81] S. Vera y M. Ordenes, “Evaluacion del desempeño energí-termico de una vivienda social en Chile, utilizando un programa de simulación energética de edificios.,” *Ingeniería De Construcción*, vol. 17, n° 3, pp. 133-142, 2002. [En línea]. Disponible:
- [82] Resolución 0472, “por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de Construcción y Demolición (RCD) y se dictan otras disposiciones,” 2017. [En línea]. Disponible: <https://vlex.com.co/vid/resolucion-numero-0472-2017->

670244053.

- [83] Banco Interamericano de Desarrollo, “Edificios vs cambio climático: Construyendo adaptación y mitigación,” 11 02 2019. [En línea]. Disponible: <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/edificios-vs-cambio-climatico-construyendo-adaptacion-y-mitigacion/>.