

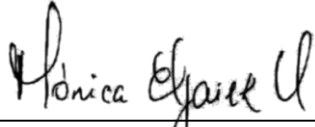
Confort térmico en una unidad habitacional de muro verde con botellas PET versus una de techo verde, en un clima tropical.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Excelente trabajo felicitaciones. Muchos éxite



Firma del director
EDGAR QUINONES BOLAÑOS



Firma del jurado
MÓNICA ELJAIEK URZOLA



Firma del jurado
JAVIER MOUTHON BELLO

**CONFORT TÉRMICO EN UNA UNIDAD HABITACIONAL DE MURO VERDE
CON BOTELLAS PET VERSUS UNA DE TECHO VERDE, EN UN CLIMA
TROPICAL.**

MICHELLE CAROLINA BARÓN MARTÍNEZ

DIONICIO NAVARRO CASTILLO

Director:

EDGAR EDUARDO QUIÑONES BOLAÑOS

PhD y MSc Ingeniería Ambiental, Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS D.T.C.

2020

**CONFORT TÉRMICO EN UNA UNIDAD HABITACIONAL DE MURO VERDE
CON BOTELLAS PET VERSUS UNA DE TECHO VERDE, EN UN CLIMA
TROPICAL.**

**Documento final del proyecto de grado presentada como opción de trabajo de grado
para optar por el título de Ingeniero Civil**

Línea de Investigación:

Gestión Ambiental

Grupo de Investigación de Modelación Ambiental (GIMA)

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS D.T.C.

2020

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
2. MARCO REFERENCIAL	17
2.1 ANTECEDENTES	17
2.2 ESTADO DEL ARTE	19
2.3 MARCO CONCEPTUAL	24
2.3.1 Clima	24
2.3.2 Islas de calor	24
2.3.3 Muro verde	26
2.3.5 Confort térmico	28
2.3.6 Factores relacionados con el confort térmico	28
2.3.7 Enfoques de confort térmico	34
2.3.8 Estándares de confort térmico	36
2.3.9 Índice (PMV-PPD)	37
2.4 MARCO LEGAL	40
3. OBJETIVOS	41
3.1 OBJETIVO GENERAL	41
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	41
4. ALCANCE	42
5. METODOLOGÍA	45
5.1 UNIDADES HABITACIONALES	46
5.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TECHO VERDE	48
5.3 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LA VEGETACIÓN DEL SISTEMA DE MURO VERDE	49
5.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MURO VERDE	50
5.4.1 Acopio y adecuación de botellas	51
5.4.2 Diseño y construcción de la estructura metálica.	53
5.4.3 Adecuación del terreno e instalación de la estructura a la fachada.	54
5.4.4 Siembra de vegetación e instalación de las botellas a la estructura metálica. ...	54
5.4.5 Riego y cuidado de la vegetación.	55
5.5 ESCENARIOS PLANTEADOS	56
5.5.1 Escenario 1. Unidad con Techo verde vs Unidad con Muro Verde (Espárrago-Oeste)	56

5.5.2	Escenario 2. Unidad con Techo Verde vs Unidad con Muro verde (Esparrago-Sur)	56
5.5.3	Escenario 3. Unidad con Techo Verde vs Unidad con Muro Verde (Esparrago-Este)	57
5.5.4	Escenario 4. Unidad con Techo verde vs Unidad con Muro Verde (Barquillo-Sur)	57
5.5.5	Escenario 5 Unidad con Techo Verde vs Unidad con Muro verde (Barquillo-Este)	58
5.5.6	Escenario 6. Unidad con Techo verde vs Unidad con Muro Verde (Barquillo-Oeste)	58
5.6	FACTORES CLIMÁTICOS	59
5.7	EQUIPOS DE MEDICIÓN	61
5.8	PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN	63
5.9	CALCULO DE LA TEMPERATURA RADIANTE MEDIA Y TEMPERATURA OPERATIVA	68
5.10	ANÁLISIS DE DATOS, ÍNDICES PMV Y PPD Y EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO	72
5.11	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS, VEGETACIÓN Y ORIENTACIÓN	76
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	78
6.1	IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LA VEGETACIÓN DE SISTEMA DE MURO VERDE	78
6.2	ANÁLISIS DE TEMPERATURAS PARA AMBOS MÓDULOS	82
6.3	ANALISIS DE ESCENARIOS	94
6.4	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS DE VEGETACIÓN	104
6.5	ANÁLISIS COMPARATIVO DEL TIPO DE VEGETACIÓN	106
6.6	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA ORIENTACIÓN DEL MURO VERDE	107
6.7	ANALISIS DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL	109
6.8	ANALISIS DE LA TEMPERATURA INTERIOR	110
6.9	ANALISIS DEL CONFORT Y RENDIMIENTO TERMICO RESPECTO LA LITERATURA	111
7.	CONCLUSIONES	114
8.	RECOMENDACIONES	116
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
10.	ANEXOS	121

ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Fachadas verdes instaladas en el edificio administrativo Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Montería.....	18
Ilustración 2. Variaciones de la temperatura superficial y atmosférica diurna y nocturna, en diferentes zonas de uso del suelo	25
Ilustración 3. Tipos de muros verdes	27
Ilustración 4. Valor medio del factor angular entre una persona sentada y un rectángulo horizontal cuando la persona es girada alrededor de un eje vertical.	33
Ilustración 5. Factor angular entre una persona sentada y un rectángulo horizontal cuando la persona es girada alrededor de un eje vertical.	33
Ilustración 6. Valor medio del factor angular entre una persona de pie y un rectángulo vertical cuando la persona es girada alrededor de un eje vertical.	33
Ilustración 7. Valor medio del factor angular entre una persona de pie y un rectángulo horizontal cuando la persona es girada alrededor de un eje vertical.	33
Ilustración 8. Ubicación geográfica, Ciudad de Cartagena, Colombia.	43
Ilustración 9. Ubicación geográfica. Universidad de Cartagena, Colombia.	43
Ilustración 10. Planos arquitectónicos de las unidades. Fachada OESTE y fachada ESTE.....	46
Ilustración 11. Planos arquitectónicos de las unidades. Fachada NORTE y SUR	47
Ilustración 12. Fachada Norte de la unidad habitacional	47
Ilustración 13. Fachada este de la unidad habitacional	47
Ilustración 14. Composición de Techo verde.....	48
Ilustración 15. Techo verde ubicado en una unidad. Construido por SIMA	49
Ilustración 16. Adecuación de botellas PET y Empalme.	50
Ilustración 17. Muro verde con botellas PET diseñado por autores del presente proyecto.....	51
Ilustración 18. Perforación de botellas PET.....	52
Ilustración 19. Empalme de botellas PET.	52
Ilustración 20. Botellas empalmadas a gran escala.	52
Ilustración 21. Perforación de perfiles metálicos.	53
Ilustración 22. Estructura metálica anclada al muro de la unidad.....	53
Ilustración 23. Empalme de perfiles metálicos.	53
Ilustración 24. Impermeabilización de perfiles. metálicos.....	53
Ilustración 25. Adecuación de terreno.....	54

Ilustración 26. Sembrado de Espárrago.....	55
Ilustración 27. Sembrado de Barquillo Morado.	55
Ilustración 28. Muro verde con Espárrago, ubicado en la fachada Oeste.	56
Ilustración 29. Muro verde con Espárrago, ubicado en la fachada Sur.....	56
Ilustración 30. Muro verde con Espárrago, ubicado en la fachada Este.....	57
Ilustración 31. Muro verde con Barquillo morado, ubicado en la fachada Sur.....	57
Ilustración 32. Muro verde con Barquillo Morado, ubicado en la fachada Este.	58
Ilustración 33. Muro verde con Barquillo morado, ubicado en la fachada Oeste.	58
Ilustración 34 Comportamiento mensual de la presión atmosférica, temperatura del aire, acumulado de precipitación y humedad relativa en Cartagena.....	59
Ilustración 35. Distribución del régimen de viento en Cartagena.	60
Ilustración 36. Ficha técnica termómetro EXTECH modelo 42312.	61
Ilustración 37. Ficha técnica medidor temperatura y humedad, EXTECH Modelo RTH 10.....	62
Ilustración 38. Ficha técnica medidor de velocidad del aire, EXTECH Modelo SLD 350.....	62
Ilustración 39. Ficha técnica sensor Acurite- Modelo 06004.....	63
Ilustración 40. Ficha Técnica de monitor estación meteorológica 5-1 Acurite Modelo 06022.	63
Ilustración 41. Sensor de estación meteorológica ubicado en la parte superior de la unidad y representado por círculo rojo. Dibujado en SketchUp.	64
Ilustración 42. Ubicación de puntos para la toma de las Temperaturas Superficiales en la fachada ESTE, SUR, OESTE y NORTE y PISO y representados por círculo rojo. Dibujado en SketchUp	65
Ilustración 43. Ubicación de puntos para la toma de las Temperaturas superficiales en la PLACA y lamina de ASBESTO; representado por círculo rojo. Dibujado en SketchUp.....	65
Ilustración 44. Ubicación de puntos para la toma de las Velocidades del viento al interior de la unidad, representados por círculo rojo. Dibujados en SketchUp.	66
Ilustración 45. Ubicación de las USB para la toma de las humedades y temperaturas al interior de las unidades, representada por un círculo rojo. Dibujado en SketchUp.....	67
Ilustración 46. Toma de datos al interior de las unidades. A) Velocidades del viento con Termo-Anemómetro de hilo electro calentado con sonda telescópica. B) Temperatura y humedad al interior de la unidad con Registrador de datos USB. C) temperaturas superficiales con Termómetro de infrarrojos de doble láser.....	67
Ilustración 47. Toma de datos con estación meteorológica. A) Sensor meteorológico inalámbrico que registra los datos de Temperatura, Humedad y Velocidad del viento exterior. B) Pantalla digital donde son transmitidos los datos del sensor.....	68



Ilustración 48. Secciones para cada fachada del módulo de vivienda.....	69
Ilustración 49. Relacion entre una persona sentada y un rectángulo vertical para determinar el factor angular.....	70
Ilustración 50. Relacion entre una persona sentada y un rectángulo horizontal para determinar el factor angular.	70
Ilustración 51. Barra para selección de Estándar de confort térmico.	
Fuente: Hoyt, Schiavon, Tartarini, Cheung, Steinfeld, Piccioli y Moon, 2019, CBE Thermal Comfort Tool. Centro para el entorno construido, Universidad de California Berkeley.	73
Ilustración 52. Barra de selección de Método de Cálculo de confort y temperatura operativa.	
Fuente: Hoyt et al, 2019, CBE Thermal Comfort Tool. Centro para el entorno construido, Universidad de California Berkeley.	73
Ilustración 53. Entrada de velocidad y selección de control local del aire.	
Fuente: Hoyt et al, 2019, CBE Thermal Comfort Tool. Centro para el entorno construido, Universidad de California Berkeley.	73
Ilustración 54. Barra de entrada de humedad relativa.	
Fuente: Hoyt et al, 2019, CBE Thermal Comfort Tool. Centro para el entorno construido, Universidad de California Berkeley.	73
Ilustración 55. Barra de entrada de nivel de actividad y tasa metabólica.	
Fuente: Hoyt et al, 2019, CBE Thermal Comfort Tool. Centro para el entorno construido, Universidad de California Berkeley.	74
Ilustración 56. Barra de selección de nivel de ropa.	
Fuente: Hoyt et al, 2019, CBE Thermal Comfort Tool. Centro para el entorno construido, Universidad de California Berkeley.	74
Ilustración 57. Herramienta “ASHRAE Thermal Comfort Tool”.....	75
Ilustración 58. Instrucciones para el cálculo de un conjunto de parámetros de confort.	
Fuente: Hoyt et al, 2019, CBE Thermal Comfort Tool. Centro para el entorno construido, Universidad de California Berkeley.	75
Ilustración 59. Primer día de la vegetación elegida para el estudio de la resistencia al sol.	78
Ilustración 60. Quinto día de la vegetación elegida para el estudio de la resistencia al sol.	79
Ilustración 61. Décimo día de la vegetación elegida para el estudio de la resistencia al sol.....	79
Ilustración 62. Último día de la vegetación elegida para el estudio de la resistencia al sol.	80
Ilustración 63. Temperaturas para el escenario 1 del techo verde.....	82
Ilustración 64. Temperaturas para el escenario 1 del Muro verde.	84

Ilustración 65. Temperaturas para el escenario 2 del Muro verde.	86
Ilustración 66. Temperaturas para el escenario 3 del Muro verde.	87
Ilustración 67. Temperaturas para el escenario 4 del Muro verde.	88
Ilustración 68. Temperaturas para el escenario 5 del Muro verde.	90
Ilustración 69. Temperaturas para el escenario 6 del Muro verde.	91
Ilustración 70. Humedad relativa promedio y temperaturas promedio para el primer escenario.....	94
Ilustración 71. Humedad relativa promedio y temperaturas promedio para el segundo escenario. ..	95
Ilustración 72. Humedad relativa promedio y temperaturas promedio para el tercer escenario.	96
Ilustración 73. Humedad relativa promedio y temperaturas promedio para el cuarto escenario.	97
Ilustración 74. Humedad relativa promedio y temperaturas promedio para el quinto escenario.	98
Ilustración 75. Humedad relativa promedio y temperaturas promedio para el sexto escenario.	99
Ilustración 76. Índices de confort térmico PMV y PPD para los escenarios 1, 2 Y 3.	100
Ilustración 77. Índices de confort térmico PMV y PPD para los escenarios 4, 5 y 6.	100
Ilustración 78. Diferencias de temperatura promedio y PPD promedio para cada escenario.	103
Ilustración 79. Humedad relativa y diferencia de Humedad Relativa por escenario.	103
Ilustración 80. Temperatura superficial interior de cada fachada con y sin presencia de muro verde respecto al mismo modulo.....	105
Ilustración 81. Diferencias de temperatura superficial para cada orientación del módulo con muro verde respecto el módulo con techo verde (Ts t. verde-Ts m. verde).	108
Ilustración 82. Diferencia de temperatura del aire para cada módulo (T. Exterior- T. interior).	110
Ilustración 83. Evaluación del confort térmico por el modelo adaptativo; escenarios 1,2 y 3.	123
Ilustración 84. evaluación del confort térmico por el modelo adaptativo; escenarios 4, 5 y 6.	123
Ilustración 85. Temperaturas modulo techo verde escenario 2.	124
Ilustración 86. temperaturas modulo techo verde escenario 3.	125
Ilustración 87. Temperaturas modulo techo verde escenario 4.	126
Ilustración 88. Temperaturas modulo techo verde escenario 5.	127
Ilustración 89. Temperaturas modulo techo verde escenario 6.	128

TABLAS

Tabla 1. resumen de investigaciones relacionadas con confort térmico en climas tropicales.....	22
Tabla 2. Sumario de las investigaciones relacionadas con muros verdes.	23
Tabla 3. Valores de aislamiento de prendas.....	30
Tabla 4. Tasa metabólica para tareas típicas.	31
Tabla 5. Factores de ponderación en función de la velocidad del aire.....	32
Tabla 6. Ecuaciones para el cálculo de los factores angulares.	34
Tabla 7 Escala de sensación térmica de 7 niveles.	39
Tabla 8. Escenarios planteados para la realización del proyecto.	45
Tabla 9. Nombre común y científico para vegetación estudiada.....	50
Tabla 10 Resumen estadístico mensual de la presión atmosférica, temperatura del aire, acumulada de precipitación y humedad relativa en Cartagena.....	60
Tabla 11. Resumen estadístico del régimen de viento en Cartagena.	61
Tabla 12. Factores Angulares para cada sección.....	70
Tabla 13. Factor Angular de cada superficie.....	71
Tabla 14 Selección de la mejor vegetación de acuerdo a variables de estudio	80
Tabla 15. Sensación térmica y confort térmico por hora para los escenarios 1,2 y 3 en cada módulo.	101
Tabla 16. Sensación térmica y confort térmico por hora para los escenarios 4,5 y 6 en cada módulo.	102
Tabla 17. Parámetros de selección de la mejor vegetación.....	105
Tabla 18. Parámetros de selección de la mejor orientación.	106
Tabla 19. evaluación de confort térmico a través del modelo adaptativo con base a la ANSI/ASHRAE 55 2017 para un 80% de aceptabilidad.	121
Tabla 20. evaluación de confort térmico a través del modelo adaptativo con base a la ANSI/ASHRAE 55 2017 para un 90% de aceptabilidad.	122

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Primero que todo dar gracias a Dios por permitirnos llegar hasta este punto, por alcanzar un logro más en esta escalera de la vida pese a las dificultades que se han presentado en el camino y mantener a nuestras familias con vida y salud a pesar de la situación que se vive hoy día.

Gracias a nuestros padres (Miguel Barón Arias , Rosario Martínez Hoyos) y (Maria Lidia castillo Gaitan, Dionicio Navarro Castillo) por el apoyo incondicional cada día, por aquellos sacrificios realizados para que podamos estar en donde nos encontramos, por ser siempre una guía y un pilar, por darnos cada palabra de aliento en los momentos difíciles que nos ayudaron a no desfallecer.

Gracias a nuestros hermanos, (Elvira, Soraya, María) y (Daniel, Elen, Diana) por inspirarnos y acompañarnos en el camino, por estar siempre para nosotros, extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día. Gracias también a demás familiares por ayudar en los momentos oportunos y estar allí cuando se necesitaban.

A nuestros amigos, por acompañarnos durante todos estos años de universidad, por hacer que este paso estuviese cargado de alegrías y tristezas y sobre todo por permitirnos recorrerlo junto a ellos de la mejor forma.

A todos los profesores que nos brindaron sus conocimientos para poder llegar a ser los profesionales que hoy somos, en especial al profesor Edgar Quiñones Bolaños, por ser nuestro director y guiarnos de la mejor forma en la realización del presente trabajo, a nuestros evaluadores Monica Eljaiek Urzola y Javier Mouthon Bello por compartir con nosotros sus conocimientos para mejorarlo.

Al semillero de investigación GIMA y a Manuel García, por acogernos para la realización de nuestro proyecto de tesis y financiarlo para que este sueño fuese posible. Gracias a la señora Amanda Barreto por su apoyo e interés y por ayudarnos a obtener la mayoría de las botellas necesarias para desarrollar este proyecto de investigación.

También queremos dar gracias a todas aquellas personas que de una u otra manera colocaron su grano de arena para que pudiéramos llegar esta instancia.

RESUMEN

El presente proyecto realiza una comparación entre dos unidades habitacionales equipadas cada una con un sistema de vegetación, la primera con un techo verde convencional y la segunda con un muro verde construido a partir de botellas PET, para evaluar si su implementación logra un confort térmico; para esto se plantearon seis escenarios donde se varió la vegetación y la ubicación del muro verde y se mantuvo las mismas condiciones para el techo verde. De esta forma, se realizó la toma de datos de distintas variables como: temperaturas superficiales, velocidad del viento, temperatura ambiente y humedad relativa; con el fin de comparar los dos tipos de sistemas empleados para poder determinar si el muro verde con botellas PET resulta competente con respecto al techo verde.

Se realizó un ensayo con cinco tipos de vegetación en el que se exponían a radiación solar directa y sin suministro agua, para seleccionar dos tipos de vegetación que resistieran más tiempo y así poder ser utilizados en el muro verde.

Se empleó la herramienta CBE Thermal Comfort Tool que permite calcular el confort térmico, a través de parámetros ambientales y personales, el software establece los índices PMV y PPD que permiten determinar la sensación térmica y el porcentaje de personas que se sentirían insatisfechas, evaluando así el comportamiento en cada sistema.

También se determinó la mejor vegetación utilizada en los escenarios al igual que la mejor ubicación para el muro verde, evaluando parámetros adicionales como: diferencias de temperaturas al interior y exterior de cada unidad, las diferencias de humedades interiores y exteriores y temperatura radiante media.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes: debido a las altas temperaturas de la ciudad las reducciones de temperatura que puedan brindar los sistemas de vegetación no son suficientes para tener un confort térmico, pues la sensación térmica durante el día varía de “ligeramente cálidas” a “calurosas” y el porcentaje estimado de insatisfechos supera el 78% en las horas de más calor. La mejor vegetación empleada en el sistema de muro verde fue el Espárrago y la mejor ubicación para el muro verde fue la orientación Sur.



ABSTRACT

The present project makes a comparison between two housing units each equipped with a vegetation system, the first with a conventional green roof and the second with a green wall constructed from PET bottles, to assess whether its implementation achieves thermal comfort; For this, six scenarios were raised where the vegetation and the location of the green wall were varied and the same conditions for the green roof were maintained. In this way, data was taken from different variables such as: surface temperatures, wind speed, ambient temperature and relative humidity; in order to compare the two types of systems used to determine if the green wall with PET bottles is competent with respect to the green roof.

A trial was carried out with five types of vegetation in which they were exposed to direct solar radiation and without water supply, to select two types of vegetation that resisted longer and thus be used on the green wall.

The CBE Thermal Comfort Tool was used to calculate thermal comfort, through environmental and personal parameters the software establishes the PMV and PPD indexes that allow determining the thermal sensation and the percentage of people who would feel dissatisfied, thus assessing the behavior in each system.

The best vegetation used in the scenarios was also determined, as well as the best location for the green wall, evaluating additional parameters such as: differences in temperatures inside and outside each unit, differences in indoor and outdoor humidity and average radiant temperature.

The results obtained were the following: due to the high temperatures of the city, the temperature reductions that vegetation systems can provide are not enough to have thermal comfort, since the thermal sensation during the day varies from “slightly warm” to “hot” and the estimated percentage of dissatisfied exceeds 78% in the hottest hours. The best vegetation used in the green wall system was the Asparagus and the best location for the green wall was the South orientation.

1. INTRODUCCIÓN

En el área rural, la vegetación y los espacios amplios y abiertos dominan el paisaje. Los árboles y las plantas no solo dan sombra; también ayudan a disminuir la temperatura de la tierra y la del aire. En las ciudades, por el contrario, se caracterizan por tener superficies secas e impermeables como techos, veredas, calles y estacionamientos. A medida que el desarrollo avanza, las plantas van desapareciendo y son sustituidas por edificios y pavimento, este cambio conduce a que haya menos sombra y humedad en el aire para mantener la ciudad fresca y contribuye a que las temperaturas sean más elevadas (Gobernación de la ciudad de Buenos Aires, 2009) lo que produce las llamadas islas de calor urbano; en la cual, las ciudades suelen ser más cálidas que el medio rural que las rodea, en especial en los centros donde se produce una edificación masiva (Gobernación de la ciudad de Buenos Aires, 2009). Con el aumento de las temperaturas también aumenta de forma indirecta el consumo energético al interior de las viviendas en las zonas urbanas de clima cálido, principalmente por el uso de equipos de ventilación como abanicos o aires acondicionados, utilizados por la necesidad de lograr un confort térmico, pero estos sistemas generan un ciclo debido a que los sistemas de climatización provocan también un ascenso de la temperatura en las ciudades (De Pombo & Gonzales, 2016).

La integración de sistemas de vegetación en construcciones en áreas urbanas tiene un gran potencial para aumentar la calidad del entorno urbano, como el suministro de agua y la calidad del aire, la gestión de aguas pluviales, vegetación densa en entornos urbanos, una marcada disminución de la temperatura y las emisiones de carbono, así como la minimización de los efectos de las islas de calor. Además de los profundos efectos en el medio ambiente, los sistemas de vegetación proporcionan beneficios adicionales al público, como los aspectos sociales y económicos. La presencia de vegetación tiene un gran impacto psicológico en los habitantes urbanos, además de mejorar la estética visual de las ciudades y elevar los precios de los bienes raíces. Asimismo, los sistemas de vegetación proporcionan beneficios adicionales, como el impacto de aislamiento en invierno y la función de sombreado en verano. Por lo tanto, se enfatiza que las condiciones micro climáticas de los edificios



existentes pueden ajustarse de manera rentable y ecológica utilizando diferentes tipos de sistemas de vegetación (Besir & Cuce, 2018).

En el año 2013 se desarrolló una investigación en el campus de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Montería, Colombia, donde se evaluó los efectos de muros verdes en la sensación térmica interior de un edificio, donde se varió la ubicación de estos muros sobre las fachadas del edificio, la cantidad y el tipo de vegetación. y se obtuvo diferencias máximas en la temperatura de 4 °C entre una fachada verde y sin ella. Estos resultados nos permiten apreciar la disminución de temperatura que presenta la vegetación en el entorno que nos rodea.

Localmente, en la ciudad de Cartagena, el establecimiento público ambiental (EPA) ha desarrollado proyectos de silvicultura con el fin del mitigar el impacto generado por las altas temperaturas de las cuales se tienen registro que alcanzan los 40°C en algunos meses de año y debido a la falta de vegetación en algunas zonas urbanas generan el efecto de islas de calor en algunas áreas de la ciudad, sin embargo la implementación de techos y muros verdes naturales como alternativa a esta problemática es casi nula, teniéndose como única referencia la aplicación de jardines verticales en una de las estaciones de transporte público del centro de la ciudad, la cual no es suficiente para reducir significativamente la temperatura de la zona (EPA, 2016).

Los desarrollos más recientes en muros verdes se centran principalmente en el diseño de sistemas para lograr soluciones técnicas más eficientes y un mejor rendimiento en todas las fases de construcción (Manso & Castro, 2015). Con una implementación de paredes verdes, adoptada a gran escala, es posible atenuar el efecto de isla de calor urbano y las temperaturas internas en las viviendas y edificios. Los edificios altos se están convirtiendo en un tipo de hogar común en muchas ciudades, y considerando el papel de las paredes externas en la ganancia de calor, se espera que paredes verdes tenga un gran potencial para mejorar el rendimiento térmico (Feitosa & Wilkinson, 2018).

Por otro lado, a la problemática de la temperatura se suma el uso irracional de plásticos, éstos son responsables en gran parte de los residuos contaminantes que se acumulan en el planeta; hoy en día, el plástico y las botellas PET se están produciendo de una manera descontrolada pues las bebidas envasadas son cada día más, la problemática radica en que no se lleva un



control de su disposición final lo que produce que esta cantidad de envases terminen depositados en las fuentes de agua perjudicando a los animales que de estas se satisfacen Gómez & Cruz (2016).

Es de esperarse que la preocupación por el medio ambiente en la actualidad sea un tema de interés general, a tal punto que la mayoría de los proyectos de ingeniería están sustentados en lineamientos ecológicos y ambientales, que tienen como finalidad mejorar y preservar los recursos naturales del planeta. Generalmente los proyectos de investigación están enfocados en mitigar problemáticas transcendentales, que originan un gran impacto a las comunidades y que requieren ser solucionadas con rapidez debido a sus efectos negativos posteriores.

El presente estudio busca determinar si un sistema de muro verde, diseñado con botellas PET e instalado en una fachada de una unidad habitacional, logra disminuir la temperatura interior, en comparación con una unidad habitacional equipada de un sistema de techo verde, con el propósito de establecer cuál de los dos sistemas presenta un mejor comportamiento térmico y obtiene un confort térmico aceptable, y con ello, justificar el uso de muros verdes en las viviendas de la ciudad de Cartagena.

Se desea comparar ambos sistemas debido a que las técnicas convencionales no permiten reutilizar materiales para reducir la contaminación, pues se utilizan sistemas como mallas en acero, geotextiles o paneles, que suponen una mayor inversión ya que son materiales más costosos y requieren mano de obra especializada que pueda construir e instalar el sistema. Por lo cual se plantea la pregunta ¿Es posible mejorar el confort térmico en una unidad habitacional con un muro verde de botellas PET en comparación a una unidad con techo verde convencional?

Este estudio se fundamenta en los conocimientos adquiridos en las asignaturas afines con el objeto de estudio, propias del programa de ingeniería civil. La investigación se ubica en la línea de investigación Modelación Ambiental, del grupo GIMA y se espera que ayude a consolidar conceptos aferentes a la construcción de sistemas de ecologización como techos y muros verdes en viviendas, y parámetros, metodologías y estándares actualmente utilizados en la medición de confort térmico. Además, se resalta el aporte que significa al instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental (IHSA) y al Semillero de Investigación de Modelación Ambiental (SIMA) por tratarse de un estudio que permite contribuir a diseñar un sistema de



muro ecológico para su posterior aplicación en edificaciones energéticamente eficientes en condiciones de clima tropical húmedo y seco, característico de la ciudad de Cartagena, ofreciendo una base para estudios posteriores que se relacionen con el mejoramiento del rendimiento térmico en este tipo de sistemas sostenibles y las condiciones de confort de las viviendas implementando materiales novedosos, reciclables y por tanto, económicamente rentables.

2. MARCO REFERENCIAL

Actualmente se encuentran en la literatura diversos estudios relacionados a la evaluación del confort térmico en espacios interiores, y la aplicación de sistemas de vegetación en muros y cubiertas, sin embargo, en ninguno de estos se establece un análisis comparativo entre techos y muros verdes, teniendo como criterio de comparación el confort térmico; ni tampoco se encontraron publicaciones que incorporaran el uso de botellas plásticas en diseño de muros verdes. Por tal razón el método de selección consistió en estudios sobre muros verdes que abarcaran factores ambientales como temperatura, radiación térmica, humedad y velocidad del aire; o en su defecto aquellas investigaciones desarrolladas a nivel nacional y local, pertenecientes a la línea de investigación de gestión ambiental, enfocadas en mejorar las condiciones de confort y a la reducción de la temperatura interior, para un clima comparable al de la ciudad de Cartagena.

2.1 ANTECEDENTES

A Nivel nacional, en el año 2013 se desarrolló una investigación en el campus de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Montería, Colombia, donde se evaluó los efectos de las fachadas verdes en la sensación térmica interior del edificio administrativo, realizando simulaciones con ENVI-met V3.17 e imágenes captadas con cámara de termografía y modeladas en Irisys IR Series Imager8, se analizaron en muros verdes instalados en el mismo escenario, variando la ubicación sobre las fachadas del edificio, la cantidad y el tipo de vegetación. Se consideró para la simulación un clima tropical húmedo, caracterizado por un periodo de lluvias y un periodo seco, con una humedad relativa alta (80%), velocidad de vientos baja durante todo el año (0,3 m/s) y temperaturas medias mensuales (28 °C). Los parámetros utilizados en el estudio para el análisis de la sensación térmica fueron la temperatura (°C), la humedad relativa (%), la radiación solar y el movimiento del aire (m/s), se midieron con equipos y software especializados. Los resultados se analizaron de acuerdo con los valores medios de los dos escenarios (con fachadas verdes

y con fachadas expuestas al sol), en un intervalo de tres horas, a las 10:00, a las 12:00 y a las 15:00. Seguidamente, se evaluaron los valores máximos y mínimos para cada escenario y cada hora. Se obtuvieron diferencias máximas en la temperatura de 4 °C a 3 metros de altura entre una fachada verde y sin ella (Muñoz & Torres, 2013).



Ilustración 1. Fachadas verdes instaladas en el edificio administrativo Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Montería.

Fuente: (Muñoz & Torres, 2013).

A nivel nacional y local no se encontraron más estudios que daten de hace más de 5 años, sin embargo, existen investigaciones a nivel internacional sobre muros verdes, cuyo objeto consistió en establecer la disminución de la temperatura interior en las edificaciones. Estos estudios son importantes como punto de referencia debido a que fueron desarrolladas en condiciones similares en lo que respecta al clima y a su vez también se utilizaron módulos de vivienda a escala real para el registro de las mediciones. Las más relevantes se incluyeron en tabla 2 en donde se muestran las reducciones alcanzadas por cada investigación y el clima característico del lugar. Las limitaciones de estos trabajos, radican en que no implementan materiales reciclados para el diseño del sistema de muro verde y que no comparan los resultados obtenidos con respecto a otro sistema de ecologización como el techo verde.

2.2 ESTADO DEL ARTE

En el campo internacional se han desarrollado proyectos relacionados con los beneficios de los muros verdes. En Inglaterra, a través de un estudio experimental, se demostró que se puede lograr una reducción de temperatura en promedio de 2.5 °C de la pared interna a través de muros verdes con una vegetación trepadora de aproximadamente 10 cm de espesor de la hédice Hedera; la investigación se desarrolló durante tres semanas en donde se midieron los parámetros, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento para periodos soleados y nublados en un muro con y sin fachada verde (Cuce, 2016)

Con el propósito de incorporar materiales sostenibles en los sistemas de muros verdes en el año 2016 se realizó una investigación en Portugal, en donde se construyó una celda de prueba, para un clima mediterráneo seco, y se desarrolló un análisis comparativo de las temperaturas de la superficie interior y los flujos de calor entre una pared de referencia, y una pared cubierta de un sistema de pared verde compuesto por geopolímeros y corcho expandido. Los datos se registraron entre septiembre y diciembre de 2013 para los parámetros de temperatura de la superficie interior flujo de calor, temperatura ambiente, humedad relativa, precipitación y radiación solar. En general, los resultados obtenidos señalan que, para los períodos evaluados, en comparación con una pared de referencia, el sistema estudiado mejora el confort térmico de los espacios interiores al reducir la amplitud térmica diaria promedio hasta 4,1° C, disminuyendo y retrasando el flujo de calor de las paredes entre el interior y el exterior. Además, aumenta la temperatura mínima de la superficie interior hasta 1,8 ° C y reduce la temperatura máxima de la superficie interior hasta 3° C (Manso & Castro, 2016)

En el año 2017 se presentaron los resultados obtenidos de un estudio realizado para medir los impactos térmicos de las paredes verdes en los edificios. El experimento se ocupa del monitoreo completo de un muro verde instalado en una maqueta experimental ubicados en la ciudad de La Rochelle, Francia, que consta de cinco filas de tanques de hormigón vacíos que representan edificios reducidos. Se registraron datos de los parámetros como temperatura del aire y de la superficie, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, irradiancia y precipitaciones durante los meses de agosto a diciembre de año 2012. Para la configuración



reducida a escala estudiada, los resultados muestran que en verano la pared verde redujo las ganancias de calor de la fachada en un 97%, mientras que las pérdidas de calor se redujeron en un 30% (Djedjig et al., 2017).

Otro estudio importante implementó materiales reciclados en un sistema de muro verde utilizando un diseño modular de cajas de plástico reutilizadas como contenedor del sustrato de las plantas. En esta investigación se compararon dos prototipos de vivienda idénticos evaluando la atenuación del índice de calor generado por el efecto combinado de techos y muros con vegetación para un prototipo de vivienda en comparación de otro sin vegetación alguna. Los datos se registraron en las ciudades de Río de Janeiro, Brasil, para un clima cálido húmedo y Sídney, Australia para un clima templado. Los registros de Río de Janeiro abarcan un período de 161 días desde el 31 de octubre de 2016 hasta el 8 de febrero de 2017, y las pruebas de Sídney se realizaron durante 300 días, desde el 19 de enero de 2016 hasta el 20 de noviembre de 2016. Además, se concluyó una disminución máxima del índice de calor entre 15 y 20 °C para parámetros de temperatura y humedad relativa (Feitosa & Wilkinson, 2018).

En Colombia son pocas las investigaciones relacionadas con los beneficios térmicos de los muros verdes, sin embargo, se han elaborado importantes proyectos en algunas ciudades del país. En la ciudad de Bogotá, ejecutaron un proyecto que diseñó e implementó un jardín vertical con el objeto de crear una estrategia pedagógica en la educación ambiental. El sistema constructivo utilizado consistió en un sistema modular de bolsillos en geotextil colocado en una estructura de soporte en madera equipado con una geomembrana de polietileno que actúa como impermeabilizante; el riego se realiza por goteo y las plantas utilizadas fueron la duranta, cinta, trébol rojo, sedum y cineraria marítima (García & Ariza, 2016). Por otro lado, Corredor (2016) realizó un estudio comparativo de sistemas de paredes verdes mediante el uso de llantas recicladas para determinar la viabilidad de un nuevo modelo a escala para muros verdes, en contraste a otros sistemas comercializados en el mercado; los parámetros utilizados fueron peso, humedad de la pared, estética, impacto ambiental, cobertura vegetal, durabilidad vegetal, mantenimiento y costo. Concluyendo que el sistema es viable para su uso intensivo. Estas dos últimas investigaciones no evalúan la temperatura ni otros factores térmicos, sino que estudian otras variables como estética y costo.

A nivel local, aún no se publican investigaciones referentes al rendimiento térmico de sistemas ecológicos como techos y muros, sin embargo, en la Universidad de Cartagena se han elaborado tesis de pregrado en el área del desarrollo sostenible. En el año 2015, se realizó una investigación con el fin de evaluar el comportamiento térmico en viviendas de interés social (VIS), a través de un programa de modelación y medidas de campo con sensores de presión y temperatura, para así formular lineamientos constructivos, optimizando el diseño y mejorando el confort térmico de los ocupantes. En esta investigación se estableció parámetros para el diseño de viviendas y selección de materiales que mejoren las condiciones bioclimáticas de las VIS. Los resultados obtenidos indicaron que utilizar materiales con baja conductividad térmica, colocar cielos rasos de poliestireno expandido, seleccionar mejores acabados, aumentar la ventilación, realizar configuraciones de tipo espacial, aumentar tres hiladas a la altura de la vivienda y utilizar métodos de sombra como voladizos, conduce a reducción de la temperatura en 1.5°C y como consecuencia a una mejora del confort térmico del interior de la vivienda. Sin embargo, estas directrices solo se enfocan solamente a los elementos básicos y materiales convencionales de las VIS, y no a la utilización de elementos adicionales tales como los sistemas de vegetación en techos y muros (López et al., 2015)

Posteriormente en el año 2016, con el objetivo de establecer lineamientos para la restauración de viviendas abandonadas se diseñaron prototipos de vivienda con base a criterios económicos, técnicos y tecnológicos en el marco de la sostenibilidad ambiental; estos parámetros se caracterizaron por la utilización de tecnologías ecológicas como techos y muros verdes como solución al aislamiento térmico en VIS (Chalá et al., 2016). Esta investigación solo se limitó a realizar fichas de programa como guía metodológica de procesos constructivos en la rehabilitación de viviendas y no como aplicación de la misma en cada una de las que fueron objeto de estudio por parte de los autores.

En un estudio a escala piloto desarrollado en la Universidad de Cartagena en el año 2015, se evaluó el efecto térmico en el interior de una edificación y los volúmenes de escorrentía por medio del análisis de tres prototipos de cubiertas, dos correspondientes a techo verde y una a un techo concreto convencional. Los dos tipos de plantas seleccionadas fueron la duranta (duranta Golden) y la verdolaga (portulaca oleracea). Los resultados obtenidos indican reducciones de temperatura interior de 1.69°C y 3.20°C bajo el sistema de techo verde

conformado por durante respecto a la temperatura ambiente y la de techo de hormigón, mientras que para el sistema de techo verde conformado por verdolaga fue 1.64°C y 3.14°C respecto a la temperatura ambiente y la de techo de hormigón; cabe aclarar que este estudio no estableció si la reducción se debe solo a la vegetación o por el efecto suelo-vegetación. Se midió los parámetros térmicos exteriores cada 5 minutos empleando una estación meteorológica y los interiores a 5mm bajo la estructura del techo con el uso de sensores térmicos (De Pombo et al., 2016). Las limitaciones respecto a este estudio conducen a que es desarrollado a escala piloto y no a escala real, a su vez no se compara con un muro verde para establecer las diferencias, y por último no estima el grado de confort generado por la reducción de temperatura debido al uso de techos verdes.

Se analizaron otro tipo de investigaciones referentes a la evaluación del confort térmico en clima tropical o subtropical húmedo que, aunque no están enfocadas en sistemas de ecologización, algunas si consideran la mejora de las condiciones térmicas a través de medios pasivos y ahorro energético; se seleccionaron algunas recientes y los aspectos característicos de cada estudio se encuentran establecidos en la tabla 1.

Tabla 1. resumen de investigaciones relacionadas con confort térmico en climas tropicales.

Autores	año	lugar	clima	espacio	modelo	estándar	indicador	ventilación	tn (°C)	PMV	zona confort (°C)
Lu et al.	2018	Hainan China	Am	edificios	Estático	ASHRAE 55 2010	AMV Y PMV	natural	26,1	(-0,82 a 2,01)	24,3-27,9 23,1-29,1
Rosales D.	2018	B/quilla Colombia	af	aulas	Estático	ASHRAE 55 2013	PMV Y PPD	mecánica	n/a	-0,77	24-27
Shaeri et al.	2018	Bushehr Irán	Bsh	casas	Estático	ISO 7730 2005	PMV Y PPD	natural	n/a	0,88 0,91	no estimado
García et al.	2019	Bogotá Colombia	af	oficinas	adaptativo	ASHRAE 55 2010	t. neutra (tn)	natural	22,4	n/a	22,4± 2,5

Fuente: (Barón & Navarro, 2018)

Tabla 2. Sumario de las investigaciones relacionadas con muros verdes.

Autores	Año	lugar	clima	Estación	sistema	Orientación	Espesor (cm)	Reducción temperatura (°C)		
								Superficie Exterior	Superficie Interior	Interior
Wong et al.	2010	Hortpark Singapur	af	invierno	varios		9 a 48	1,1-11,58		
Perini et al.	2011	Delft Holanda	cfb	otoño	directa	nordeste	±20	1,2		
		Róterdam Holanda	cfb		indirecta	nordeste	±30	2,7		
susorova et al.	2013	Illinois USA	Dfa	verano	indirecta	sur	±20	1,1 max:7,9	0,9 max:2,0	
Chen et al.	2013	Wuhan China	csa	verano	modular	oeste	±23	4,2 max:20,8	0,5 max:7,7	0,4 max:1,1
Muñoz & Torres	2013	Montería colombia	af	verano	directa	Norte, sur y oeste	±10			máx.: 4,0
Mazzali et al.	2013	Lonigo Italia	cfa	verano	continua	suroeste	±10	(-2 a 20)		
		Venecia Italia	cfa	verano	continua	suroeste	±10	(-6 a 16)		
		Pisa Italia	csb	otoño	modular	este	±15	(-2 a 12)		
Olivieri et al.	2014	Madrid España	csa	verano	modular	sur	±18	15,1- 31,9 25,1	4,5-8,2 6,4	(-1,8)- 4,7 1,5
Djedjid	2017	La Rochelle Francia	cfb	verano e invierno	modular	este y oeste	±20	(-2 a 15)	max:10	máx.±5
Coma et al.	2017	Cataluña España	csa	verano	indirecta	este, sur y oeste	±30	este:13,8 sur:10,7 oeste:13,9		
					modular	este, sur y oeste		este:17 sur:21,5 oeste:20,2		
Manso & Castro	2016	Covilha Portugal	csb	otoño	modular	sur	±20	15	±7	
Cuce	2017	Nottingham Inglaterra	cfb	verano	directa		±10	max:6,1	2,5	
Feitosa & Wilkinson	2018	Rio de Janeiro Brasil	af	invierno y verano	Grs+lws modular	Todas	±15			(-2.8)- 8.1 1.1
	2018	Sidney Australia	cfa	verano y primavera	Grs+lws modular	Todas	±15			(-1.1)- 12 0,10
Sánchez et al.	2018	queretano mexico	BSh	verano e invierno	modular	sur	±25		máx. 2.5	2

Fuente: (Barón & Navarro, 2018)

2.3 MARCO CONCEPTUAL

2.3.1 Clima

El clima es el conjunto de condiciones atmosféricas durante un determinado periodo de tiempo y un lugar o región dados y debido a que se relaciona generalmente con las condiciones predominantes en la atmósfera se puede describir a partir de variables atmosféricas como la temperatura, la precipitación, humedad y vientos que son variables necesarias para el presente proyecto ya que permitirán determinar la eficiencia de sistemas de vegetación que disminuyan el impacto ambiental de las construcción para así lograr un confort térmico en la ciudad de Cartagena (IDEAM, 2014)

El clima de Cartagena presenta dos épocas principales y una de transición; desde mayo hasta diciembre la ciudad se encuentra en una época húmeda o época de lluvias; desde diciembre hasta abril la ciudad se encuentra en una época seca, donde no hay registros de precipitación; y por último, en los meses de junio y julio la ciudad se encuentra en una época de transición donde se presentan lluvias esporádicas y altas temperaturas. La ciudad posee un clima tropical seco y suele ser caluroso todo el año debido a que no hay muchas zonas verdes que permitan la circulación de aire y un ambiente más agradable. (Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias, 2015)

2.3.2 Islas de calor

Las concentraciones de edificaciones en la ciudad que desplazan las zonas verdes por espacios más oscuros como los edificios que absorben el calor del día y lo liberan en la noche creando una acumulación de calor en las ciudades, alterando sus características climáticas y volviéndolas más cálidas que el medio rural que las rodea; efecto conocido como islas de calor. “Las islas de calor en las ciudades se originan por el avance del desarrollo y los cambios en las propiedades térmicas y reflectivas de la infraestructura urbana, así como también por el impacto que tienen los edificios sobre el microclima local. La ubicación geográfica de una ciudad, las variables del clima local y la intensidad de cambios estacionales también afectan su formación.” (Acosta, 2011).

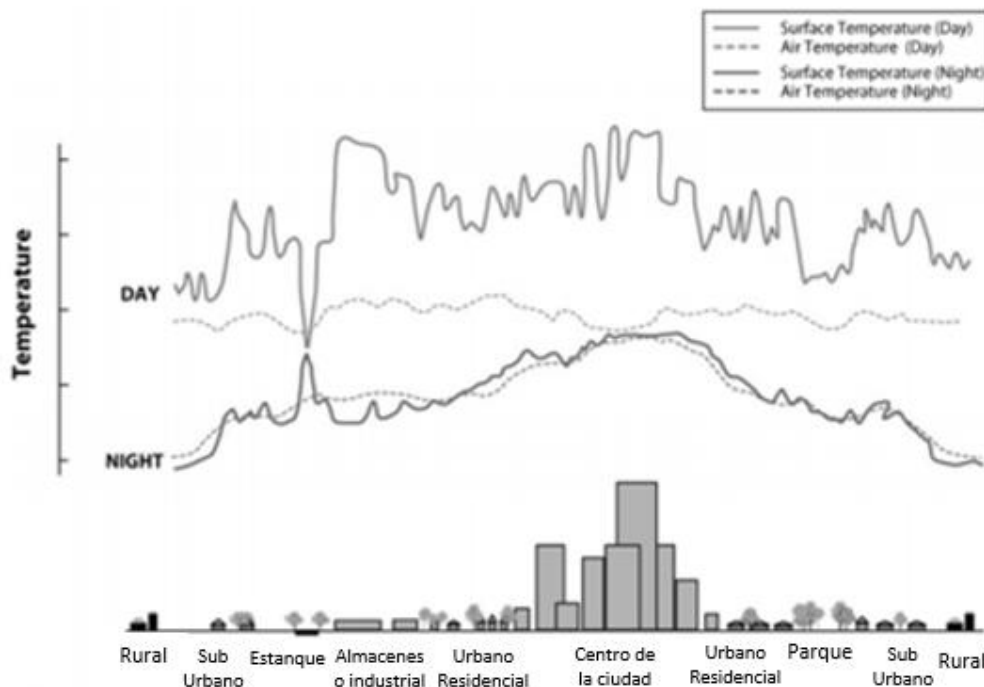


Ilustración 2. Variaciones de la temperatura superficial y atmosférica diurna y nocturna, en diferentes zonas de uso del suelo

Fuentes: Reducing Urban Heat Island: Compendium of Strategies, Voogt, 2000.

“En la ilustración 2 se observa como las temperaturas superficiales varían más Rural is temperaturas del aire durante el día, pero ambas son bastante similares durante la noche. El descenso y aumento en las temperaturas superficiales sobre el estanque, indican como el agua mantiene una temperatura constante día y noche, debido a su alta capacidad calorífica. Colocar vegetación en las superficies urbanas como las envolventes de los edificios, podría mejorar el microclima del entorno urbano, así como el clima local de las ciudades. La magnitud de la disminución de la temperatura debido al uso de la vegetación, depende de las características climáticas, la cantidad de vegetación y la geometría urbana.” (Acosta, 2011). Se puede observar que donde existe gran concentración de edificaciones se produce una isla de calor y la temperatura es más elevada. En la ciudad de Cartagena debido a las grandes construcciones que se llevan a cabo que no cuentan con suficientes espacios verdes y debido al aumento de la población, se ha aumentado la temperatura en los últimos años; por lo cual se debe buscar nuevas alternativas que permitan reducir las temperaturas que se presentan en cada vivienda.

2.3.3 Muro verde

Una fachada vegetal, jardín vertical o muro verde es un sistema constructivo que pretende enverdecer una superficie vertical, ya sea mediante plantas que utilizan la pared vertical como apoyo, pero no obtienen ni agua ni nutrientes de esta o mediante materiales y tecnologías que soportan una variedad de plantas. Se utilizan estos sistemas debido a la necesidad de reducir la contaminación que se presenta en las ciudades a causa de la urbanización masiva y de las grandes cantidades de vehículos que transitan cada día, que producen sustancias nocivas, consumen el oxígeno y sobrecalientan la atmósfera. Así, la masa vegetal presente en los muros crea un colchón de aire que ofrece aislamiento térmico, proporciona sombra a la fachada y absorbe parte de la energía solar en el proceso de fotosíntesis permitiendo reducir las temperaturas dentro de las viviendas (López, 1992).

Tipos de muro verde.

Existen varias formas de clasificar los muros verdes, sin embargo, según las diferentes técnicas constructivas y principales características los sistemas de pared verde generalmente se pueden dividir en dos categorías como fachadas verdes y sistemas e paredes vivas (LWS). Las fachadas verdes se pueden diseñar como directas e indirectas, las directas se basan en el uso de trepadores de hoja perenne o de hoja caduca unidos directamente a la superficie del edificio mientras que las indirectas incluyen una estructura de soporte vertical para el desarrollo de plantas trepadoras que está soportada por enrejados o cables de acero. De esta manera, las plantas son guiadas para desarrollarse a lo largo de la estructura de soporte. Por otro lado, los sistemas de paredes vivas requieren cajas de sembradoras y sistemas de soporte mucho más complejos, como estructuras preelaboradas y prefabricadas, para poder facilitar el crecimiento de la planta, que requiere una nutrición específica en crecimiento al adherirse a las paredes (Cuce, 2016).

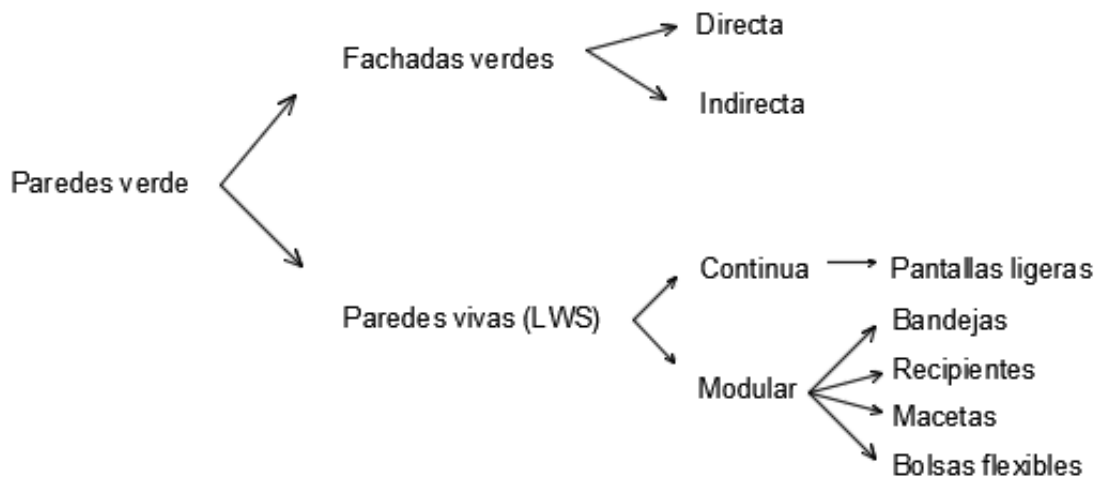


Ilustración 3. Tipos de muros verdes
 Fuente: (Manso & Castro, 2014)

2.3.4 Techo verde

Un techo verde o techo biótico es un sistema constructivo que permite mantener de manera sostenible un paisaje vegetal sobre la cubierta de un inmueble mediante una adecuada integración entre el inmueble, la vegetación escogida, el medio de crecimiento diseñado y los factores climáticos y ambientales. Al igual que los muros verdes, los techos verdes permiten reducir la temperatura de la vivienda y la contaminación en el ambiente.

Tipos de techo verde.

Se clasifican de acuerdo a la tecnología empleada como: sistema tipo multicapa monolítico, multicapa elevado, receptáculo, monocapa y aeropónicos. El sistema multicapa monolítico consiste en apoyar directamente sobre el techo impermeabilizado varias capas de componentes especializados que tienen continuidad horizontal. El sistema multicapa elevado consiste en capas especializadas apoyadas sobre pedestales que elevan el sistema del techo impermeabilizado. El sistema receptáculo consiste en apoyar sobre el techo impermeabilizado recipientes individuales que alojan el medio de crecimiento y la vegetación. El sistema tipo monocapa son tapetes presembrados que incorporan una sola capa de componentes estables y activos y por último el sistema aeropónico en el cual las plantas



no se encuentran en un sustrato o medio sólido y la nutrición se realiza por medio de irrigación directa en forma de líquido o vapor a las raíces expuestas de las plantas. Por otro lado, los techos verdes también se pueden clasificar por su propósito y uso como: techo verde autorregulado, ajardinado o huerta. Un techo verde autorregulado tiene como función propiciar las condiciones técnicas y fisiológicas óptimas para mantener la cobertura vegetal preestablecida sobre el inmueble a intervenir usando un mínimo de materiales, inversión económica y peso. Para un techo verde ajardinado su propósito es crear un espacio paisajístico transitable para uso recreativo o de contemplación y por último el techo huerta que tiene como característica principal la producción agrícola. También se pueden clasificar de acuerdo a la robustez de sistema como livianos, moderados o robustos, dependiendo del peso del sustrato. Los techos verdes absorben los rayos del sol que llegan a la cubierta del techo, permitiendo una disminución de la temperatura aún mayor en la habitación que se encuentre bajo éste, pero requiere de acceso al techo por parte de las personas para poder suministrar agua en épocas de sequía (secretaría distrital de ambiente de Bogotá, 2011).

2.3.5 Confort térmico

El confort térmico se define como la manifestación subjetiva de conformidad o satisfacción con el ambiente térmico existente; es decir, un estado de confort térmico se refiere a una sensación de comodidad que le permite a las personas llevar a cabo las actividades convencionales sin limitaciones por factores como la temperatura, calidad del aire, humedad (López et al., 2015).

2.3.6 Factores relacionados con el confort térmico

El confort térmico de los ocupantes dentro de las edificaciones depende del equilibrio térmico del cuerpo. El equilibrio térmico del cuerpo se ve afectado por dos grupos principales de factores: personales y ambientales. Según la ASHRAE 55 (2017), existen seis factores principales al definir las condiciones para el confort térmico, estos son: tasa metabólica, aislamiento de ropa, temperatura del aire, temperatura radiante, velocidad del aire y humedad. Los primeros dos factores son características de los ocupantes, y los cuatro factores restantes son condiciones del entorno térmico. Varios otros factores secundarios afectan la comodidad en algunas circunstancias.

Factores personales.

Representan las características de los ocupantes, definidos de la siguiente manera:

Aislamiento de la ropa (o nivel de ropa) I_{cl} : Es la resistencia a la transferencia de calor sensible que proporciona un conjunto de prendas de vestir. Se describe como el aislamiento intrínseco de la piel a la superficie de la prenda, sin incluir la resistencia proporcionada por la capa de aire alrededor del cuerpo vestido; usualmente se expresa en unidades clo. $1clo = 0.155 (m^2 * °C/W)$. El I_{cl} que brindan los conjuntos de prendas se puede estimar sumando los valores de aislamiento de cada prenda I_{clu} como se describe en la *tabla 3*. Los valores de aislamiento para los conjuntos seleccionados se pueden calcular con la *ecuación 1* (NTC 5316, 2004).

$$I_{cl} = \sum I_{clu} \text{ de cada prenda. } \textit{Ecuación 1.}$$

Tasa de calor metabólico o nivel de actividad: es la producción neta de calor del cuerpo humano en un período de tiempo determinado, o la tasa de transformación de la energía química en calor y trabajo mecánico por actividades aeróbicas y anaeróbicas dentro del cuerpo, en unidades cumplidas. Se expresa en unidades met, donde $1met = 58.2 (W/m^2)$. Su valor siempre es positivo porque el cuerpo siempre produce calor. La *tabla 4* presenta algunos niveles de producción metabólica con algunas actividades comunes (NTC 5316, 2004).

Tabla 3. Valores de aislamiento de prendas

Descripción de la prenda	Iclu (clo)	Descripción de la prenda	Iclu (clo)
ropa interior		calzado	
sostén	0,01	medias atléticas tobilleras	0,02
panties	0,03	media pantalón/calcetines	0,02
pantaloncillos	0,04	sandalias/abarcas	0,02
camisetas	0,08	zapatos	0,02
media combinación	0,14	pantuflas acolchadas forradas con peluche	0,03
calzoncillos largos	0,15	medias a la pantorrilla	0,03
combinación con sosten	0,16	medias a la rodilla (gruesas)	0,06
camisetas interiores de manga larga	0,20	botas	0,10
pantalones y enterizos		vestidos y faldas	
pantalinetas	0,06	falda delgada	0,14
bermudas	0,08	falda gruesa	0,23
pantalones rectos delgados	0,15	sin mangas cuello escotado delgado	0,23
pantalones rectos gruesos	0,24	sin mangas cuello escotado grueso	0,27
pantalones de sudadera	0,28	camisola de manga corta delgada	0,29
overoles	0,30	camisola de manga larga delgada	0,33
enterizos	0,49	camisola de manga larga gruesa	0,47
blusas y camisas		chalecos y chaquetas de vestido	
blusas escotadas sin mangas	0,13	chaleco sin mangas delgado	0,10
camiseta polo manga corta	0,17	chaleco sin mangas grueso	0,17
blusa de vestido para manga corta	0,19	recto delgado	0,36
blusa de vestido para manga larga	0,25	recto grueso	0,42
camisa en franela de manga larga	0,34	cruzado delgado	0,44
camiseta sudadera manga larga	0,34	cruzado grueso	0,48
súeteres		ropa de dormir y tunicas	
chaleco sin mangas delgado	0,13	bata de dormir corta sin mangas delgada	0,18
chaleco sin mangas grueso	0,22	bata de dormir larga sin mangas delgada	0,20
manga larga delgado	0,25	piyama de manga corta delgada	0,42
manga larga grueso	0,36	piyama de manga larga gruesa	0,57

Fuente: (ASHRAE Handbook, Fundamentals, 2017).

Tabla 4. Tasa metabólica para tareas típicas.

Actividad	met	W/m ²	Btu/h . pie ²
Estar reclinado	0,8	46,6	14,8
Estar sentado y quieto	1	58,2	18,4
Actividad sedentaria (oficina, vivienda, laboratorio, escuela)	1,2	69,8	22,1
De pie, relajado	1,2	69,8	22,1
Actividad ligera, de pie (compras, laboratorio, industria liviana)	1,6	93,1	29,5
Actividad media, de pie (tienda, trabajo domestico, trabajo con maquinas)	2	114,4	36,9
Actividad alta (trabajo pesado con maquinas, trabajo de taller)	3	174,6	55,3

Fuente: (NTC 5316, 2004).

Parámetros ambientales.

La razón para usar estos parámetros es que el sistema termorregulador humano es adecuado para crear un equilibrio térmico dentro de los factores ambientales.

La velocidad del aire (m/s): es la velocidad del movimiento del aire a una distancia dada a lo largo del tiempo. La velocidad del aire puede producir molestias cuando es superior a 40 pies / min (es decir, 0,2032 m / s) o cuando las temperaturas frías se combinan con cualquier movimiento de aire. (Enescu, 2017)

La humedad relativa (HR): es la relación entre la presión de vapor de agua medida (real) en el aire y la cantidad máxima de presión de vapor de agua contenida por el aire a una temperatura conocida. Normalmente se expresa en porcentaje. (NTC 5316, 2004).

Temperatura del aire (t_a): es la temperatura de bulbo seco del aire que rodea al ocupante. (NTC 5316, 2004).

Temperatura operativa (t_o): la temperatura uniforme de un cerramiento negro imaginario en el que un ocupante intercambiaría la misma cantidad de calor por radiación más convección, que en un ambiente no uniforme real. Se puede estimar del aire medido t_a y las temperaturas radiantes medias \bar{t}_r mediante la relación:

$$t_o = at_a + (1 - a)\bar{t}_r \quad \text{Ecuación 2.}$$

En donde el factor de ponderación (a) depende de la velocidad del aire (v)

Tabla 5. Factores de ponderación en función de la velocidad del aire.

v (m/s)	0-0.2	0.2-0.6	0.6-1.0
v (fpm)	0- 40	40-120	120-200
a (m/s)	0.5	0.6	0.7

Fuente: (ANSI/ASHRAE 55), 2017.

Temperatura radiante media \bar{t}_r : Es la temperatura uniforme de un recinto imaginario en el cual la transferencia de calor radiante del cuerpo humano es igual a la transferencia de calor radiante en el recinto no uniforme real. La temperatura radiante media \bar{t}_r se puede estimar con exactitud razonable utilizando la metodología establecida en el apéndice C de la NTC 5316 correspondiente a las temperaturas superficiales medidas en un recinto y los factores de ángulo establecidos para una persona, empleando la siguiente ecuación:

$$\bar{t}_r = F_{p-1}t_1 + F_{p-2}t_2 + \dots + F_{p-N}t_N \quad \text{Ecuación 3}$$

t_N = Temperatura de la superficie N (°C o °F)

\bar{t}_r, t_N = Están en términos de temperatura absoluta (K= °C+278 ó R= °F+460)

F_{p-N} =Factor angular de persona a superficie N. Se puede estimar de la ilustración 4 y 5.

$$F_{p-1} + F_{p-2} + \dots + F_{p-N} = 1 \quad \text{Ecuación 4}$$

Para determinar los factores angulares se tendrá en cuenta las ilustraciones 4, 5, 6 y 7 para cuando se conoce la ubicación de la persona, pero no la orientación estando en una posición sentada y de pie.

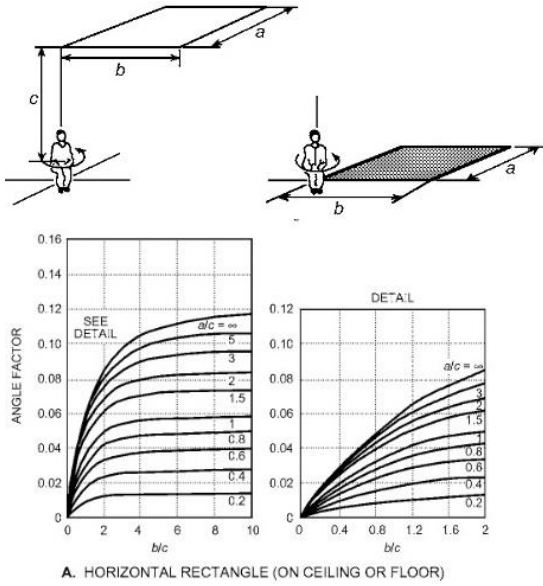


Ilustración 4. Valor medio del factor angular entre una persona sentada y un rectángulo horizontal cuando la persona es girada alrededor de un eje vertical.

Fuente: (ASHRAE Handbook, Fundamentals, 2017).

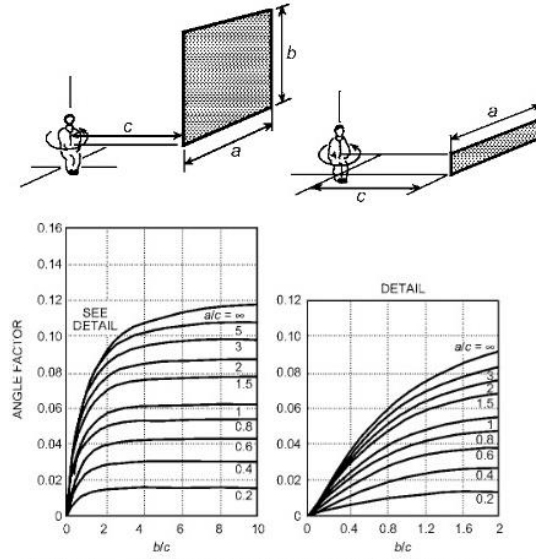


Ilustración 5. Factor angular entre una persona sentada y un rectángulo horizontal cuando la persona es girada alrededor de un eje vertical.

Fuente: (ASHRAE Handbook, Fundamentals, 2017)

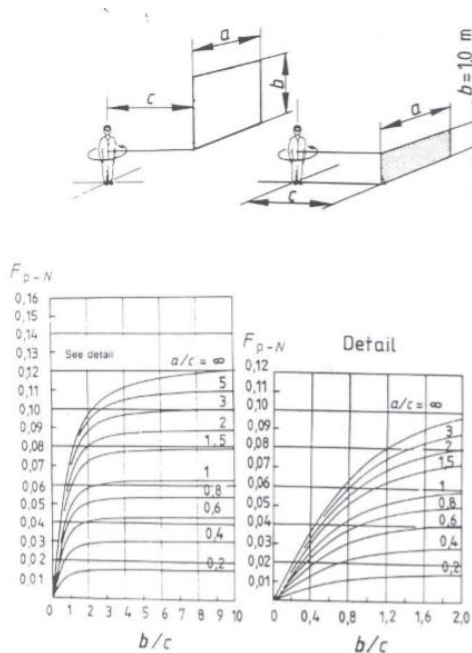


Ilustración 6. Valor medio del factor angular entre una persona de pie y un rectángulo vertical cuando la persona es girada alrededor de un eje vertical.

Fuente: (ASHRAE Handbook, Fundamentals, 2017).

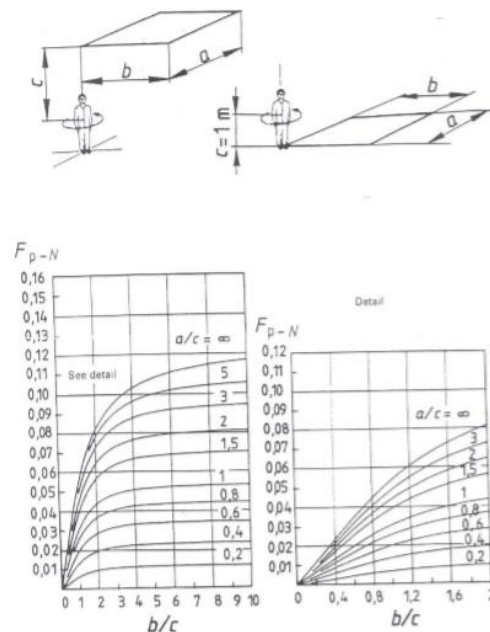


Ilustración 7. Valor medio del factor angular entre una persona de pie y un rectángulo horizontal cuando la persona es girada alrededor de un eje vertical.

Fuente: (ASHRAE Handbook, Fundamentals, 2017).

También se puede hallar el factor angular por medio de la ecuación (5)

$$\text{Factor angular} = F_{max} \left(1 - e^{-\frac{a/c}{\tau}}\right) \left(1 - e^{-\frac{b/c}{\gamma}}\right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde

$$\tau = A + B(a/b) \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\gamma = C + D(b/c) - E(a/c) \quad \text{Ecuación 7}$$

Para calcular estas ecuaciones se tendrán en cuenta los coeficientes que aparecen en la tabla número 6.

Tabla 6. Ecuaciones para el cálculo de los factores angulares.

	F_{max}	A	B	C	D	E
Persona sentada. Superficies verticales: pared, ventana.	0,118	1,216	0,169	0,717	0,087	0,052
Persona sentada. Superficies horizontales: piso, techo	0,116	1,396	0,130	0,951	0,080	0,055
Persona de pie. Superficies verticales: pared, ventana.	0,120	1,242	0,167	0,616	0,082	0,051
Persona de pie. . Superficies horizontales: piso, techo	0,116	1,595	0,128	1,226	0,046	0,044

Otros factores: Además de los factores indicados anteriormente, hay entradas adicionales que afectan el confort térmico y la disipación de calor del cuerpo, como alimentos y bebidas, aclimatación, forma, grasa subcutánea, edad y sexo, y estado de salud. Para el análisis del confort térmico, los factores indicados se transforman en parámetros cuantitativos, asociados con los valores recomendados o vinculados a través de ecuaciones apropiadas.

2.3.7 Enfoques de confort térmico

En general, el confort térmico se clasifica en función del tipo de entorno: exterior, semi exterior o interior. En términos de confort térmico interior, coexisten dos enfoques diferentes para la definición del confort térmico: el enfoque racional y el enfoque adaptativo. El enfoque racional utiliza datos de estudios de cámaras climáticas para respaldar su teoría, mejor

caracterizada por los trabajos de Fanger, mientras que el enfoque adaptativo utiliza datos de estudios de campo de personas en edificios. (Djongyang et al., 2010)

El enfoque racional o de equilibrio térmico: El enfoque de equilibrio térmico se basa en los experimentos de Fanger en una cámara de clima controlado en 1296 jóvenes estudiantes, utilizando un modelo de transferencia de calor en estado estable. Los participantes se vistieron con ropa estandarizada y completaron actividades estandarizadas, mientras estaban expuestos a diferentes ambientes térmicos. Estos registraron qué tan calientes o fríos se sentían, utilizando la escala de sensación térmica de siete puntos que va desde frío (-3) a caliente (+3) con neutral (0) en el medio. En otros estudios, los participantes controlaron el ambiente térmico ellos mismos, ajustando la temperatura hasta que se sintieron térmicamente "neutros". El modelo de Fanger combina las teorías del equilibrio térmico con la fisiología de la termorregulación para determinar un rango de temperaturas de confort que los ocupantes de los edificios encontrarán cómodos. Fanger utilizó datos de estudio para desarrollar una relación lineal entre el nivel de actividad y la tasa de sudoración. También realizó un estudio para derivar una relación lineal entre el nivel de actividad y la temperatura media de la piel. Después de sustituir estas dos relaciones lineales en ecuaciones de equilibrio térmico, Se obtuvo una 'ecuación de confort'. La ecuación de confort predice condiciones en las que los ocupantes se sentirán térmicamente neutros. (Djongyang et al., 2010). El modelo de Fanger tiene como objetivo predecir la sensación térmica media de un grupo de personas y su respectivo porcentaje de insatisfacción con el entorno térmico., expresado a través de los índices Promedio de votos pronosticado Porcentaje insatisfecho PMV-PPD (Forgiarini et al., 2015). Además de Fanger se han realizado amplios estudios para evaluar el confort térmico utilizando cámaras de prueba; por ejemplo, Tanabe et al. en Japón, Chung y Tong en Hong Kong, De Dear y Leow en Singapur, entre otros (Djongyang et al., 2010).

Enfoque adaptativo: Se basa en el principio adaptativo "Si ocurre un cambio como para producir molestias, las personas reaccionan de maneras que tienden a restaurar su confort". Los usuarios son activos y no pasivos en relación con su entorno térmico. El modelo adaptativo se basa en estudios de campo en edificios con ventilación natural realizados por Nicol y Humphreys, Auliciems, de Dear, Brager y Cooper, y de Dear y Brager. A partir de los estudios de campo, se establecieron regresiones lineales que relacionan las temperaturas

operativas interiores con las temperaturas del aire exterior predominantes. Los estudios de campo también permiten el análisis de otros factores distintos de los que pueden simularse en las cámaras, ya que los sujetos brindan respuestas en sus hábitats cotidianos, visten su vestimenta cotidiana y se comportan sin restricciones adicionales. Este fue un cambio de paradigma en comparación con la teoría de Fanger. El modelo adaptativo se basa en tres aspectos interrelacionados, que no se tienen plenamente en cuenta en estudios de cámara climática: psicológico, referente a la expectativa de comodidad y habituación en relación con el clima interior y exterior; conductual, relacionado con la apertura de ventanas además del uso de persianas, ventiladores y puertas; y fisiológicos, en lo relativo a la aclimatación. (Forgiarini et al., 2015).

2.3.8 Estándares de confort térmico

Actualmente se encuentran diversos estándares que se emplean en la evaluación del confort térmico en espacios interiores, a continuación se hace mención a los citados generalmente en trabajos de investigación y revisiones bibliográficas relacionados al análisis del confort térmico.

Norma internacional de confort térmico ISO 7730: Se publicó por primera vez en 1984 e introdujo el modelo de confort Fanger en la estandarización. Este estándar presenta las ecuaciones para calcular los índices de confort térmico de Fanger PMV y PPD. También ofrece métodos para evaluar las molestias térmicas locales causadas por la radiación asimétrica, las corrientes de aire y la diferencia vertical de temperatura del aire. La norma fue revisada en 1994 y nuevamente en 2005. Sin embargo, la teoría del confort adaptativo todavía está ausente en esta última revisión. (Carlucci et al., 2018)

Norma de confort térmico adaptativo ANSI / ASHRAE 55: La norma ANSI / ASHRAE 55 proporciona requisitos mínimos para entornos térmicos interiores aceptables y ayuda a los ingenieros a evaluar las condiciones generales de confort térmico en un edificio. Fue publicado por primera vez en 1966 y posteriormente revisado en 1974, 1981, 1992, 2004, 2010, 2013 y más recientemente en 2017 (Carlucci et al., 2018).

La norma europea EN 15251: Especifica los parámetros ambientales interiores para el entorno térmico, la calidad del aire interior, la iluminación y la acústica; además del diseño

y cálculos de rendimiento energético. Se publicó por primera vez en 2007 e incluía tanto el modelo PMV / PPD como el método de confort adaptativo desarrollado a partir del proyecto europeo SCAT. En 2015 se publicó un proyecto de revisión de la norma EN 15251 y se renombró con el código prEN 16798-1 (Carlucci et al., 2018).

Países Bajos ISSO 74 documento regulador de confort térmico: La teoría del confort térmico adaptativo fue la base del documento normativo holandés ISSO 74. Se puede aplicar tanto en espacios acondicionados como no acondicionados. Se publicó por primera vez en 2004 y posteriormente se revisó en 2014. En la versión de 2014, la ecuación de confort adaptativo se desarrolló a partir de la base de datos de estudio de campo de confort europeo SCAT, los requisitos de temperatura se dividieron en cuatro clases (es decir, A, B, C y D) y la temperatura de referencia exterior se define como se recomienda en la norma EN 15251 (Carlucci et al., 2018).

Estándar chino de confort térmico GB / T 50785: Se emitió en 2012 para proporcionar un modelo de confort adaptativo para la evaluación del entorno térmico interior en edificios de funcionamiento libre en las etapas de diseño y operación. Incluye dos métodos para evaluar edificios libres: un método gráfico y un método de cálculo. El método gráfico se basa en el modelo de confort adaptativo que aparece en ANSI / ASHRAE 55-2004. El método de cálculo del estándar chino se basa en el llamado índice de voto medio adaptativo predicho (aPMV) que fue desarrollado por Yao, Li. La ecuación para calcular aPMV corrige el voto medio previsto de Fanger (PMV) con un denominado coeficiente adaptativo (Carlucci et al., 2018).

2.3.9 Índice (PMV-PPD)

El voto medio previsto (PMV): El índice PMV sugerido por Fanger predice la respuesta media de un gran grupo de personas de acuerdo con la escala de sensación térmica. A los sujetos expuestos a las cámaras climáticas se les pide que den su opinión de acuerdo con la escala de siete puntos de sensación térmica. El PMV se calcula a través de seis variables: metabolismo, vestimenta, temperatura del aire interior, temperatura radiante media interior, velocidad del aire interior y humedad del aire interior. El método PMV fue la base de las

normas ISO 7730 y ASHRAE 55 y todavía se usa en la práctica. Fanger relacionó el PMV con el desequilibrio entre el flujo de calor real de un cuerpo humano en un entorno dado y el flujo de calor requerido para una comodidad óptima en una actividad específica mediante la siguiente ecuación:

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.028]L \quad \text{Ecuación 8}$$

L es la carga térmica en el cuerpo, definida como la diferencia entre la producción de calor interno y la pérdida de calor en el entorno real para una persona en el nivel de actividad real.

$$L = (M - W) - 3.05 * 10^{-3}[5733 - 6.99(M - W) - P_a] - 0.42[(M - W) - 58.15] - 1.7 * 10^{-5}M(5867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 * 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} * h_c(t_{cl} - t_a) \quad \text{Ecuación 9}$$

. Como parte de este cálculo, la temperatura de la ropa t_{cl} se encuentra por iteración como:

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} * \{3.96 * 10^{-8}f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} * h_c(t_{cl} - t_a)\} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38|t_{cl} - t_a|^{0.25} & \text{para } 2.38|t_{cl} - t_a|^{0.25} > 12.1\sqrt{v} \\ 12.1\sqrt{v} & \text{para } 2.38|t_{cl} - t_a|^{0.25} < 12.1\sqrt{v} \end{cases} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290I_{cl} & \text{para } I_{cl} \leq 0.078 \text{ m}^2 \text{ K/W} \\ 1.05 + 0.645I_{cl} & \text{para } I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2 \text{ K/W} \end{cases} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde

M Es la tasa metabólica, vatios por metro cuadrado (W/m^2);

W Es la potencia mecánica efectiva, en vatios por metro cuadrado (W/m^2);

I_{cl} Es el aislamiento de la ropa, en metros cuadrados kelvin por vatio ($m^2 * K/W$);

f_{cl} Es el factor de superficie de la ropa;

t_a Es la temperatura del aire, en grados Celsius ($^{\circ}C$);

\bar{t}_r Es la temperatura radiante media, en grados Celsius ($^{\circ}C$);

v Es la velocidad relativa del aire, en metros por segundo (m/s);

P_a Es la presión parcial del vapor de agua, en pascales (Pa)

h_c Es el coeficiente de transmisión del calor por convección, en vatios por metro cuadrado kelvin [$W/(m^2 * K)$]

t_{cl} Es la temperatura de la superficie de la ropa, en grados Celsius ($^{\circ}C$).

Nota: 1 unidad metabólica = 1met = 58.2 (W/m^2); 1unidad de ropa = 1clo = 0.155 ($m^2 * ^{\circ}C/W$).

(ASHRAE Handbook, Fundamentals, 2017).

Porcentaje estimado de insatisfechos (PPD)

El PMV predice el valor medio de los votos sobre la sensación térmica que emitiría un grupo numeroso de personas sometidas al mismo ambiente. No obstante, los votos individuales están dispersos alrededor del valor medio, siendo útil el poder estimar el número de personas que, probablemente sentirán incomodidad debida al calor o al frio (ISO 7730, 2005).

El PPD es un índice que establece una predicción cuantitativa del porcentaje de personas que se sentirán insatisfechas por notar demasiado calor. Para el propósito de esta norma internacional, las personas térmicamente insatisfechas son aquellas que votaran muy caluroso, caluroso, fresco, o frio, sobre la escala de 7 niveles de sensación térmica incluida en la *tabla 7* (ISO 7730, 2005).

Una vez determinado el valor del PMV, se calcula el PPD utilizando la *ecuación 13*

$$PPD = 100 - 95 * \exp(-0.03353PMV^4 - 0.2179PMV^2) \text{ Ecuación 13}$$

Tabla 7 Escala de sensación térmica de 7 niveles.

+ 3	Muy caluroso
+ 2	Caluroso
+ 1	Ligeramente caluroso
0	Neutro
- 1	Ligeramente fresco
- 2	Fresco
- 3	Frío

Fuente: (ISO 7730, 2005)

2.4 MARCO LEGAL

En Colombia los principales aportes en el marco legislativo relacionados a sistemas de ecologización, se han desarrollado en la ciudad de Bogotá a través de normativas como: acuerdo 418 (2009), resolución 6423 (2011) y resolución 1305 (2013). El acuerdo 418 de 2009 promueve la implementación de tecnologías arquitectónicas sustentables como techos o terrazas verdes como medida de adaptación y mitigación del cambio climático. En la resolución 6423 de 2011 se adopta una Guía Técnica de Techos Verdes, como una herramienta, que establecerá los requerimientos técnicos y practicas recomendadas para la correcta aplicación de tecnologías de techos verdes en Bogotá D.C. En la resolución 6619 de 2011 se establecieron las características y condiciones para el diseño e implementación de jardines verticales, esta fue revocada posteriormente por la resolución 1305 de 2013.

En lo relativo al confort térmico, el Instituto de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC por medio de la NTC 5316 (2004), establece las condiciones térmicas ambientales de inmuebles para personas, basados en el estándar ASHRAE 55 (1992). La NTC 5316 especifica las combinaciones de los factores ambientales y personales que producirán un confort térmico interior aceptable para al menos al 80% de los ocupantes. El criterio de evaluación consiste en analizar por medio de tablas psicométricas los parámetros de temperatura, radiación térmica humedad y velocidad del aire para valores establecidos de ropa en verano o invierno, en personas sedentarias o activas, con el fin de establecer si se encuentran dentro de la zona de confort térmico.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar si una unidad habitacional con muro verde construido de botellas PET (Tereftalato de polietileno), mejora el confort térmico en comparación con una de techo verde utilizando parámetros ambientales y personales, para justificar su aplicación en viviendas de la ciudad de Cartagena.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el comportamiento de cinco tipos de vegetación expuestas al sol y sin suministro de agua, para seleccionar los dos tipos que mejor se adapten a tales condiciones
- Determinar cuál es la vegetación más adecuada de 2 especies comunes de clima tropical, que permita una mayor disminución de temperatura en una unidad habitacional de muro verde.
- Evaluar alternativas para la orientación del muro verde en las distintas fachadas de una vivienda unifamiliar.

4 ALCANCE

El presente estudio se realizó en la ciudad de Cartagena perteneciente al departamento de Bolívar, específicamente en el campus Piedra de Bolívar de la universidad de Cartagena; lugar donde se encuentran actualmente construidas dos unidades habitacionales de 9m2 donde se llevó a cabo el proyecto. Una unidad contó con un techo verde construido por el Semillero de Investigación de Modelación Ambiental (SIMA) y la otra unidad contó con un muro verde con botellas PET construido por los autores del presente proyecto y financiado por el mismo semillero.

El proyecto se desarrolló entre el segundo semestre del año 2019 y el primer periodo del 2020 durante un periodo de seis meses. Se ejecutó una fase de investigación y recolección de información secundaria, una fase de construcción y cultivo del muro, por último, una fase de registro de datos y análisis de resultados.

Las variables ambientales necesarias para determinar el grado de confort térmico corresponden a factores ambientales como: la temperatura ambiente, temperatura operativa, temperatura radiante media, temperatura superficial, radiación térmica, humedad y velocidad del aire y factores personales que están relacionados con la actividad y el vestuario. Se determinaron mediante equipos de medición como termómetro láser, estación meteorológica, anemómetro además de ecuaciones y parámetros establecidos por la norma.

Se espera que el sistema de muro verde con botellas PET sea igual de eficiente en comparación con un techo verde para reducir la sensación de calor en el interior de la unidad, comprobando que es válida su aplicación en la construcción de viviendas debido a que reduce costos y utiliza materiales reciclables permitiendo también reducir la contaminación.

Al final del estudio se presentará el registro de parámetros medidos en función del tiempo, el cual será la base para elaborar una representación gráfica de como varían los parámetros medidos; además se especificará el sistema constructivo utilizado y el presupuesto empleado para su aplicación según los precios de la ciudad de Cartagena.

En las *ilustraciones 8 y 9* se puede observar la ciudad y la universidad donde estará ubicado el proyecto. Se puede observar con una estrella roja el lugar exacto donde están ubicadas las

unidades habitacionales requeridas para llevar a cabo las mediciones del proyecto; las coordenadas de la universidad son 10°24'10"N 75°30'21"O.

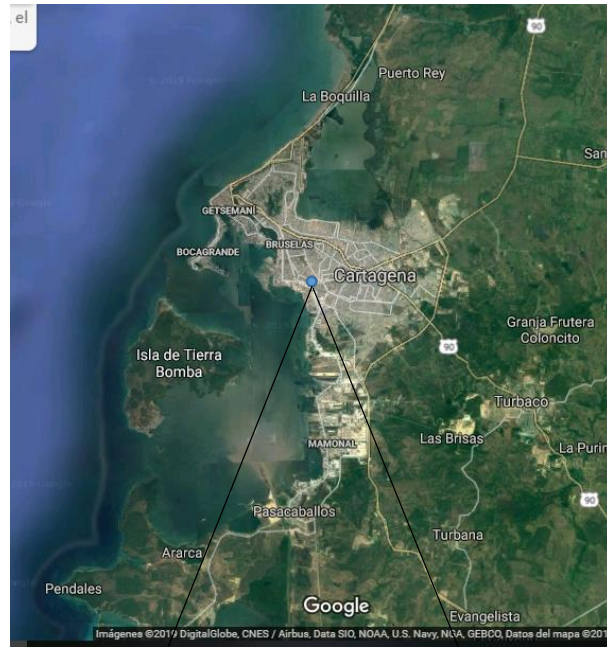


Ilustración 8. Ubicación geográfica, Ciudad de Cartagena, Colombia.
Fuente: Google Maps (2019)



Ilustración 9. Ubicación geográfica. Universidad de Cartagena, Colombia.
Fuente: Google Maps (2019)



Debido a que el tiempo para la realización del proyecto fue sólo de 14 semanas se tomaron pocas medidas para cada uno de los escenarios que, tenidos en cuenta si el tiempo fuese mayor se podría tomar más mediciones y los resultados serían más precisos, de igual forma si el tiempo fuese mayor la vegetación crecería más y al tener más follaje permitiría una mayor reducción de la temperatura al tener menos superficies expuestas a los rayos del sol en forma directa.

Se espera que esta investigación sea un incentivo para la construcción sostenible en la ciudad de Cartagena de indias y que inicien más proyectos de techos y muros verdes que permitan disminuir el impacto ambiental que tienen las construcciones, de igual forma se espera que sirva de base para nuevos proyectos que permitan la utilización de materiales reciclables para disminuir la contaminación.

5 METODOLOGÍA

El tipo de investigación realizada es de carácter experimental, que corresponde a la toma de datos en las unidades habitacionales ubicadas en la Universidad de Cartagena, campus piedra de bolívar. Una de las unidades cuenta con un techo verde y la otra unidad cuenta con un muro verde.

Para la realización del proyecto se tomaron los datos de distintos escenarios para encontrar el adecuado que permita una mayor reducción de temperatura, en cada uno de estos escenarios se variaron las condiciones para poder compararlos entre sí.

Se varió la ubicación del muro verde en tres fachadas de la unidad habitacional, la fachada este, oeste y sur, que son las fachadas con una mayor incidencia del sol durante el día y por consiguiente las que se calientan más. También se varió la vegetación presente en el muro, la vegetación utilizada se eligió de las dos mejores alternativas de un grupo de cinco especies comunes que resistan más tiempo el sol sin marchitarse y que pudieran cubrir de una mejor forma las botellas plásticas; este ensayo es descrito más adelante. Por otro lado, el techo verde no tuvo ninguna variación durante el tiempo del ensayo.

De esta forma, se registraron los datos para seis escenarios de muro verde, lo que permitirá obtener el mejor que pueda ser aplicado a una vivienda de interés social. Los escenarios quedaron de la siguiente forma:

Tabla 8. Escenarios planteados para la realización del proyecto.

Escenarios	Vegetación		Ubicación		
	Vegetación 1	Vegetación 2	Este	Oeste	Sur
1	x			x	
2	x				x
3	x		x		
4		x			x
5		x	x		
6		x		x	

Fuente: (Barón & Navarro, 2019)

En cada uno de los escenarios descritos anteriormente, el techo verde no sufrió ninguna variación para poder comparar cada una de las condiciones con un ítem estándar. Siguiendo lo especificado en la *tabla 8*, el primer escenario para la toma de datos será con la Vegetación 1 ubicado en la fachada Oeste vs techo verde, el segundo escenario será con la Vegetación 1 ubicada en la fachada Sur vs teco verde, el tercer escenario será con la Vegetación 1 ubicada en la fachada Este vs techo verde, el cuarto escenario será con la Vegetación 2 ubicada en la fachada Sur vs techo verde, el quinto escenario será con la Vegetación 2 ubicada en la fachada Este vs techo verde y por último el sexto escenario será con la Vegetación 2 ubicada en la fachada Oeste vs techo verde. Para cada uno de estos escenarios se tomó tres días de medidas.

5.1 UNIDADES HABITACIONALES

Las unidades habitacionales están ubicadas en la universidad de Cartagena y fueron construidas por el semillero de investigación de modelación ambiental (SIMA), tienen una dimensión de 3mx3m y su fachada principal está orientada en sentido norte para reducir el impacto del sol, se emplearon bloques de tierra para su construcción utilizando una máquina de prensado manual que cuenta con un molde macizo de dimensiones 30x15x10cm. El techo verde se construyó en una sola unidad por el mismo semillero y tiene un área de 6m². El muro verde fue construido en la otra unidad con un área de 6m² por los autores del presente documento.

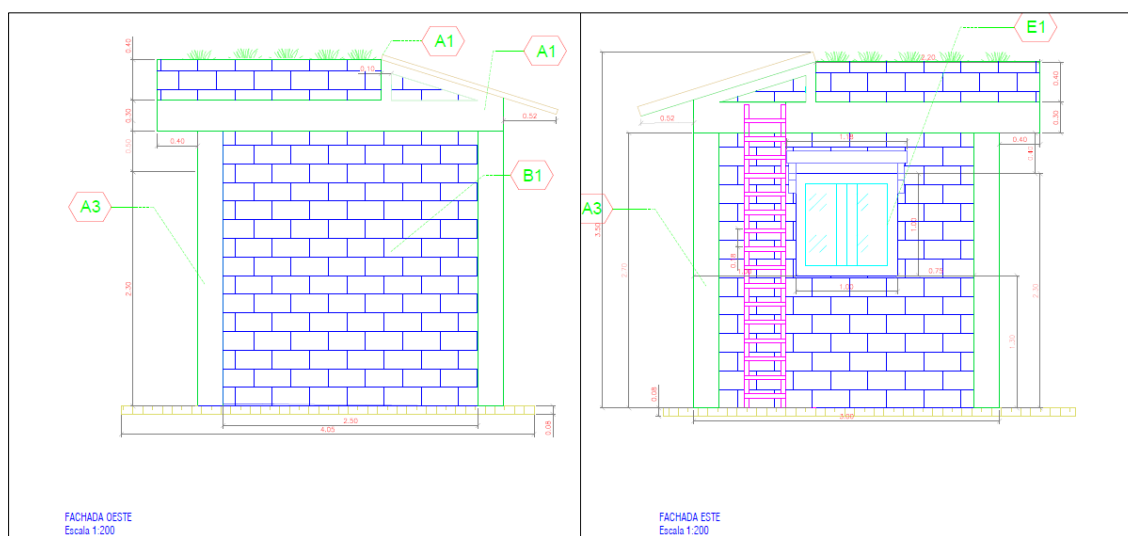


Ilustración 10. Planos arquitectónicos de las unidades. Fachada OESTE y fachada ESTE
 Fuente: “Aplicación de la bioconstrucción en una unidad habitacional, enfocada en el mejoramiento de la eficiencia energética en la ciudad de Cartagena, 2019”

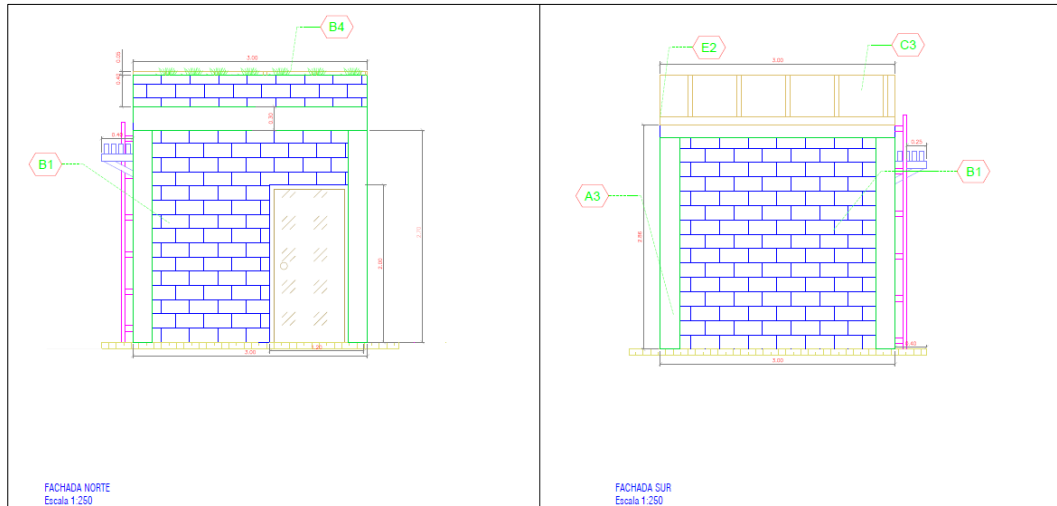


Ilustración 11. Planos arquitectónicos de las unidades. Fachada NORTE y SUR

Fuente: “Aplicación de la bioconstrucción en una unidad habitacional, enfocada en el mejoramiento de la eficiencia energética en la ciudad de Cartagena, 2019”



Ilustración 12. Fachada Norte de la unidad habitacional
Fuente: (Barón & Navarro, 2019)



Ilustración 13. Fachada este de la unidad habitacional
Fuente: (Barón & Navarro, 2019)

5.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TECHO VERDE

El techo verde fue construido con anterioridad por el semillero de investigación de modelación ambiental (SIMA). Para su construcción se siguió las especificaciones descritas en la guía de techos verdes de la ciudad de Bogotá (2011). Se empleó un sistema con tecnología de tipo multicapa monolítico que consiste en apoyar en el techo impermeabilizado varias capas de componentes especializados, lo cual da como resultado un sistema que actúa como una unidad. Debido que no hay un acceso permanente al techo verde se diseñó autoregulado, es decir, que tenga condiciones óptimas para mantener la cobertura vegetal sin necesidad de riego permanente, para esto se eligió una planta típica de la región conocida como Duranta, esta planta puede durar hasta 15 días sin agua sin marchitarse (De Pombo & Gonzales, 2016). Se instaló una capa de drenaje que cuenta con unos espacios donde almacenar una pequeña cantidad de agua que servirá como reserva para la vegetación y de igual forma permitirá que salga el exceso de agua del sistema. Debido a que la planta elegida no crece mucho y sus raíces no son muy extensas se eligió un sistema liviano, este tipo de sistemas cuenta con una carpeta vegetal especializada resistente a condiciones ambientales extremas con altura máxima de 20cm, la altura elegida para la construcción del techo fue de 12cm pues permite un correcto crecimiento de la vegetación.

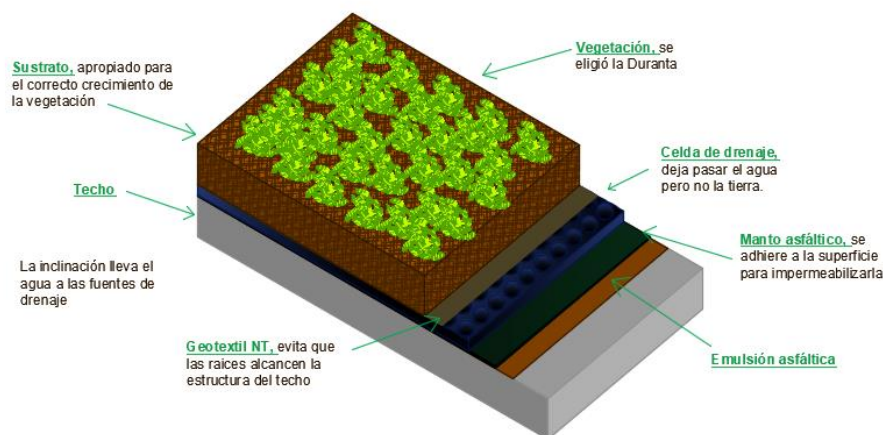


Ilustración 14. Composición de Techo verde
 Fuente: (Barón & Navarro, 2019)

En la ilustración 14 se puede observar las capas presentes en la construcción del techo verde, de igual forma se instaló una tubería para drenar el exceso de agua lluvia en el techo, luego el agua pasa a un tanque de almacenamiento que permitirá un posterior uso del agua. La ilustración 15 muestra el resultado del techo construido por “SIMA”.



Ilustración 15. Techo verde ubicado en una unidad. Construido por SIMA
Fuente: (Barón & Navarro, 2019)

5.3 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LA VEGETACIÓN DEL SISTEMA DE MURO VERDE

Para la selección de los dos tipos de vegetación con mayor viabilidad para ser integradas al sistema de botellas PET del muro verde se realizó un ensayo durante dos semanas; del 23 de agosto al 6 de septiembre de 2019, siguiendo la metodología utilizada por De Pombo & Gonzales, en el que se evaluó la resistencia a la sequía de un grupo de plantas típicas de la región. Durante el ensayo se monitorearon características de la vegetación como el cambio de color de las hojas, estas plantas se encontraban en completa ausencia de riego y ubicadas en un lugar de intensa radiación solar. Este grupo de vegetación se monitoreó cada día con el fin de observar su comportamiento ante las situaciones planteadas y de esta forma, poder

decidir los dos tipos de vegetación que soportaran de una mejor forma éstos escenarios; adicionalmente se tuvo en cuenta otros factores de escogencia como su tamaño y follaje.

El grupo de plantas elegida para realizar este ensayo se encuentran en la tabla 9.

Tabla 9. Nombre común y científico para vegetación estudiada.

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO
Barquillo Morado	<i>Tradescantia spathacea</i>
Espárragos	<i>Asparagus sprengeri</i>
Helecho Boston	<i>Nephrolepis exaltata</i>
Lágrima	<i>Soleirolia soleirolii</i>
Liriope	<i>Liriope spicata</i>

Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

5.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MURO VERDE

Para la construcción del muro verde o fachada verde se diseñó de un sistema modular de muros vivos construido con botellas PET recicladas para disminuir el impacto ambiental de este material, las botellas se enlazaron unas con otras y se ubicaron de manera vertical para proporcionar un drenaje por gravedad. Estas botellas se sujetaron a una estructura metálica independiente al muro de la unidad habitacional con el fin de poder garantizar el desplazamiento de la estructura de una fachada de la unidad hasta las demás fachadas en las que se realizó el estudio. Se construyó un total de dos muros y en cada uno de estos se sembró un tipo de vegetación de las seleccionadas en el ensayo anterior donde se sometía a un estado de sequía y radiación solar directa.

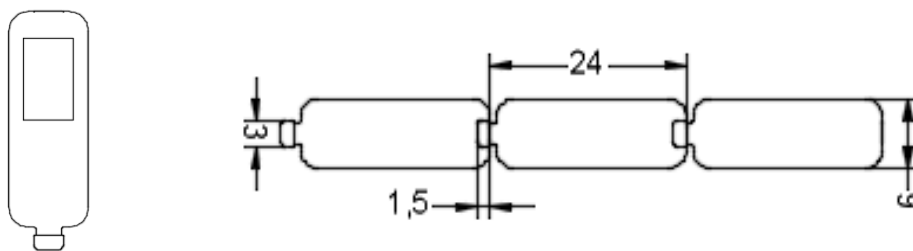


Ilustración 16. Adecuación de botellas PET y Empalme.
 Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

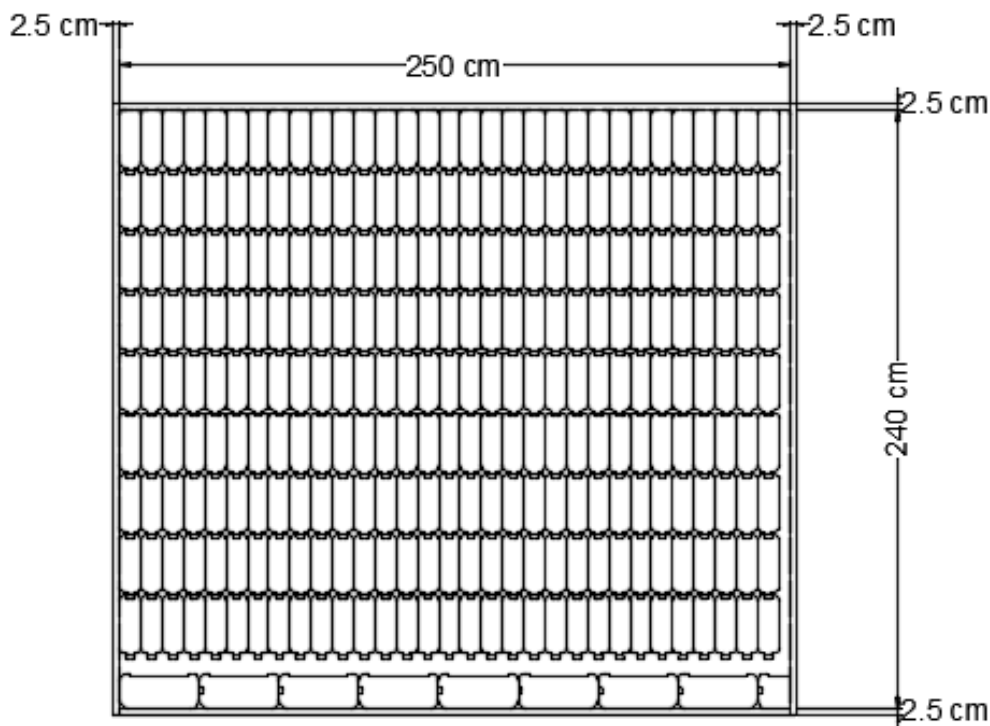


Ilustración 17. Muro verde con botellas PET diseñado por autores del presente proyecto
 Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

5.4.1 Acopio y adecuación de botellas

Para la construcción de muro fue necesaria la recolección de 560 botellas plásticas de tipo PET necesarias para la creación de dos muros verdes, cada muro tenía un total de 280 botellas con el fin de obtener un área de muro verde de 6m².

El proceso de adecuación de las botellas consistió en disponer la botella de forma vertical de tal forma que la boca o la tapa de la botella quedara en la parte de abajo y de esta forma perforar con un taladro con broca circular de 1" la parte que quedaba arriba de la botella; esto se realizó con el fin de poder introducir la boca de una botella en la otra botella para poder tener un sistema uniforme y que permita un riego por gravedad. En las figuras 10 y 11 se puede observar de una mejor forma como fue el proceso de adecuación de las botellas.



Ilustración 18. Perforación de botellas PET.
Fuente: (Barón & Navarro, 2020)



Ilustración 19. Empalme de botellas PET.
Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

Se puede observar la manera en que se enlazan las botellas formando una especie de columna, así, al unir todas las botellas da como resultado la totalidad del muro que se diseñó, se puede observar en la *Ilustración 20*.



Ilustración 20. Botellas empalmadas a gran escala.
Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

5.4.2 Diseño y construcción de la estructura metálica.

Para la construcción de la estructura metálica se utilizaron perfiles metálicos cuadrados calibre 18 de 1"x1"x3m; se creó una cuadrícula con los perfiles y se realizaron las uniones perforando los perfiles y utilizando pernos para empalmarlos, *Ilustración 21*. La estructura se encuentra anclada a la fachada de la unidad habitacional para poder sostener las botellas PET que contienen la vegetación; en la *ilustración 22* se puede observar la estructura creada a partir de los perfiles metálicos y en la *ilustración 23* la forma de empalmarlos. Fue necesario aplicar impermeabilizante y anticorrosivo a los perfiles debido a que se encontraba a la intemperie; *ilustración 24*.



Ilustración 21. Perforación de perfiles metálicos.
Fuente: (Barón & Navarro, 2020)



Ilustración 22. Estructura metálica anclada al muro de la unidad.
Fuente: (Barón & Navarro, 2020)



Ilustración 23. Empalme de perfiles metálicos.
Fuente: (Barón & Navarro, 2020)



Ilustración 24. Impermeabilización de perfiles metálicos
Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

5.4.3 Adecuación del terreno e instalación de la estructura a la fachada.

Debido al tamaño de la estructura y las condiciones del lugar, fue necesario realizar trabajos de limpieza, descapote y nivelado del terreno donde se ubicaría la estructura, de esta forma se pudo soportar en el suelo pues el terreno es resistente y se ancló a la fachada utilizando clavos y alambre dulce, para que fuese más fácil destrabarla al momento de cambiarla a otra fachada.



Ilustración 25. Adecuación de terreno.
Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

5.4.4 Siembra de vegetación e instalación de las botellas a la estructura metálica.

Teniendo en cuenta que primero se iba a registrar las medidas con un tipo de vegetación, se eligió el “espárrago o *Asparagus sprengeri*” para iniciar la toma de datos, este tipo de vegetación presenta en la parte subterránea una especie de rizoma, que es un tallo subterráneo con varias yemas que crecen de forma horizontal emitiendo raíces y brotes herbáceos de sus nudos, por lo que fue necesario dividir las plantas para poder introducir sus raíces en las botellas plásticas y de esta forma ahorrar dinero al comprar menos cantidad de plantas;
Ilustración 26.

La segunda vegetación elegida “Barquillo Morado o *Tradescantia spathacea*” tiene raíz adventicia que es aquella que surge en cualquier parte de la planta, como por ejemplo en

tallos subterráneos, raíces viejas o en alguna porción del vástago; lo que permitía remover los hijos de la planta al arrancarlos del tallo original cuando tenía raíces suficientes para poder anclarse por sí solas al ser sembradas en las botellas plásticas; *Ilustración 27*.

Para cada una de las vegetaciones se utilizó el sustrato que traía cada planta, para garantizar su correcto crecimiento.



Ilustración 26. Sembrado de Espárrago.
Fuente: (Barón & Navarro, 2020)



Ilustración 27. Sembrado de Barquillo Morado.
Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

5.4.5 Riego y cuidado de la vegetación.

Las plantas recibían radiación solar directa la mayor parte del día, por esta razón podían ser regadas cada dos días con abundante agua. Era necesario revisar los orificios de salida del agua, pues podía ser cerrado por el abono y al retener toda el agua pudría la planta.

5.5 ESCENARIOS PLANTEADOS

5.5.1 Escenario 1. Unidad con Techo verde vs Unidad con Muro Verde (Espárrago-Oeste)

Para el primer escenario se utilizó la vegetación “Espárrago o *Asparagus sprengeri*” y se ubicó en la fachada Oeste de la unidad habitacional. *Ilustración 28.*



Ilustración 28. Muro verde con Espárrago, ubicado en la fachada Oeste.
Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

5.5.2 Escenario 2. Unidad con Techo Verde vs Unidad con Muro verde (Esparrago-Sur)

Para el segundo escenario se utilizó la vegetación “Espárrago o *Asparagus sprengeri*” y se ubicó en la fachada Sur de la unidad habitacional. *Ilustración 29.*



Ilustración 29. Muro verde con Espárrago, ubicado en la fachada Sur.
Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

5.5.3 Escenario 3. Unidad con Techo Verde vs Unidad con Muro Verde (Esparrago-Este)

Para el tercer escenario se utilizó la vegetación “Espárrago o *Asparagus sprengeri*” y se ubicó en la fachada Este de la unidad habitacional. *Ilustración 30.*

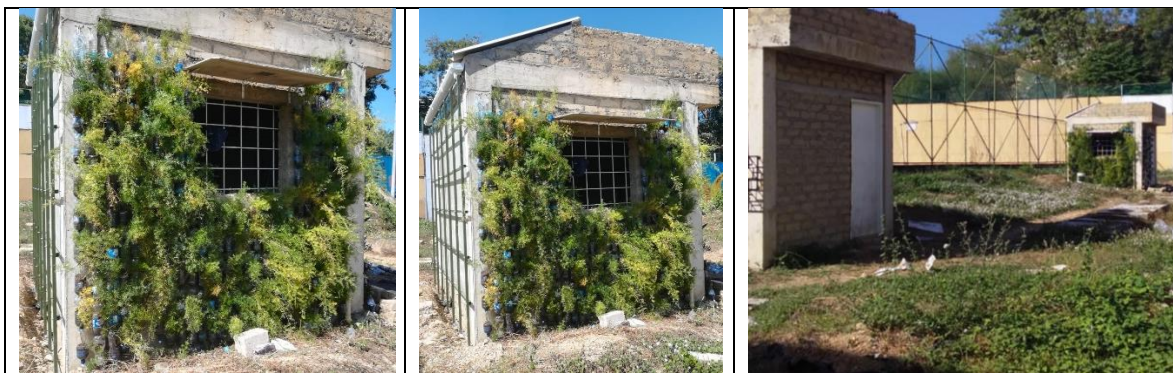


Ilustración 30. Muro verde con Espárrago, ubicado en la fachada Este.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

5.5.4 Escenario 4. Unidad con Techo verde vs Unidad con Muro Verde (Barquillo-Sur)

Para el cuarto escenario se utilizó la vegetación “Barquillo Morado o *Tradescantia spathacea*” y se ubicó en la fachada Sur de la unidad habitacional. *Ilustración 31.*



Ilustración 31. Muro verde con Barquillo morado, ubicado en la fachada Sur.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

5.5.5 Escenario 5 Unidad con Techo Verde vs Unidad con Muro verde (Barquillo-Este)

Para el quinto escenario se utilizó la vegetación “Barquillo Morado o *Tradescantia spathacea*” y se ubicó en la fachada Este de la unidad habitacional. *Ilustración 32.*



Ilustración 32. Muro verde con Barquillo Morado, ubicado en la fachada Este.
Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

5.5.6 Escenario 6. Unidad con Techo verde vs Unidad con Muro Verde (Barquillo-Oeste)

Para el sexto escenario se utilizó la vegetación “Barquillo Morado o *Tradescantia spathacea*” y se ubicó en la fachada Oeste de la unidad habitacional. *Ilustración 33.*

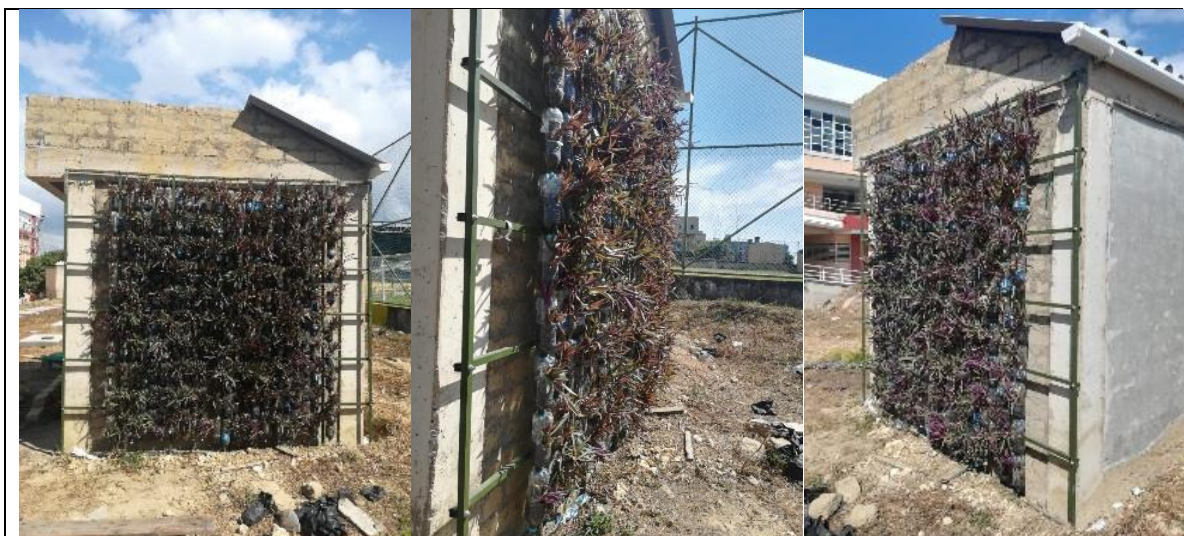


Ilustración 33. Muro verde con Barquillo morado, ubicado en la fachada Oeste.
Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

5.6 FACTORES CLIMÁTICOS

Para el mes de enero, en el que se realizó la toma de datos el Centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas emitió el boletín *Meteor Marino Mensual del Caribe Colombiano* en el que se puede observar a lo largo del mes las variaciones de Presión atmosférica, temperatura del aire, acumulado de precipitación y humedad relativa registradas en la *ilustración 34*. Al igual que el régimen de vientos en la *ilustración 35*.

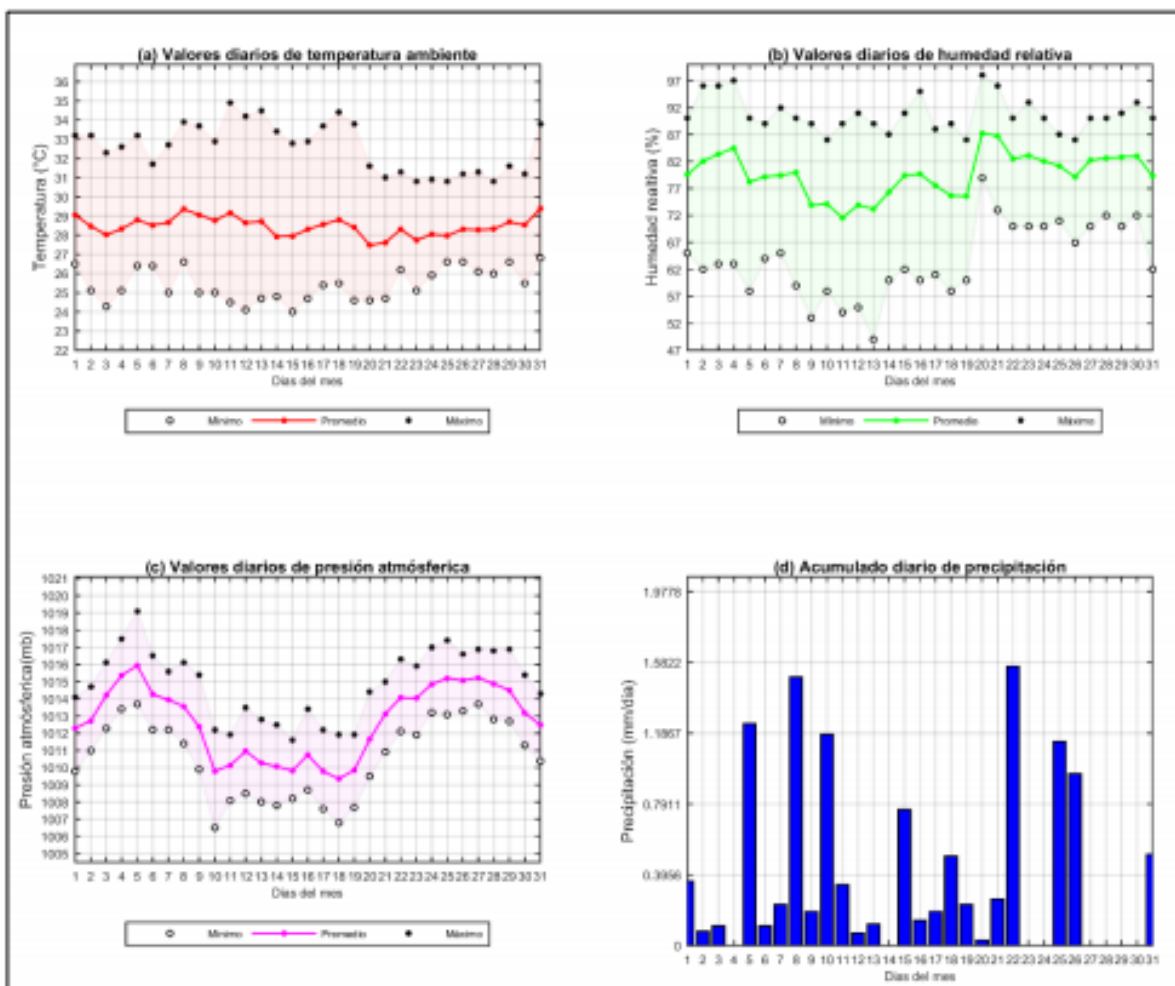


Ilustración 34 Comportamiento mensual de la presión atmosférica, temperatura del aire, acumulado de precipitación y humedad relativa en Cartagena.

Fuente: (Centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas, 2020)

Tabla 10 Resumen estadístico mensual de la presión atmosférica, temperatura del aire, acumulada de precipitación y humedad relativa en Cartagena.

ESTADÍSTICOS BÁSICOS			
Parámetro	Presión (mb)	Humedad relativa (%)	Temperatura ambiente (°C)
Número de datos	744	744	744
Mínimo	1006,5	49	24
Máximo	1019,1	98	34,9
Promedio mensual	1012,7	79,6	28,4
Desviación estándar	2,45	9,78	2,53
PRECIPITACIÓN			
Número de datos	Días con lluvia	Máximo diario (mm)	Acumulado mensual (mm)
4464	23	1,56	11,81

Fuente: (Centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas, 2020)

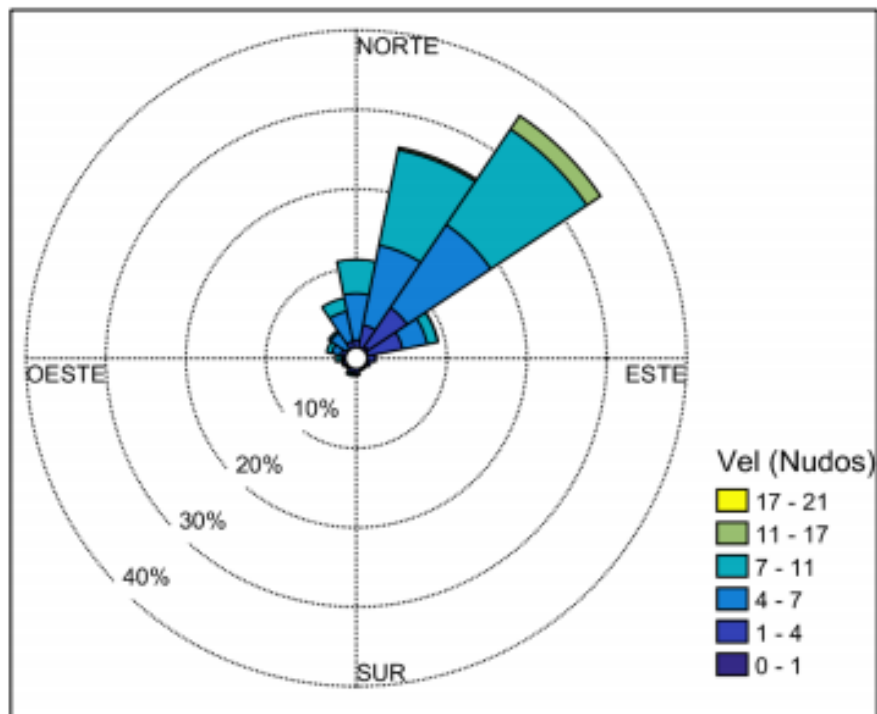


Ilustración 35. Distribución del régimen de viento en Cartagena.

Fuente: (Centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas, 2020)

Tabla 11. Resumen estadístico del régimen de viento en Cartagena.

Velocidad del viento		Dirección del viento	
Intensidad (nudos)	Frecuencia Relativa	Dirección Predominante (°)	Frecuencia Relativa*
0-4	11.1%	Noreste	35.6%
5-8	29.3%	Norte-Noreste	25.9%
9-12	11.6%	Norte	11.1%
13-16	0.4%	Este-Noreste	9.1%
>16	-	Norte-Noroeste	6.4%

Fuente: (Centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas, 2020)

Estos valores registrados por el Centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas sirven de base para verificar algunos de los datos tomados por los autores del presente proyecto; como el promedio de humedad relativa y temperatura ambiente o para conocer la dirección predominante de los vientos

5.7 EQUIPOS DE MEDICIÓN

EXTECH MODELO 42512- Termómetro de infrarrojos de doble laser 30:1 de respuesta rápida con pantalla LCD retro iluminada doble: mide la temperatura en superficies.

Specifications	42511	42512
	Laser Convergence Distance	12" (30.5cm)
Range	-58 to 1100°F (-50 to 600°C)	-58 to 1832°F (-50 to 1000°C)
Repeatability	±0.5% or 1.8°F/1°C	±0.5% or 1.8°F/1°C
Basic Accuracy	±(1% of rdg + 2°F/1°C)	±(1% of rdg + 2°F/1°C)
Max resolution	0.1°F/°C	0.1°F/°C
Emissivity	0.10 to 1.00 Adjustable	0.10 to 1.00 Adjustable
Field of View (Distance to Target)	12:1	30:1
Dimensions	5.7x4x1.6" (146x104x43mm)	5.7x4x1.6" (146x104x43mm)
Weight	5.7oz (163g)	5.7oz (163g)



Ilustración 36. Ficha técnica termómetro EXTECH modelo 42312.

Fuente: Manual de usuario EXTECH, 2014.

EXTECH MODELO RHT10: Registrador de datos USB de temperatura y humedad; registra hasta 16.000 lecturas para cada parámetro humedad/temperatura.



Specifications	Range	Resolution	Accuracy (%rdg+digits)
Temperature	-40 to 158°F	0.1°F/°C	±1.8°F (14 to 104°F)
			±3.6°F (-40 to +14 and 104 to 158°F)
	-40 to 70°C		±1.0°C (-10 to 40°C) ±2.0°C (-40 to -10 and +40 to 70°C)
Humidity	0 to 100%RH	0.1%RH	±3%RH
Datalogging interval	2 seconds to 24 hours		
Memory	Temperature: 16,000 points; Relative Humidity: 16,000 points		
Dimensions	5.1 x 1.1 x 0.98" (130 x 30 x 25mm)		
Weight	1oz (20g)		

Ilustración 37. Ficha técnica medidor temperatura y humedad, EXTECH Modelo RTH 10.
Fuente: Manual de usuario EXTECH, 2016.

EXTECH MODELO SLD 350- Termo anemómetro de hilo electro calentado CFM/Registrador de datos Registra datos en una tarjeta SD y en formato Excel: Medidor de la velocidad del aire/del flujo de aire con sonda telescópica.



Specifications	Range	Resolution	Basic Accuracy
Air Velocity			
m/s	0.2 to 25m/s	0.01m/s	±5%rdg
ft/min	40 to 3940ft/min	1ft/min	±5%rdg
MPH	0.5 to 45MPH	0.01MPH	±5%rdg
knots	1 to 31knots	0.01knots	±5%rdg
km/h	0.7 to 72km/h	0.01km/h	±5%rdg
CFM (feet ³ /min)	0 to 1,907,000 CFM	0.001 to 100 CFM	
CMM (meter ³ /min)	0 to 54,000 CMM	0.001 to 1 CMM	
Temperature	32 to 122°F (0 to 50°C)	0.1°	±1.5°F (±0.8°C)
Type K Temperature	-148 to 2372°F (-100 to 1300°C)	0.1°	±(0.4% + 1.8°F/1°C)
Type J Temperature	-148 to 2192°F (-100 to 1200°C)	0.1°	±(0.4% + 1.8°F/1°C)
Memory	20 Million data records using 2G SD card		
Dimensions	7.2 x 2.9 x 1.9" (182 x 73 x 47.5mm)		
Weight	23.1oz (655g)		

Ilustración 38. Ficha técnica medidor de velocidad del aire, EXTECH Modelo SLD 350.
Fuente: manual de usuario Termo- anemómetro EXTECH, 2016.

Estación meteorológica ACURITE 5-1, con monitor Modelo 06022 y sensor Modelo 06004: Mide la temperatura, la humedad, la velocidad del viento, la dirección del viento y la lluvia.



TEMPERATURE RANGE	Outdoor: -40°F to 158°F; -40°C to 70°C
HUMIDITY RANGE	Outdoor: 1% to 99%
WIND SPEED	0 to 99 mph; 0 to 159 kph; 0 to 86 knots
WIND DIRECTION INDICATORS	16 points
RAINFALL	0.01 inches (0.25 mm) and up
WIRELESS RANGE	330 ft / 100 m depending on home construction materials
OPERATING FREQUENCY	433 MHz
POWER	4 x AA alkaline or lithium batteries
DATA REPORTING	Wind Speed: 18 second updates; Direction: 36 second updates Outdoor temperature & humidity: 36 second updates

Ilustración 39. Ficha técnica sensor Acurite- Modelo 06004.

Fuente: manual de usuario Sensor 5-1 Acurite



DISPLAY'S BUILT-IN TEMPERATURE SENSOR RANGE	32°F to 122°F; 0°C to 50°C
DISPLAY'S BUILT-IN HUMIDITY SENSOR RANGE	1% to 99% RH
WIND SPEED	0 to 99 mph; 0 to 159 km/h
WIND DIRECTION INDICATORS	16 points
RAINFALL	0.01 inches (0.25 mm) and up
WIRELESS RANGE	330ft / 100m depending on home construction materials
OPERATING FREQUENCY	433 MHz
POWER	5V, 250mA adapter 6 x AA alkaline batteries (optional)
DATA REPORTING	Wind Speed: 18 second updates; Direction: 36 seconds Outdoor temperature & humidity: 36 second updates Indoor temperature & humidity: 60 second updates PC Connect CSV Data Logging: 12 minute intervals PC Connect to Online Portal/App: 18 seconds

Ilustración 40. Ficha Técnica de monitor estación meteorológica 5-1 Acurite Modelo 06022.

Fuente: manual de usuario monitor 5-1 Acurite Modelo 06022.

5.8 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

El diseño utilizado en el presente proyecto es “Experimental” considerando que se varía la ubicación del muro verde y la vegetación presente en este, para analizar el comportamiento de variables como la temperatura ambiente, temperaturas superficiales, humedad, velocidad del viento, con el fin de determinar el mejor sistema empleado.

El periodo de medición fue cada hora de 8:00 a 17:00 durante tres días por escenario para un total de seis escenarios o dieciocho días. Se ubicó el sensor meteorológico inalámbrico en la parte superior de la unidad que tenía el techo verde para registrar los datos de temperatura y humedad exterior para cada hora, estos datos eran transmitidos a la pantalla digital de la

estación donde podían ser anotados con mayor facilidad. *Ilustración 41*. Se registraron diez (10) medidas de temperatura y diez (10) de humedad exterior por día, para un total de ciento ochenta (180) medidas de temperatura y ciento ochenta (180) de humedad exterior durante el tiempo de estudio.

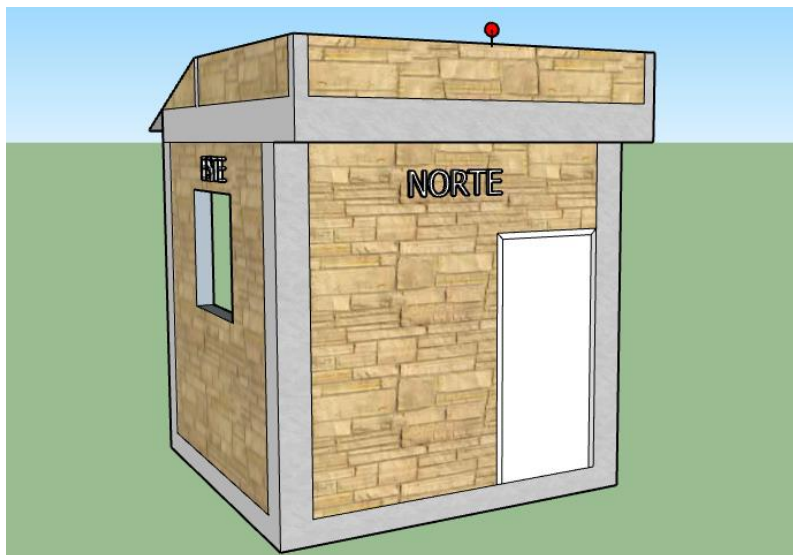


Ilustración 41. Sensor de estación meteorológica ubicado en la parte superior de la unidad y representado por círculo rojo. Dibujado en SketchUp.
Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

Para tomar los datos de las temperaturas superficiales se utilizó un Termómetro de infrarrojos de doble laser; para esto se ubicaba el instrumento a 12” de las superficies de las unidades y se registraba el dato de temperatura superficial para cada hora. Estas medidas eran tomadas a 0,6m desde el piso de la unidad para ocupantes sentados, siguiendo la norma (NTC 5316, 2004). En las *ilustraciones 42 y 43* se puede observar las ubicaciones al interior del módulo donde fueron tomadas las temperaturas superficiales.

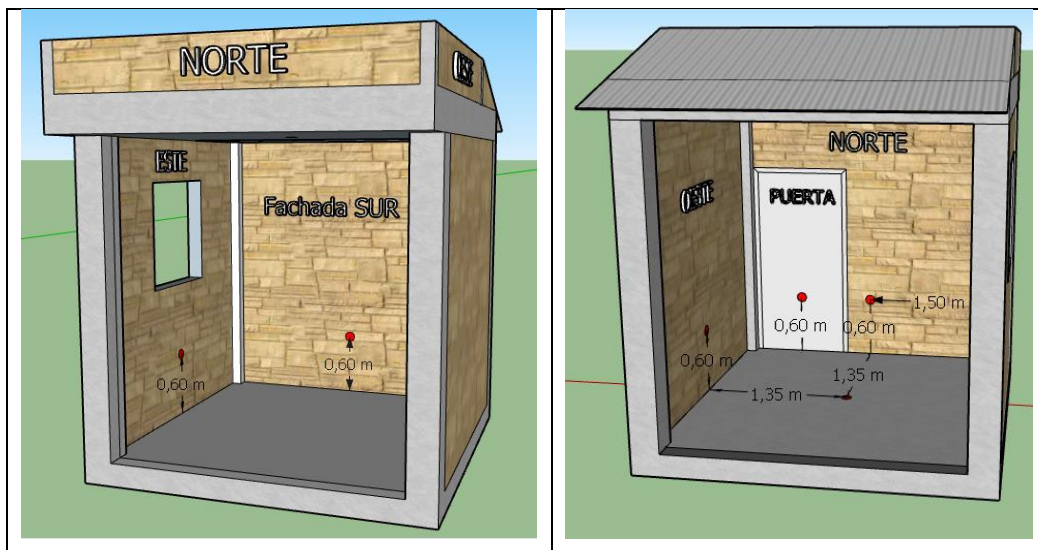


Ilustración 42. Ubicación de puntos para la toma de las Temperaturas Superficiales en la fachada ESTE, SUR, OESTE y NORTE y PISO y representados por círculo rojo. Dibujado en SketchUp
 Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

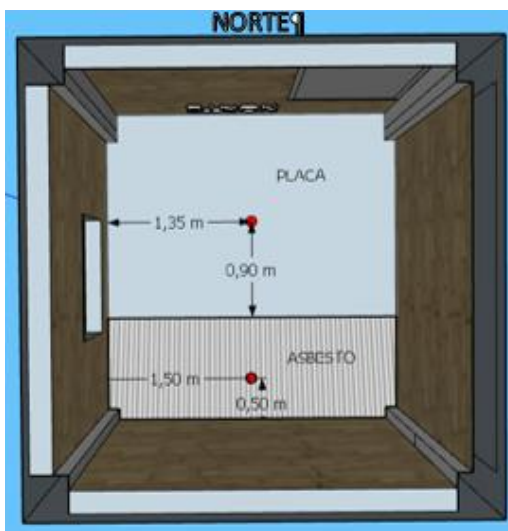


Ilustración 43. Ubicación de puntos para la toma de las Temperaturas superficiales en la PLACA y lamina de ASBESTO; representado por círculo rojo. Dibujado en SketchUp.
 Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

De esta forma, se registraron ocho temperaturas superficiales por hora para cada módulo, dando un total de ochenta (80) medidas de temperatura superficial cada día para cada módulo y dos mil ochocientos ochenta (2880) medidas durante el tiempo de estudio.

Se utilizó un Termo-anemómetro de hilo electro calentado con sonda telescópica para medir las velocidades del aire al interior de las unidades; para esto, se ubicaba el instrumento cerca de las zonas de ventilación que para este caso solo fue la ventana y se registraban las

velocidades de viento a 0,1 0,6 y 1.1 metros de altura. Al igual que con los instrumentos anteriores, estas medidas se tomaron cada hora. *Ilustración 44.* Se registraron tres (3) medidas por módulo para cada hora, dando un total de treinta (30) medidas por día para cada módulo y mil ochenta (1080) medidas durante el tiempo de estudio.

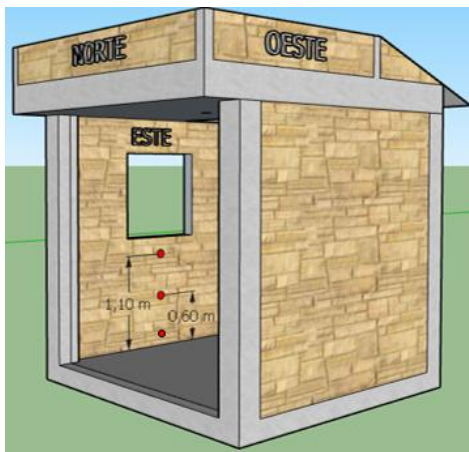


Ilustración 44. Ubicación de puntos para la toma de las Velocidades del viento al interior de la unidad, representados por círculo rojo. Dibujados en SketchUp.
Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

Se tomaron los datos de las temperaturas y humedades al interior de cada unidad habitacional utilizando Registrador de datos USB de temperatura y humedad, para esto se ubicó una USB en el centro de cada unidad a una altura de 0,6m. Estos instrumentos permiten registrar los datos a distintos intervalos de frecuencia, pero debido a que las medidas fueron tomadas cada hora fue necesario registrar estas con el mismo periodo de frecuencia. *Ilustración 45.* Se registró una (1) medida por hora para cada módulo, dando un total de diez (10) medidas por día para cada módulo y treientos sesenta (360) medidas durante el tiempo de estudio.

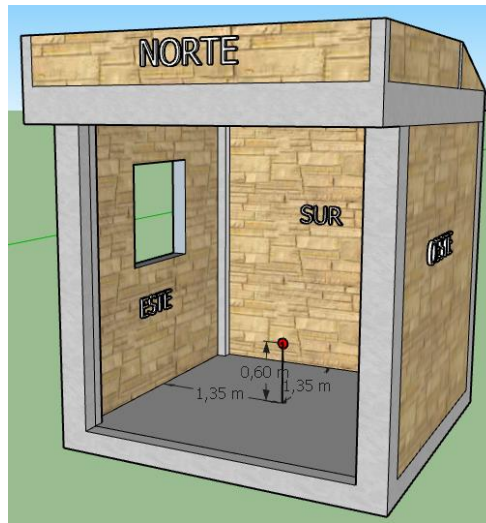


Ilustración 45. Ubicación de las USB para la toma de las humedades y temperaturas al interior de las unidades, representada por un círculo rojo. Dibujado en SketchUp.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

El procedimiento de medición fue registrado en las *ilustraciones 46 y 47*, donde se puede observar la toma de los datos al interior de las unidades y los instrumentos empleados.

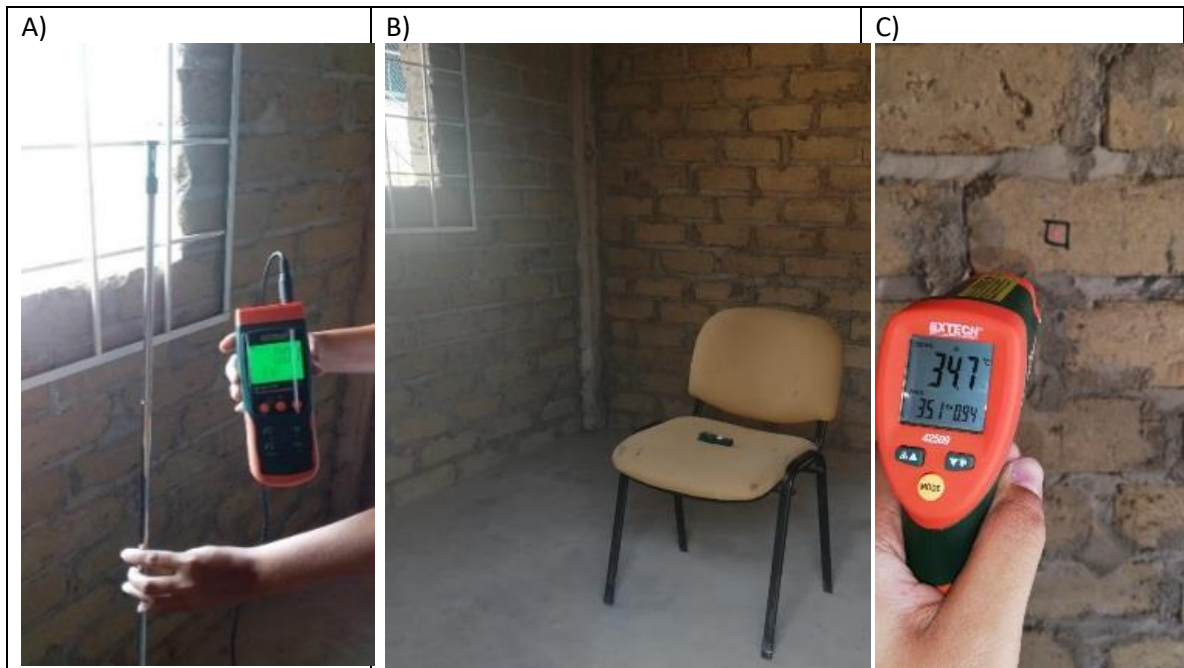


Ilustración 46. Toma de datos al interior de las unidades. A) Velocidades del viento con Termo-Anemómetro de hilo electro calentado con sonda telescópica. B) Temperatura y humedad al interior de la unidad con Registrador de datos USB. C) temperaturas superficiales con Termómetro de infrarrojos de doble láser.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

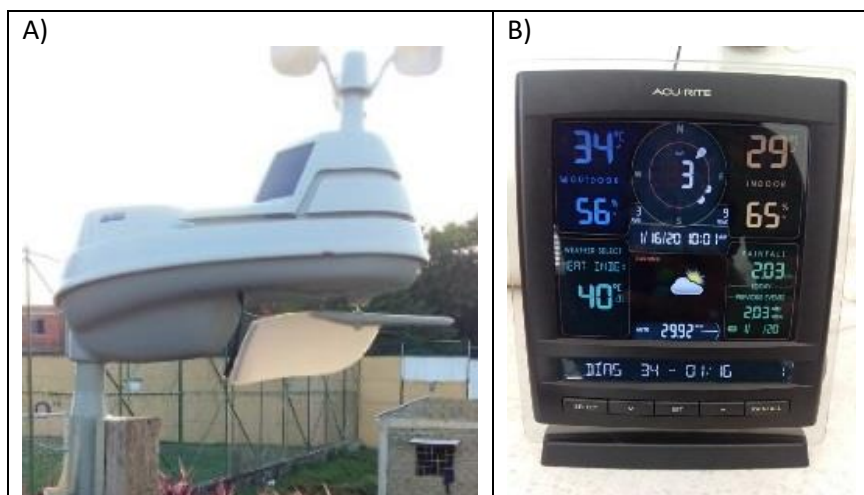


Ilustración 47. Toma de datos con estación meteorológica. A) Sensor meteorológico inalámbrico que registra los datos de Temperatura, Humedad y Velocidad del viento exterior. B) Pantalla digital donde son transmitidos los datos del sensor.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

5.9 CALCULO DE LA TEMPERATURA RADIANTE MEDIA Y TEMPERATURA OPERATIVA.

Para el cálculo de la temperatura radiante media se empleó la metodología descrita en la NTC 5316 la cual se basa en las temperaturas superficiales circundantes del recinto y los factores angulares de cada superficie en relación a la posición de la persona. Teniendo en cuenta que el sensor que mide la temperatura y humedad interior se colocó en el centro del recinto a una altura de 0.6 metros del piso, el análisis se realizó considerando a la persona sentada y en función de ello, se determinó las secciones a las a cuáles se le estableció su factor angular. *Las Ilustraciones 48,49 y 50* representan la distribución de las secciones para cada unidad habitacional y sus respectivas dimensiones; los factores angulares de cada superficie son iguales para unidad habitacional, teniendo en cuenta que son módulos idénticamente contruidos. Como la distancia del sensor a cada fachada del módulo es la misma ya que se encuentra ubicado en el centro del recinto, se infiere que para superficies verticales (muros), cada sección por encima de 0.6 metros tiene el mismo factor y cada sección por debajo de esa altura tiene a su vez, igual factor angular. Por otro lado, para el piso, cada una de las cuatro secciones tiene el mismo factor ya que cada sección tiene las mismas dimensiones y todas se encuentran a 0.6m del sensor de temperatura y humedad. Para la cubierta se realizó

el análisis considerándola totalmente horizontal teniendo en cuenta que está conformada por un tramo horizontal (Placa de concreto) y un tramo inclinado (lamina de asbesto) y que el punto que los divide no se encuentra a eje con el sensor de temperatura por lo tanto inicialmente se determinó el factor angular de las cuatro secciones de cubierta y luego aquellas secciones que estaban conformadas tanto con placa como con lamina se le distribuyo su factor angular en relación a su área; de igual forma para ventana la cual está ubicada en la fachada Este se tomó los factores de las secciones E1 y E2, y se le distribuyó su factor angular en proporción al área que ocupa. Los valores de factor angular para cada sección obtenidos al aplicar la Ecuación 5 se encuentran en la *Tabla 12*, por último, se sumó los factores de cada sección de cada superficie obteniendo lo valores de la *Tabla 13*. Teniendo los factores angulares de cada superficie y sus respectivas temperaturas superficiales tomadas en campo, se utilizó la Ecuación 3 para determinar la temperatura radiante media para cada hora. Ya que el área de la ventana carecía de superficie alguna y a razón de ello no se tomó temperatura superficial de esta, no se consideró su factor angular para el cálculo y análisis de la temperatura radiante media del recinto.

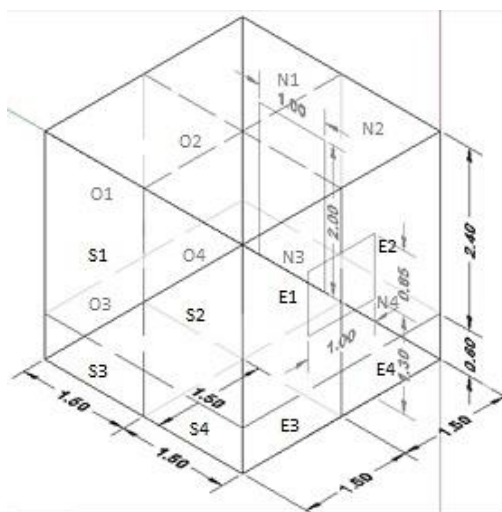


Ilustración 48. Secciones para cada fachada del módulo de vivienda.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

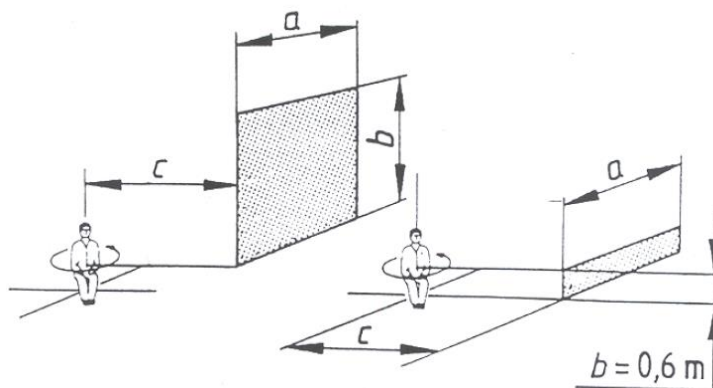


Ilustración 49. Relacion entre una persona sentada y un rectangulo vertical para determinar el factor angular.

Fuente: (ASHRAE Handbook, Fundamentals, 2017)

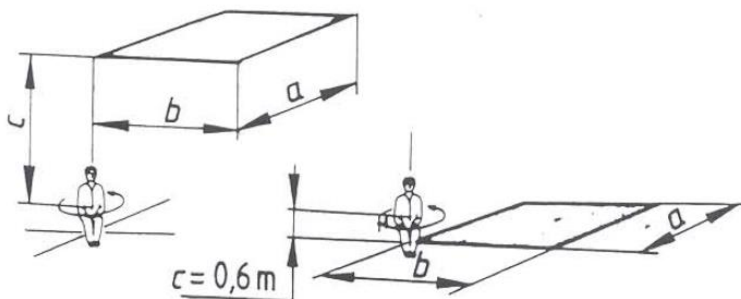


Ilustración 50. Relacion entre una persona sentada y un rectangulo horizontal para determinar el factor angular.

Fuente: (ASHRAE Handbook, Fundamentals, 2017)

Tabla 12. Factores Angulares para cada sección.

SUPERFICIE	SECCION	a	b	c	factor
FACHADA NORTE	N1	1,5	2,4	1,5	0,050
	N2	1,5	2,4	1,5	0,050
	N3	1,5	0,6	1,5	0,025
	N4	1,5	0,6	1,5	0,025
FACHADA SUR	S1	1,5	2,4	1,5	0,050
	S2	1,5	2,4	1,5	0,050
	S3	1,5	0,6	1,5	0,025
	S4	1,5	0,6	1,5	0,025
FACHADA ESTE	E1	1,5	2,4	1,5	0,050
	E2	1,5	2,4	1,5	0,050
	E3	1,5	0,6	1,5	0,025
	E4	1,5	0,6	1,5	0,025
	O1	1,5	2,4	1,5	0,050

FACHADA OESTE	O2	1,5	2,4	1,5	0,050
	O3	1,5	0,6	1,5	0,025
	O4	1,5	0,6	1,5	0,025
PISO	P1	1,5	1,5	0,6	0,081
	P2	1,5	1,5	0,6	0,081
	P3	1,5	1,5	0,6	0,081
	P4	1,5	1,5	0,6	0,081
CUBIERTA	C1	1,5	1,5	2,4	0,019
	C2	1,5	1,5	2,4	0,019
	C3	1,5	1,5	2,4	0,019
	C4	1,5	1,5	2,4	0,019
TOTAL					1,000

Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

Tabla 13. Factor Angular de cada superficie.

SUPERFICIES	FACTOR ANGULAR
FACHADA NORTE	0,114
FACHADA SUR	0,150
FACHADA ESTE	0,138
FACHADA OESTE	0,150
PISO	0,324
PLACA	0,051
LAMINA	0,025
PUERTA	0,036
VENTANA	0,012
TOTAL	1

Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

Para determinar la temperatura operativa por hora para cada unidad habitacional se utilizó la *Ecuación 2*, empleando la temperatura radiante media para cada hora calculada previamente y la temperatura del aire al interior de cada módulo. El factor de ponderación (a) se estableció a partir de la *TABLA 5*, empleando las velocidades tomadas con el anemómetro a una altura de 0.6 respecto al piso debido a que el análisis se realizó para una persona sentada. Teniendo en cuenta que todas las velocidades a esa altura fueron 0 se utilizó un factor de ponderación de 0.5.

5.10 ANÁLISIS DE DATOS, ÍNDICES PMV Y PPD Y EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO

Se utilizará la sección 7 el estándar ANSI/ASHRAE 55- 2017 en el análisis del confort térmico para la evaluación de edificios existentes, empleando el criterio de “predicción de confort a través de mediciones ambientales”, no se emplearán encuestas ya que las unidades no estarán habitadas. Las medidas ambientales están vinculadas a la comodidad del ocupante a través de modelos de confort. Los modelos de confort, PMV y adaptativo, son específicos para edificios con acondicionamiento mecánico y ventilación natural, respectivamente. Se utilizará el modelo PMV ya que, aunque las unidades habitacionales tienen ventanas (ventilación natural), estas no tienen capacidad de maniobra, por lo tanto, siempre mantendrán las mismas condiciones interiores, lo cual es característico de un estado estacionario y debido a ello es recomendable emplear el modelo PMV para su evaluación.

Para el análisis de los datos se adoptarán dos enfoques, un análisis de punto en el tiempo o a corto plazo y un análisis integrado en el tiempo o a largo plazo (durante un día, temporada o año típico). Para el análisis a corto plazo se determinará el índice PMV-PPD cada hora, este se calculará de forma analítica a través de la ecuación 5, por medio de la herramienta “ASHRAE Thermal Comfort Tool” mostrada en la *ilustración 57*, que Los Criterios de aprobación para el confort térmico son de -0.5 a $+0.5$ en la escala PMV, esto representa un 90% estimado satisfecho con el entorno térmico. Para el análisis a largo plazo, para cada día se cuantificará el número de horas en que las condiciones ambientales están fuera de los requisitos de la zona de confort durante el período de tiempo de interés en términos de horas de excedencia. Las horas de excedencia (EH) se calculan para la zona de confort PMV, $EH = H_{disc}$, donde H_{disc} es una hora de incomodidad; $H_{disc} = 1$ si $|PMV| - 0.5 > 0$ y 0 de lo contrario.

Para el cálculo del confort térmico se empleara la herramienta CBE Thermal Comfort Tool la cual maneja dos estándares, la ASHRAE- 55 y la EN- 16798. Debido a que la NTC 5316 se fundamentó en la ASHRAE- 55, se empleó esta para el análisis de confort. Este software se basa en códigos de computadora establecidos en el apéndice B del ASHRAE-55 o en el anexo D de ISO 7730, ingresando los parámetros: temperatura y humedad del aire,

temperatura radiante media, velocidad del aire, tasa metabólica y vestimenta en unidades SI. También da la posibilidad de obtener los índices de confort ya sea una entrada a la vez o un grupo de datos como plantilla de Excel. En las *ilustraciones 51 a 56* se representa el proceso de entrada de datos para el cálculo de confort térmico. Para el presente estudio se evaluó el confort para parámetros personales constantes utilizando valores de 1met y 0.5 clo para el nivel de actividad y nivel de ropa respectivamente, considerando a una persona sedentaria sentada y tranquila con un tipo de ropa típica de verano.

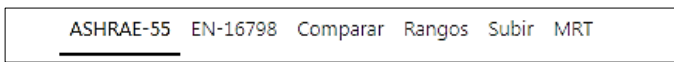


Ilustración 51. Barra para selección de Estándar de confort térmico.
 Fuente: Hoyt, Schiavon, Tartarini, Cheung, Steinfeld, Piccioli y Moon, 2019, CBE Thermal Comfort Tool. Centro para el entorno construido, Universidad de California Berkeley.

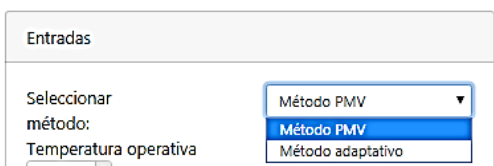


Ilustración 52. Barra de selección de Método de Cálculo de confort y temperatura operativa.
 Fuente: Hoyt et al, 2019, CBE Thermal Comfort Tool. Centro para el entorno construido, Universidad de California Berkeley.

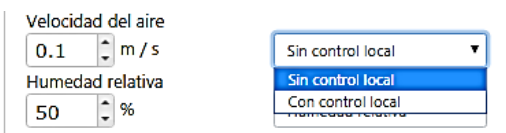


Ilustración 53. Entrada de velocidad y selección de control local del aire.
 Fuente: Hoyt et al, 2019, CBE Thermal Comfort Tool. Centro para el entorno construido, Universidad de California Berkeley.

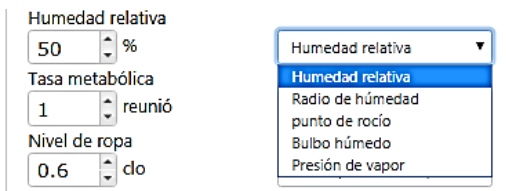
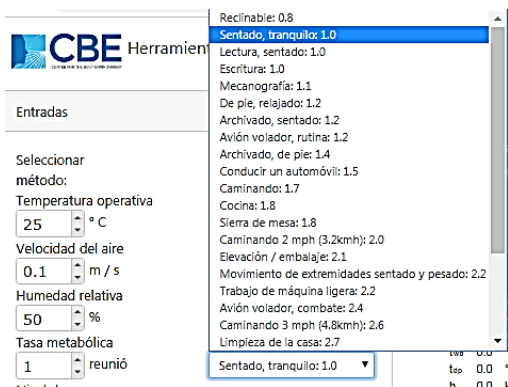
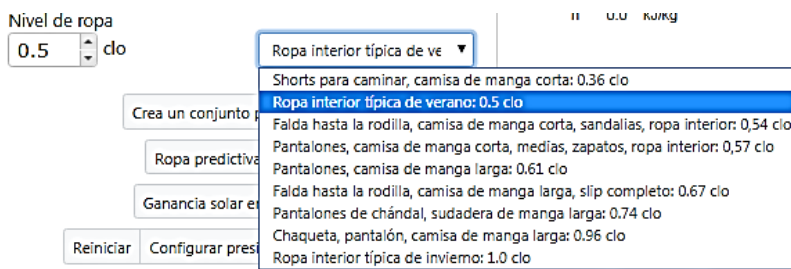


Ilustración 54. Barra de entrada de humedad relativa.
 Fuente: Hoyt et al, 2019, CBE Thermal Comfort Tool. Centro para el entorno construido, Universidad de California Berkeley.



*Ilustración 55. Barra de entrada de nivel de actividad y tasa metabólica.
 Fuente: Hoyt et al, 2019, CBE Thermal Comfort Tool. Centro para el entorno construido, Universidad de California Berkeley.*



*Ilustración 56. Barra de selección de nivel de ropa.
 Fuente: Hoyt et al, 2019, CBE Thermal Comfort Tool. Centro para el entorno construido, Universidad de California Berkeley.*

Luego de ingresar todos los parámetros ambientales y personales, el software establece los índices PMV y PPD, en donde el criterio de aprobación consiste en un PMV en un rango de -0.5 a 0.5 para la cual la persona se sentirá térmicamente neutra para un porcentaje de insatisfechos no superior a un 10%, como lo muestra la *Ilustración 57*. Para el cálculo de un conjunto de datos a la vez es necesario ir a la pestaña “subir” como lo muestra *la Ilustración 58* y seguir las instrucciones establecidas por el software.

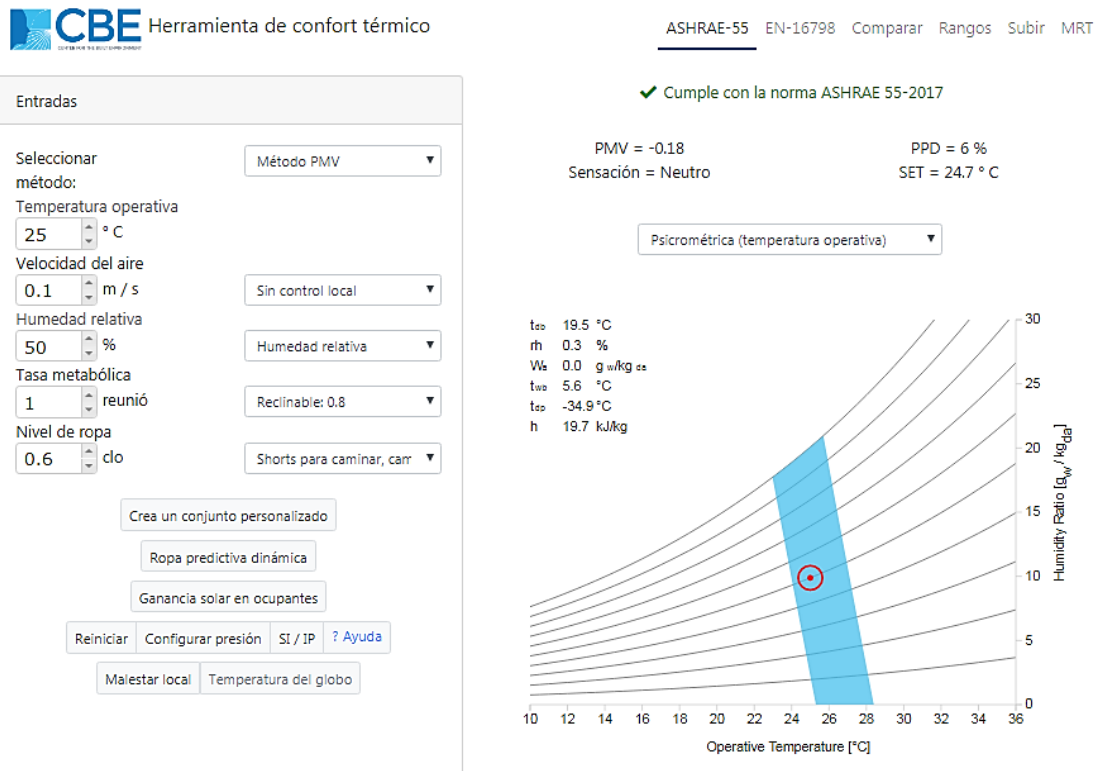


Ilustración 57. Herramienta “ASHRAE Thermal Comfort Tool”

Fuente: Hoyt et al, 2019, CBE Thermal Comfort Tool. Centro para el entorno construido, Universidad de California Berkeley.

¡Calcule los índices de confort!

Con esta aplicación, puede cargar un gran conjunto de parámetros de confort y esta herramienta calculará automáticamente los índices de confort térmico.

Instrucciones

Ilustración 58. Instrucciones para el cálculo de un conjunto de parámetros de confort.

Fuente: Hoyt et al, 2019, CBE Thermal Comfort Tool. Centro para el entorno construido, Universidad de California Berkeley.

5.11 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS, VEGETACIÓN Y ORIENTACIÓN.

Para el análisis comparativo entre el sistema de muro verde y techo verde, se eligió la mejor alternativa con base a los parámetros e indicadores de confort térmico para cada escenario con base al criterio de horas de excedencia, Las horas de excedencia (EH) se calculan para la zona de confort PMV, $EH = H_{disc}$, donde H_{disc} es una hora de incomodidad; $H_{disc} = 1$ si $|PMV| - 0.5 > 0$ y 0 de lo contrario. Estableciendo así cuál de los dos sistemas presenta más horas de inconformidad térmica a largo plazo durante el intervalo de tiempo seleccionado para las mediciones y por ende concluyendo cual sistema presenta mejor rendimiento térmico. Sin embargo, ambos sistemas presentaron las mismas horas de inconformidad, por lo tanto, se eligió la mejor alternativa con base a los indicadores de confort térmico. Se comparó estos parámetros para cada unidad habitacional en cada escenario y el criterio de selección fue en relación al sistema que indicó un mejor bienestar térmico para el mayor número de escenarios posibles. Se empleó el método D del anexo B de la norma UNE EN ISO 7730:2006 para el cual se calculó el PPD promedio en el tiempo durante las horas de medición obteniendo un único valor para cada escenario en cada módulo. La alternativa seleccionada fue aquella que dio como resultado un menor valor de PPD promedio para una mayor cantidad de escenarios.

Para establecer cuál de los dos tipos de vegetación provee un mejor bienestar térmico, se evaluó los parámetros ambientales que intervienen en el confort, así como los índices obtenidos para cada vegetación. Se analizó inicialmente el comportamiento de la temperatura exterior promedio para cada vegetación con el objeto de determinar si existe una diferencia significativa que impida evaluar los parámetros para los distintos escenarios. Se estableció posteriormente la diferencia de los parámetros exteriores de temperatura y humedad relativa respecto a estos mismos, pero interiormente, se obtuvo el promedio para cada vegetación y se comparó para concluir cuál de las dos tiende a disminuir en mayor cantidad la temperatura exterior y la humedad relativa exterior. Se promedió el porcentaje estimado de insatisfechos PPD de los tres escenarios de cada vegetación con el objetivo de contrastar estos dos valores y definir cuál de estos tiene un menor porcentaje de insatisfechos y por ende mejores

condiciones de confort. Por último, se analizó la temperatura de las superficies a través del parámetro de temperatura radiante media, se estimó un promedio para cada vegetación y se cotejó a fin de establecer cual es menor y en consecuencia tiene menores temperaturas superficiales las cuales contribuyen a un índice de confort térmicamente aceptable. En caso de equivalencia en el número de parámetros, la vegetación seleccionada será la que presente una mayor temperatura exterior, debido a que es igualmente competitiva que la otra vegetación, pero con condiciones exteriores más críticas.

Para el análisis de la mejor orientación en cual se debe colocar el muro verde para obtener un mejor bienestar térmico, se tuvo en cuenta el comportamiento de ambos tipos de vegetación y se evaluaron en conjunto para cada orientación. Los parámetros evaluados en este caso fueron la temperatura y humedad relativa, estableciendo las diferencias en comparación a los mismos parámetros al interior de la unidad de vivienda. Se realizó un promedio de estas diferencias para cada una de las 3 fachadas y se estableció a partir del mayor valor, la mejor alternativa con mayores beneficios térmicos para estos dos parámetros. También se utilizó el índice PPD como parámetro de comparación de las tres alternativas determinando el promedio del porcentaje estimado de insatisfechos para cada orientación y seleccionando la que presenta un menor valor como la mejor alternativa. Por último, se evaluó el comportamiento de la temperatura superficial de cada fachada en los casos que el muro se encontraba instalado y en los cuales la fachada estaba totalmente expuesta. Se calculó las diferencias para los dos casos y se comparó cada valor obtenido por fachada, con la finalidad de escoger la alternativa con mayor diferencia de temperatura superficial. En caso de paridad entre las alternativas se escogerá la de mayor temperatura exterior por presentar igual desempeño con temperaturas exteriores más altas.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LA VEGETACIÓN DE SISTEMA DE MURO VERDE

Durante el desarrollo de la primera parte del proyecto se determinó la vegetación con mayor viabilidad para ser utilizada en el sistema de muro verde, para esto se siguió la metodología utilizada por De Pombo & Gonzales.

El procedimiento realizado consistió en evaluar el comportamiento de cinco tipos de plantas expuestas al sol durante un periodo de 15 días en ausencia de riego, con el fin de establecer la vegetación que resista de la mejor forma las condiciones explicadas y de esta forma pueda tener un mejor desempeño en el sistema de muro de muro verde.

Día 1.

En la *Ilustración 59* se puede observar los cinco tipos de vegetación elegidas para el estudio, de izquierda a derecha Liriope (*Liriope spicata*), Barquillo Morado (*Tradescantia spathacea*), Lagrima (*Soleirolia soleirolii*), Espárragos (*Asparagus sprengeri*), Helecho Boston (*Nephrolepis exaltata*). Estas plantas serán registradas con las letras A, B, C, D y E respectivamente. Durante el primer día de estudio se puede observar todas las plantas con vitalidad y buen follaje.

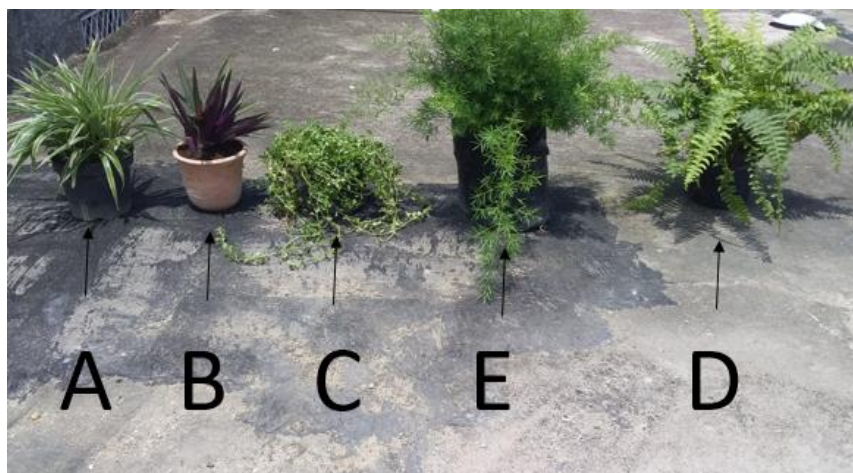


Ilustración 59. Primer día de la vegetación elegida para el estudio de la resistencia al sol.
Fuente: (Barón & Navarro, 2019)

Día 5

En el día 5 de estudio se pudo observar las plantas “Lagrima” y “Liriope” representadas con las letras C y A respectivamente, se encontraba un poco decaídas, mientras que el “Helecho Boston” representado con la letra D, tenía hojas secas.



Ilustración 60. Quinto día de la vegetación elegida para el estudio de la resistencia al sol.
Fuente: (Barón & Navarro, 2019)

Día 10

En el día 10 del estudio las plantas A, C y D tenía hojas secas y muy poca vitalidad, mientras que la planta B empezaba a decaer un poco y la planta E aún seguía como el primer día.



Ilustración 61. Décimo día de la vegetación elegida para el estudio de la resistencia al sol.
Fuente: (Barón & Navarro, 2019)

Día 15

Al finalizar el estudio las plantas “Lagrima”, “Liriope” y “Helecho Boston” representadas por las letras C, A y D se habían marchitado por completo, el “Barquillo morado” representado por la letra B tenía muchas hojas secas pero en menor proporción que los demás y por último el “Esparrago” representado por la letra E conservaba la misma vitalidad que el primer día de ensayo.



Ilustración 62. Último día de la vegetación elegida para el estudio de la resistencia al sol.
 Fuente: (Barón & Navarro, 2019)

Tabla 14 Selección de la mejor vegetación de acuerdo a variables de estudio

Vegetación	A	B	C	D	E
Variables de estudio					
Tiempo para aparecer hojas secas	6	8	4	8	10
Tiempo para perder la vitalidad	14	>15	11	13	>15
Tamaño y follaje para cubrir el recipiente	8	7	7	9	10

Fuente: (Barón & Navarro, 2019)



De acuerdo al estudio realizado y anteriormente planteado, se determinó que las dos plantas elegidas para formar parte del sistema de muro verde serían el “Esparrago” y “Barquillo Morado” debido a que soportaron de una mejor forma la incidencia del sol, pues no murieron durante el periodo de estudio y fueron dos de las tres plantas en las que las hojas empezaron a secarse más tarde, de igual forma, el espárrago tiene un mayor tamaño y follaje que las demás plantas y por estas razones ambos pueden amoldarse de una mejor forma al sistema planteado.

6.2 ANÁLISIS DE TEMPERATURAS PARA AMBOS MÓDULOS

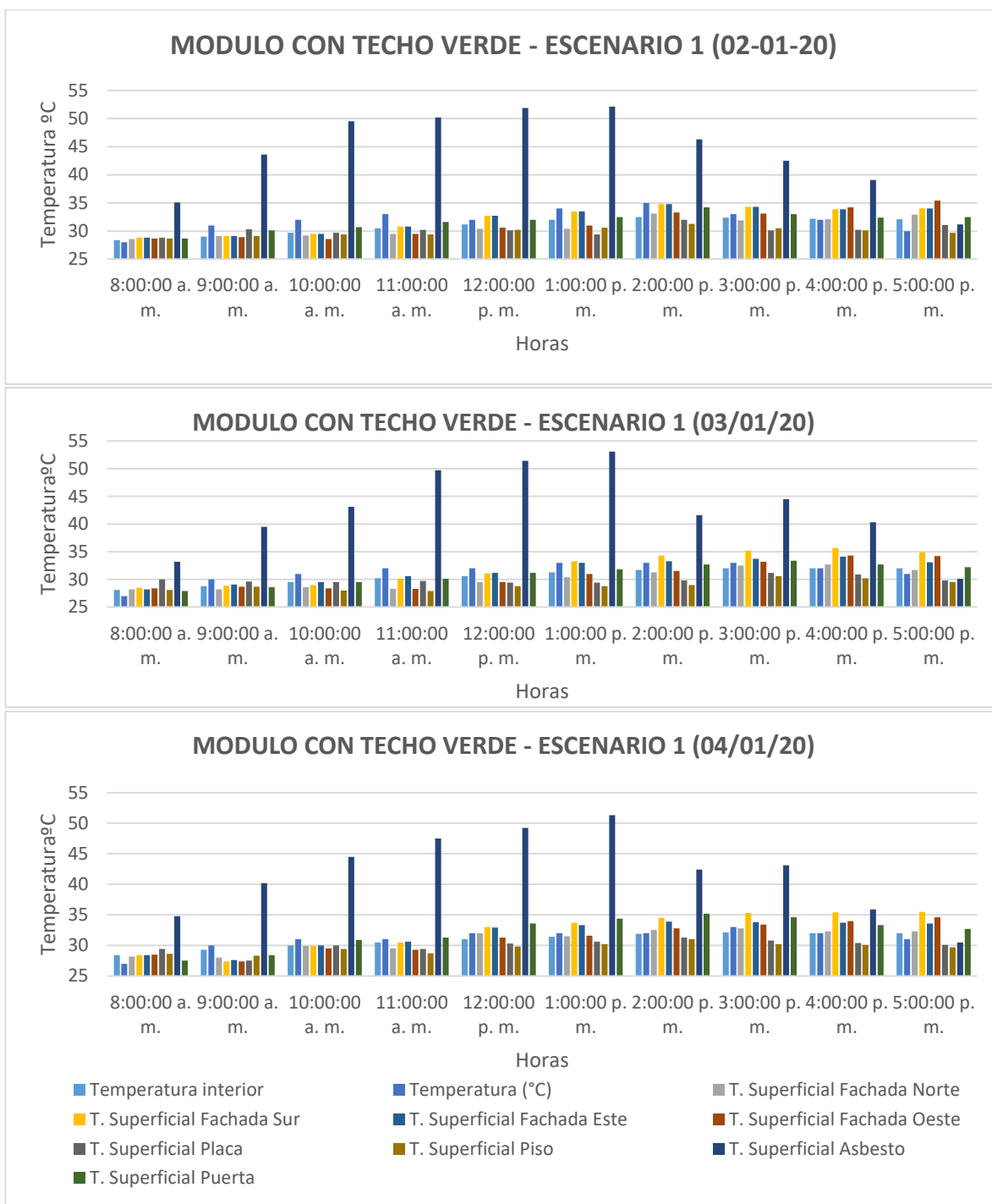


Ilustración 63. Temperaturas para el escenario 1 del techo verde.
 Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

A partir de las gráficas se puede observar un comportamiento constante respecto a la hora del día para cada una de las variables analizadas. Las temperaturas interiores y exteriores para los tres días se encuentran por debajo de los 30°C al inicio de las mediciones y a medida que van avanzando las horas estas temperaturas empiezan a subir de una forma muy lenta; por otro lado, se puede percibir que al inicio y al final de las mediciones la temperatura exterior se encuentra por debajo de la temperatura al interior de la unidad, pero el resto del tiempo la temperatura exterior es mayor que la temperatura interior. Se pudo observar también que la lámina de asbesto absorbe más calor que los demás elementos analizados y por esta razón va aumentando rápidamente su temperatura superficial a lo largo del día y de la misma forma la libera cuando se empieza a esconder el sol; su comportamiento durante los días de la medición fue de forma similar pues los valores de las temperaturas eran aproximados para los tres días del estudio. Por otro lado, se puede ver una diferencia en la placa de esta unidad pues al contener el “Techo verde” se ve reflejada una disminución en su temperatura superficial, manteniéndose constante a lo largo del día pues sus valores no superan el rango de 3°C, a diferencia de la lámina de asbesto que sus valores superan el rango de 20°C. Para el resto de las variables, el comportamiento de cada una de estas fue muy similar para cada hora en los tres días. Por lo descrito anteriormente se puede suponer que es correcto realizar un promedio para los tres días del escenario, pues se comportan de la misma forma.

Teniendo en cuenta que para la unidad con techo verde no se realizó ningún cambio, las temperaturas se mantuvieron constantes a lo largo del proyecto y el comportamiento de las gráficas tiende a ser muy similar, por esta razón el análisis realizado a estas gráficas es el mismo y resulta repetitivo consignarlo a continuación, por lo que las gráficas serán incluidas como anexos. Solo se tendrá en cuenta el escenario 4, que a pesar de presentarse el mismo comportamiento fue el inicio de la segunda vegetación y por esta razón será tenido en cuenta como representativo para los tres escenarios restantes pertenecientes a la vegetación “barquillo”.

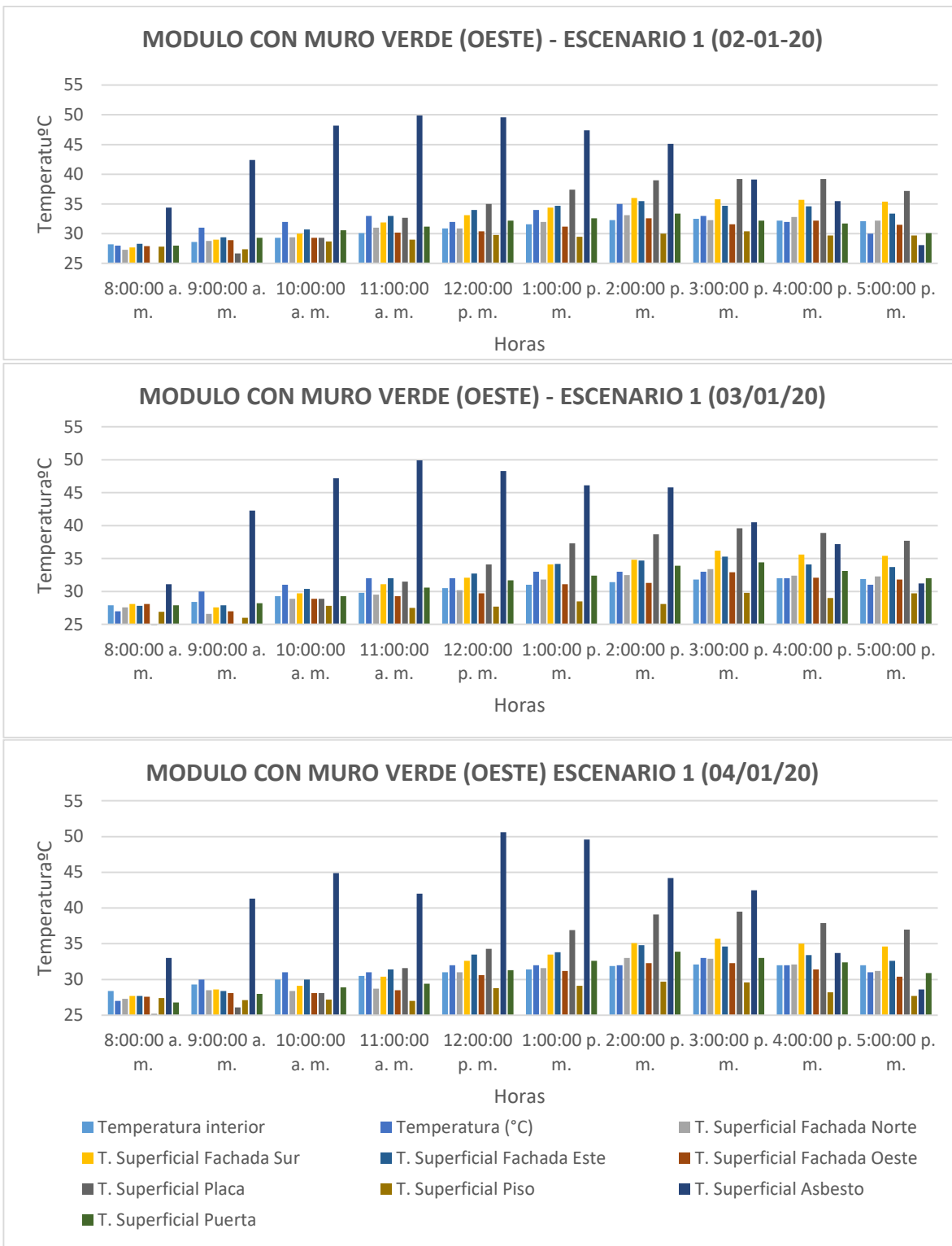


Ilustración 64. Temperaturas para el escenario 1 del Muro verde.
 Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

Al inicio de las mediciones se puede observar un comportamiento constante para la mayoría de las temperaturas, pero sobresalen las temperaturas superficiales de la lámina de asbesto y de la placa; la temperatura de la lámina empieza a absorber calor rápidamente y a aumentar, mientras que la temperatura de la placa se encuentra por debajo del promedio de las demás mediciones, estas conductas pueden deberse a las propiedades de cada material pues la tendencia es que la lámina de asbesto absorbe y libera el calor de una manera más rápida, es por esta razón que cuando se toma la primera medida del día el sol ya ha salido y por esto la lámina había absorbido el calor, mientras que para la placa se puede observar que la tendencia es absorber y liberar el calor más lento, la placa libera todo el calor durante la noche y tiende a quedar en equilibrio con la temperatura ambiente de la noche que está por debajo de los 27°C y cuando se toma la primera medida del día apenas empieza a absorber el calor y se encuentra más baja; cabe decir que el material de los muro y de la placa no es el mismo, es por esto que el comportamiento no es el mismo. Por otro lado, esta placa no contiene “techo verde” lo que permite que las temperaturas puedan variar a lo largo del día y la noche.

En el escenario 1 el muro verde estuvo ubicado en la fachada oeste, lo que permitió que la temperatura superficial en esta fachada se mantuviera constante a lo largo del día para las tres gráficas, incluso después del medio día que le da el sol directamente. Para la fachada Este y Sur se puede ver un incremento de la temperatura a medida que avanza el día mientras que en la fachada norte permanece constante pues no tiene radiación solar directa a lo largo del día.

Para el escenario 2 (*ilustración 65*) se pudo observar que a medida que aumenta la temperatura exterior aumentan las temperaturas internas de la unidad. En este escenario el muro verde se ubicó en la fachada sur, fachada en la que existe incidencia directa del sol durante todas las horas del estudio; al ubicar el muro en ésta permitió que las temperaturas a lo largo del día permanecieran constantes; de la misma forma que ocurre con la fachada norte, la cual no tiene incidencia directa del sol durante ningún momento del día. Para las fachadas Este y Oeste se puede observar un aumento de las temperaturas con el paso de las horas, las de la fachada Este empiezan a subir en las primeras horas del día mientras que en la fachada Oeste empiezan a subir las temperaturas hacia las últimas horas del día, esto se debe al recorrido que hace el sol durante el estudio.

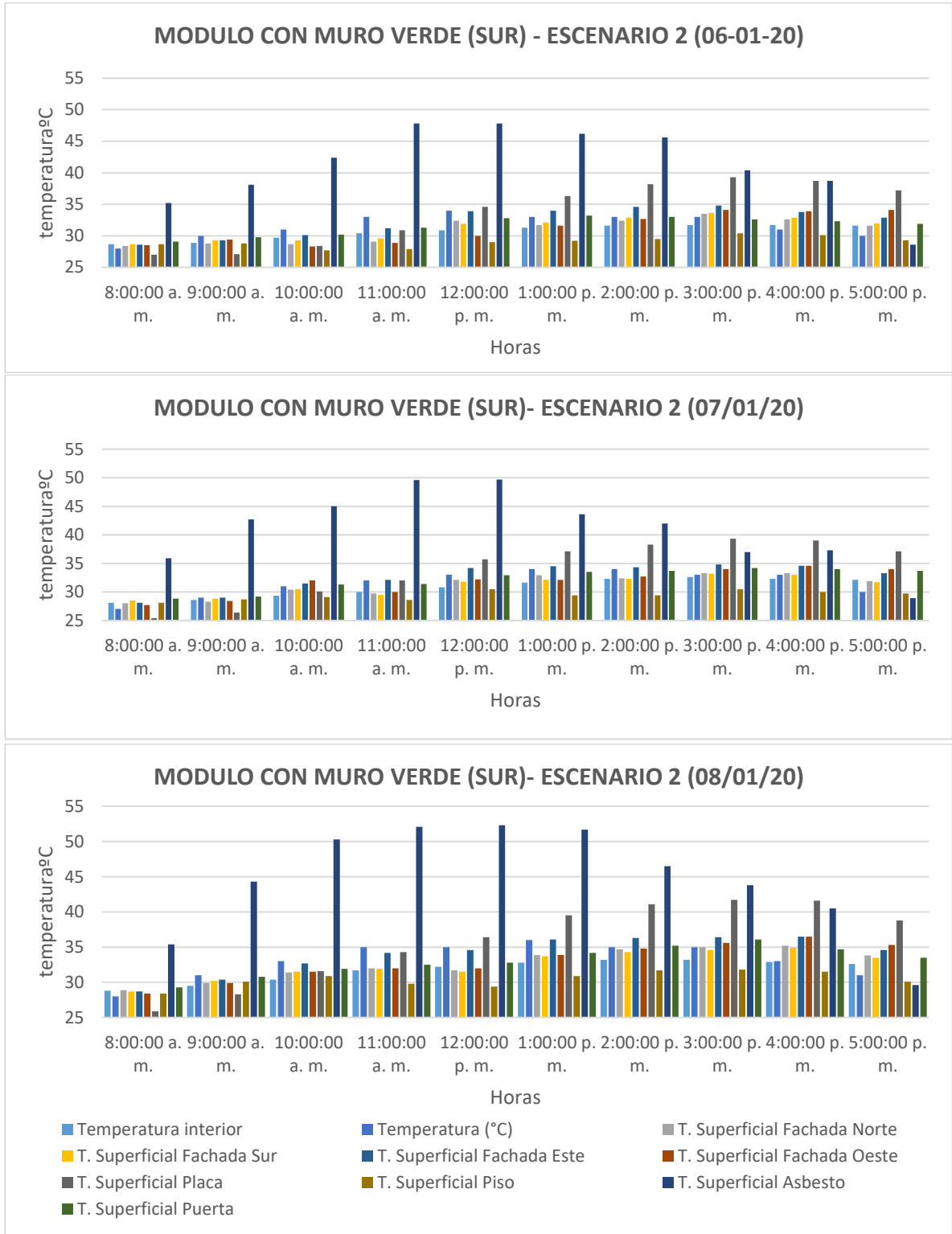


Ilustración 65. Temperaturas para el escenario 2 del Muro verde.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

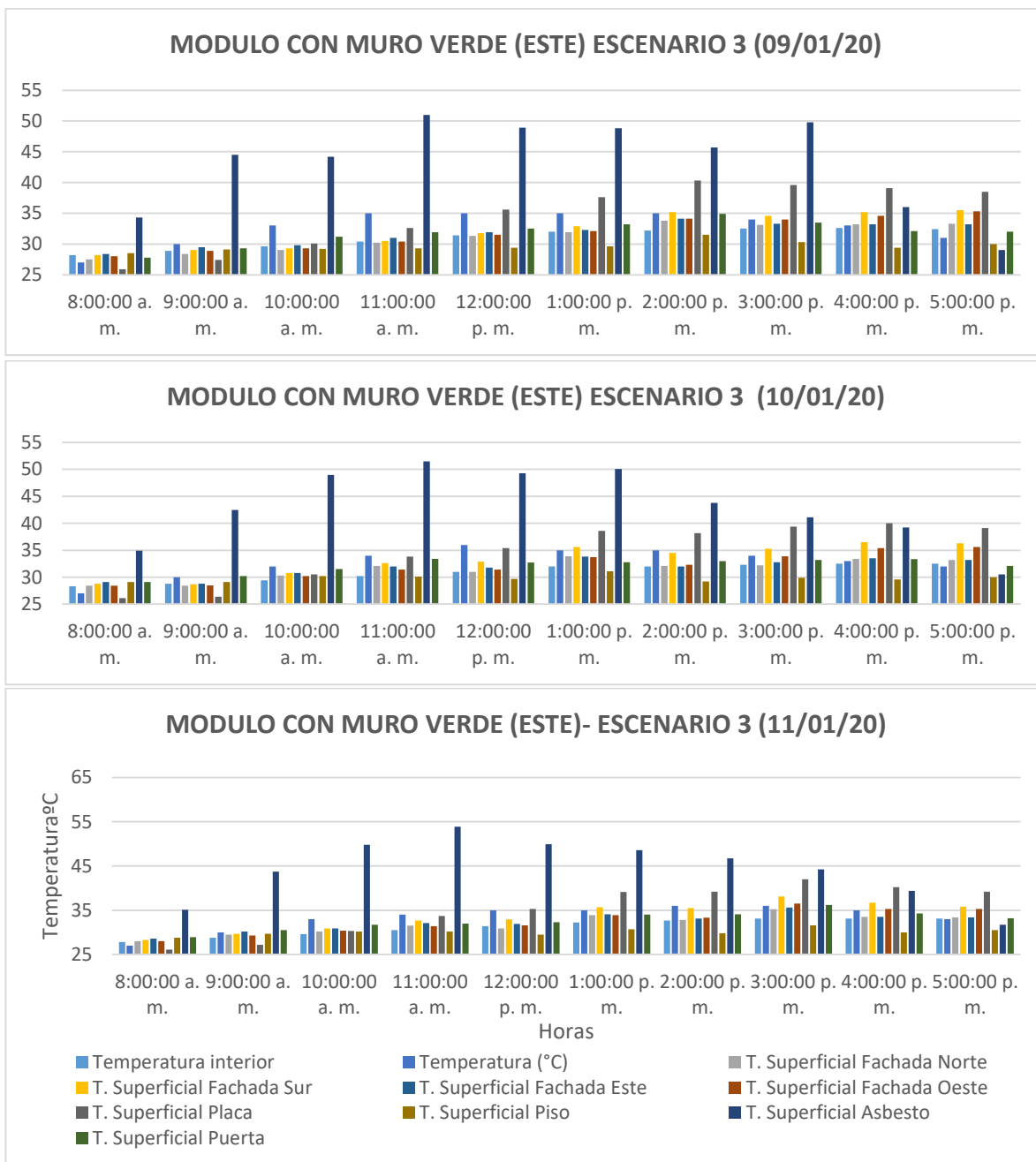


Ilustración 66. Temperaturas para el escenario 3 del Muro verde.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

Para el escenario 3 se ubicó el muro verde en la fachada Este, permitiendo que su temperatura superficial se mantuviera constante al igual que en la fachada Norte; la temperatura superficial de la fachada Sur fue la más alta de todas las fachadas durante las medidas de este escenario debido a la incidencia del sol, la fachada Oeste solo aumentó su temperatura en las horas de la tarde porque es el momento en que le da el sol.



Ilustración 67. Temperaturas para el escenario 4 del Muro verde.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

En el escenario 4 la Temperatura exterior tiende a aumentar hasta medio día, luego de allí permanece estable las siguientes dos horas y luego ir decreciendo hasta el final de las mediciones. La Temperatura interior en comparación a la exterior tiende ser mayor a las ocho de la mañana, en las demás horas generalmente la exterior es mayor con tendencia a ser menor o igual en las dos últimas horas. Lo anterior se podría deber a que los materiales con los cuales están construidos los módulos de vivienda tienden a ganar y perder temperatura lentamente en relación a los cambios de temperatura exterior, lo que contribuye a que las temperaturas interiores sean menores que las de afuera a las horas de mayor radiación solar. Las fachada Norte y Sur tienen temperaturas casi iguales durante el periodo de medición a excepción de la fachada Este que tiende a ser mayor durante el día y la Oeste tiende a ser mayor que Norte y Sur durante la tarde; esto se debe que durante este escenario el muro verde se instaló en la fachada sur evitando que esta recibiera radiación directa del sol, a su vez por la posición del módulo la fachada norte no recibe radiación directa durante las horas de medición, entonces estas tienden a tener temperaturas casi iguales. Por otro lado, la fachada Este recibe sol directo durante el día mientras que por la tarde es la fachada Oeste quien está expuesta a la radiación solar directa. Por tal razón para este escenario las fachadas Este y Oeste presentaron una temperatura superficial mayor en comparación a las demás.

Para los tres días, La temperatura de la placa tiende a ser menor o igual que las fachadas durante las tres primeras horas, luego es mayor que estas el resto de las mediciones; a su vez después de una de la tarde la placa tiende a exceder la temperatura ambiente hasta la hora final del aforo. La temperatura de la lámina es mayor que las demás superficies a excepción de la última hora en la cual está por debajo que la de las fachadas. Lo anterior puede deberse a que la cubierta está expuesta todo el tiempo a la radiación directa y sumado a las propiedades de los materiales, se observa lo representado en las gráficas. La temperatura de la puerta tiende a ser casi igual a las fachadas durante las dos primeras horas después tiende ser mayor durante las horas posteriores y culmina siendo menor durante las dos últimas horas, la puerta aunque se encuentra en la fachada norte y se espera que no reciba radiación directa, se observó que a través de la ventana cuando el sol hace su recorrido por el Este recibe parte de esa radiación y sumado al tipo de material gana rápidamente temperatura a partir de la tercera hora y se observa el comportamiento representado.

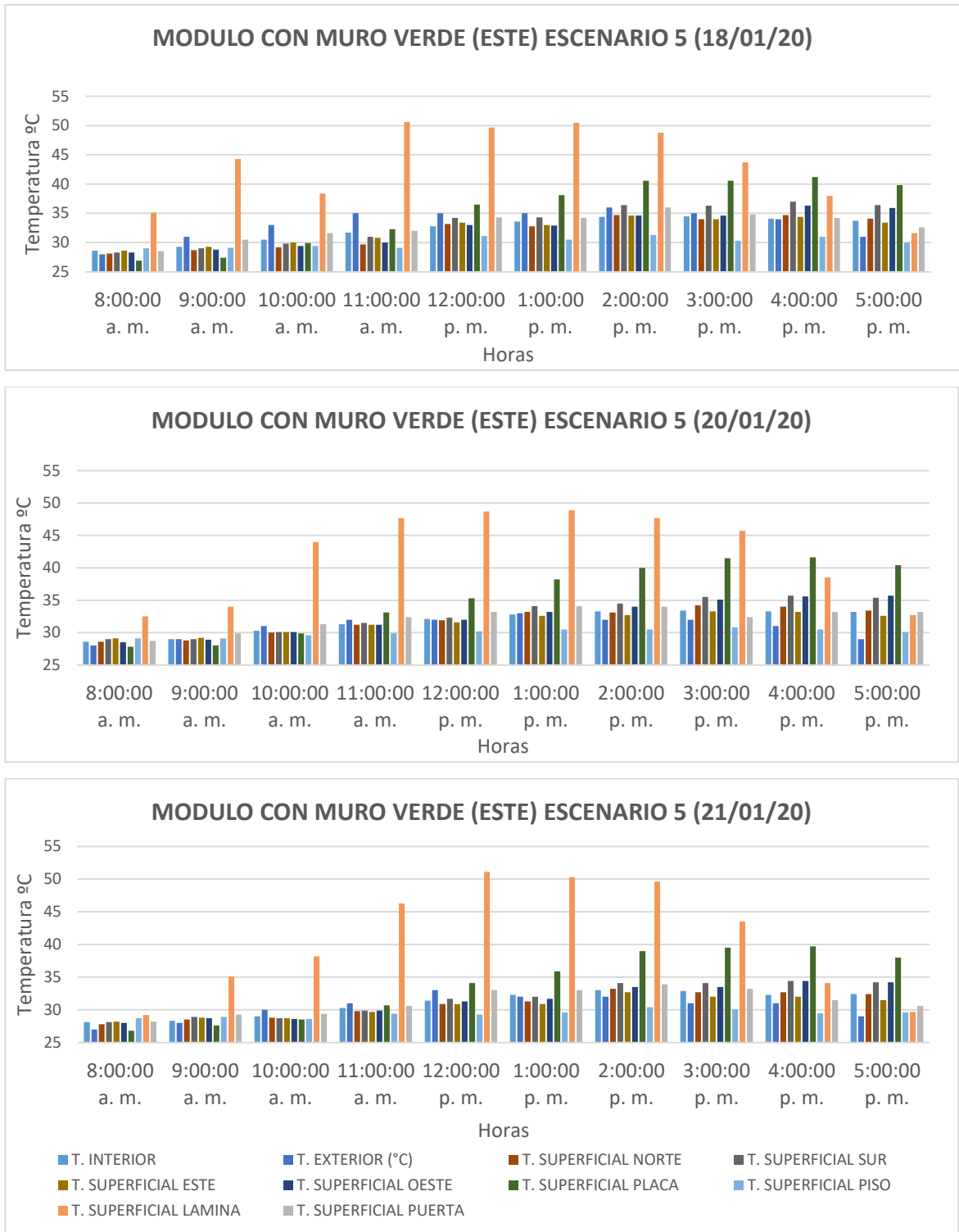


Ilustración 68. Temperaturas para el escenario 5 del Muro verde.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

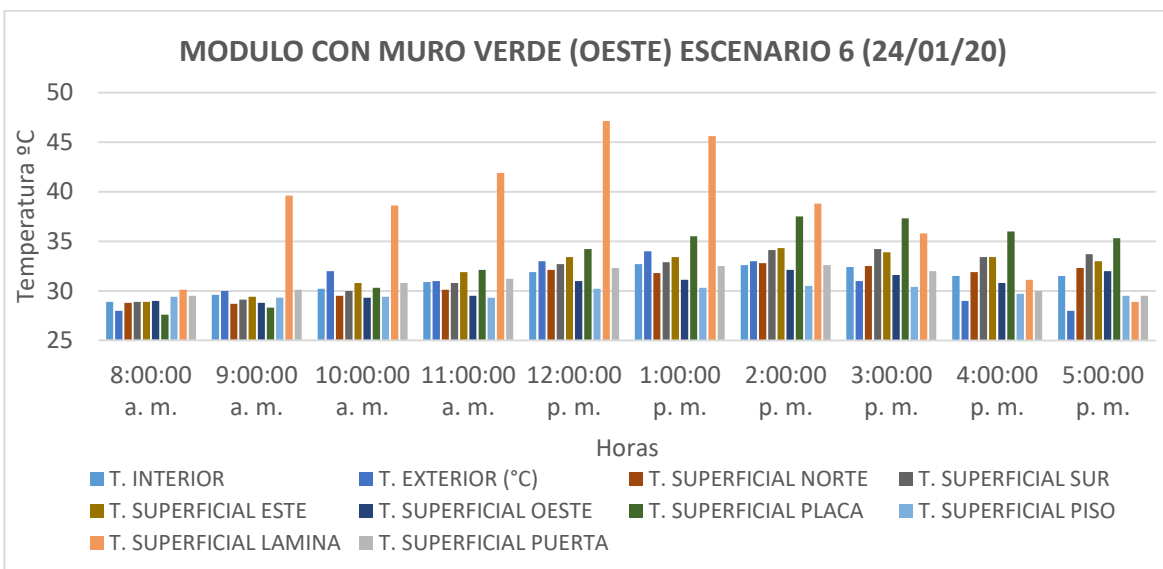
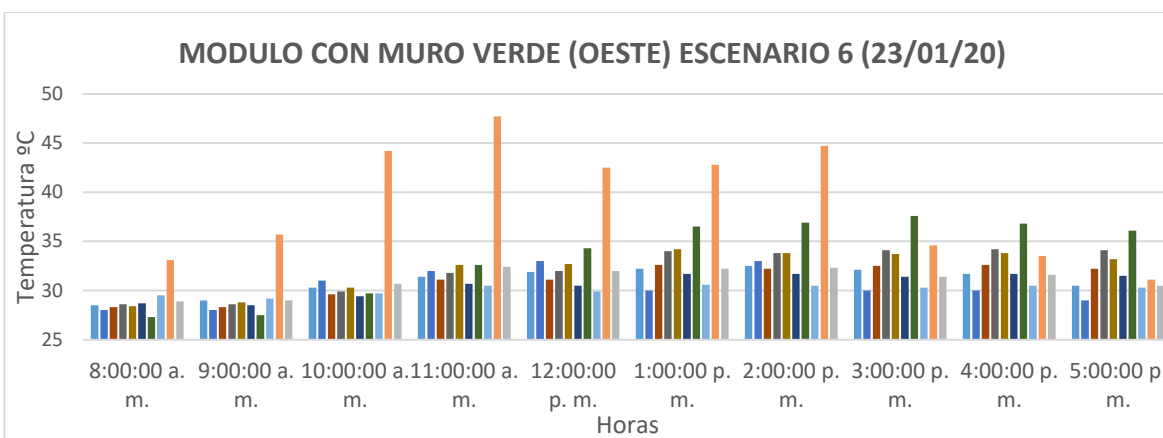
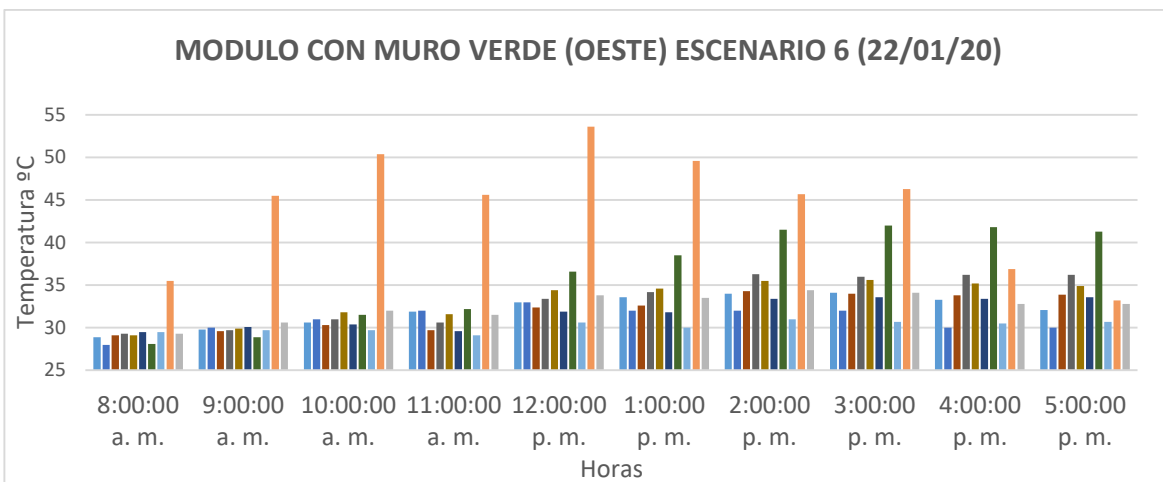


Ilustración 69. Temperaturas para el escenario 6 del Muro verde.
 Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

En el escenario 5 (*ilustración 68*) La temperatura interior y exterior presentan tendencias diferentes durante los tres días de mediciones, para el primer día la temperatura interior tiende a ser menor en la mayoría de horas mientras que para los dos días posteriores tiende a ser mayor que la exterior. No se distingue un cambio progresivo ni decreciente sino aleatorio en función del tiempo. Para las fachadas se observa para los tres días, un mayor incremento en la fachada sur, mientras las demás incrementan en menor cantidad y relativamente igual hasta medio día, luego de allí la fachada oeste y tiende a alcanzar la temperatura de la fachada sur mientras que norte y este están por debajo de ambas siendo la fachada este en algunos casos menor que la norte. Para las superficies restantes como puerta, piso, placa y lámina de cubierta las tendencias son relativamente iguales durante los tres días siendo siempre la lámina la de mayor temperatura, seguido de la placa, puerta y por último el piso. Todas tienden a incrementar rápidamente a excepción del piso y a decrecer rápidamente en comparación a las fachadas.

En el escenario 6 (*ilustración 69*) Para este escenario las temperaturas exterior e interior difieren un día respecto a otro ya que para el segundo día la temperatura exterior tiene dos puntos máximos a diferencia de los otros dos días donde la tendencia es incrementar a un punto máximo y luego disminuir. Para el primer día la temperatura interior es menor solo de 9 a 12 mientras que para el segundo solo de 10 a 12 y posteriormente a las 2, y para el tercer día esta es continuamente menor de 12 a 2. La temperatura de las fachadas tienden a aumentar a medida que aumenta la temperatura exterior siendo mayor para los tres días en las fachadas sur y este en relación a las dos restantes, la fachada oeste generalmente presentó temperaturas menores en relación a las demás. La temperatura de la placa es generalmente mayor que las fachadas a partir de las 11, alcanzando su valor máximo de 2 a 3 de la tarde. La temperatura de la lámina de cubierta es mayor que las demás superficies de 9 a 4 y tiende a incrementar o disminuir en función de la temperatura exterior. Las temperaturas del piso y puerta tienen comportamientos similares para los tres días en donde generalmente el piso tiene una temperatura menor que todas las superficies.



Para las mediciones realizadas en el módulo que tiene el techo verde se observó un comportamiento similar, pero con temperaturas que difieren de un día respecto a otro, las tendencias para cada variable se mantienen para todos los días. En el caso de la temperatura exterior, está en la mayoría de los casos es mayor que la interior generalmente de 9 a 4. Para las fachadas se observó un incremento mayor en la fachada este y sur durante el día, y sur y oeste durante la tarde.

Tanto la placa como el piso presentan las temperaturas más bajas en comparación a más demás superficies, la temperatura de la puerta tiende a ser igual o un poco mayor a la fachada con mayor temperatura durante el día, pero en la tarde decrece por debajo de las temperaturas de la fachada. Por último, la temperatura de la lámina es la mayor de las demás, aumenta rápidamente durante el día y puede bajar y subir nuevamente la temperatura logrando varios picos de temperatura en algunos casos.

6.3 ANALISIS DE ESCENARIOS

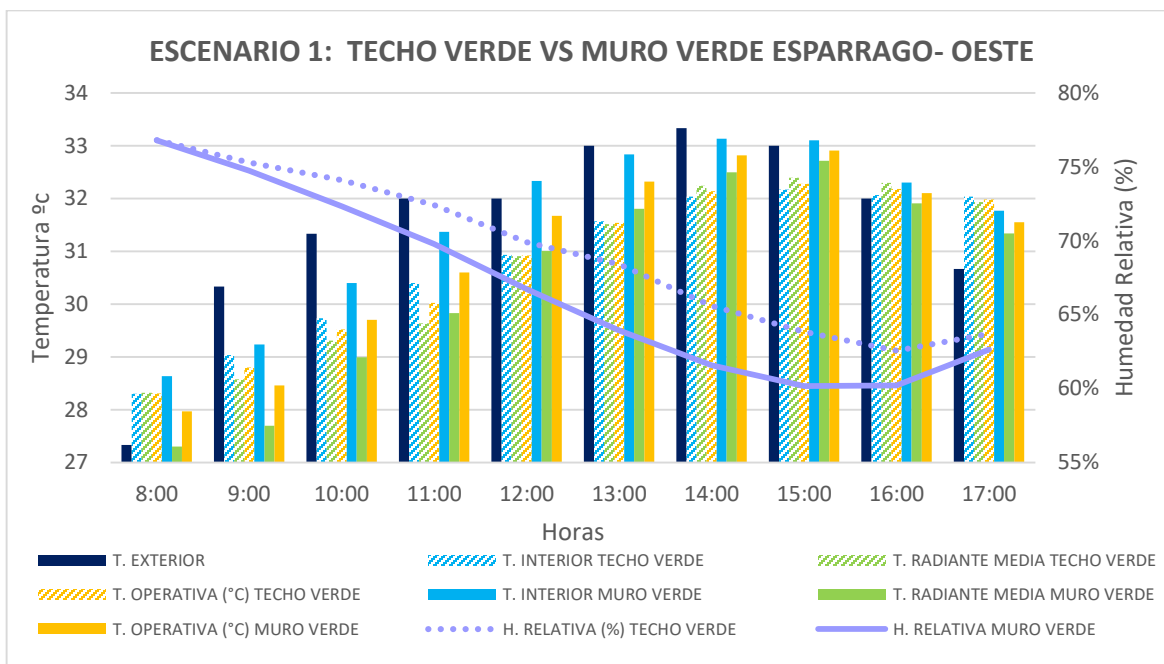


Ilustración 70. Humedad relativa promedio y temperaturas promedio para el primer escenario.
 Fuente:(Barón & Navarro, 2020)

Para el primer escenario, en la unidad habitacional con techo verde generalmente se presenta una mayor humedad relativa y una menor temperatura interior que la unidad con muro verde, a excepción de la última hora de medida donde la temperatura interior es mayor en la unidad con techo verde. De acuerdo a los parámetros anteriores, la unidad habitacional con techo verde presenta mejores condiciones térmicas que la otra unidad; sin embargo puntualmente se observa que tanto la temperatura radiante como la temperatura operativa son mayores en la unidad con techo verde durante las dos primeras y dos últimas horas de medición, obteniendo que para esas horas los índices de confort térmico sean menores en el módulo con muro verde; esto se puede identificar en la *Ilustración 76*, la cual muestra que para las horas 8, 9, 16 y 17, los valores de PMV y PPD son mayores en la unidad habitacional con techo verde lo que significa un menor bienestar térmico durante esas horas en comparación a la otra unidad, no obstante para las demás horas las condiciones térmicas son mejores que en el módulo con muro verde. El comportamiento de la temperatura exterior no siempre es mayor a la interior en cada unidad ya que como se observa en *Ilustración 70* esta es menor generalmente a la hora de inicio y a la hora final de las mediciones.

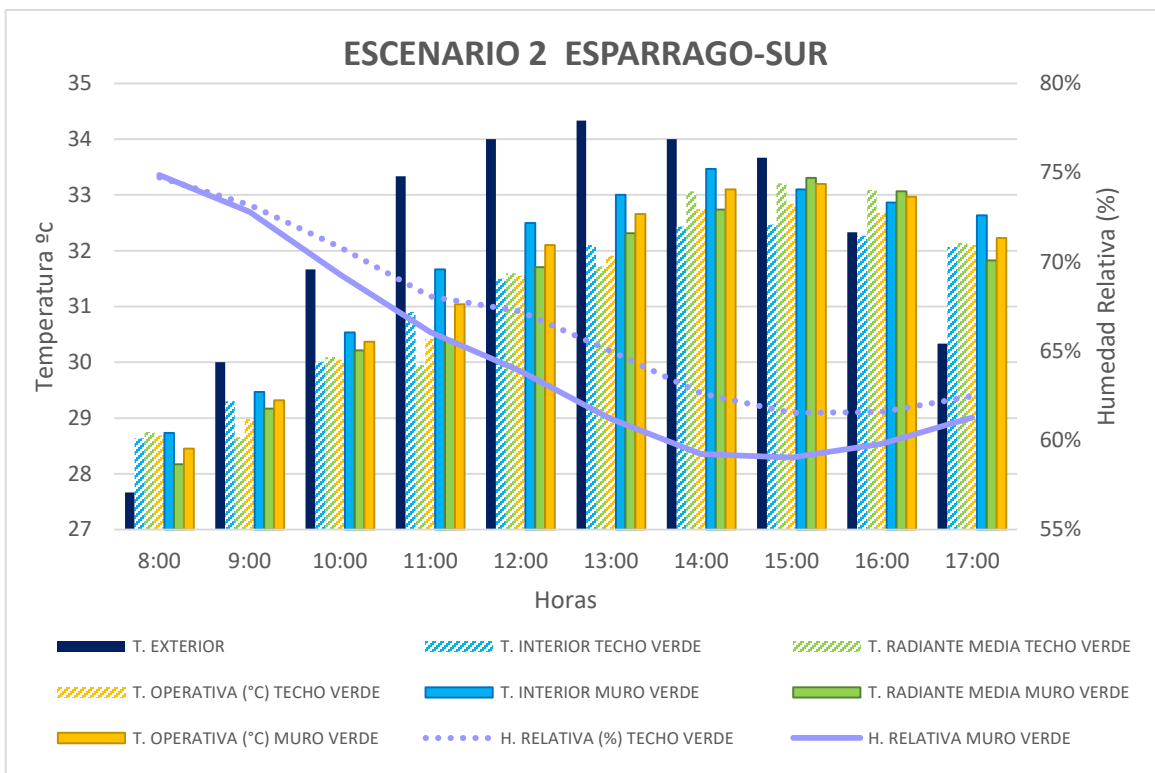


Ilustración 71. Humedad relativa promedio y temperaturas promedio para el segundo escenario.

Fuente:(Barón & Navarro, 2020)

Al igual que el primero, en el segundo escenario la unidad con techo verde presenta una humedad relativa mayor y una temperatura interior menor con respecto a la unidad con muro verde, también se observa que la temperatura exterior es menor que la interior para ambos módulos a las 8, 16 y 17 horas, estableciendo para las horas especificadas unas mejores condiciones de temperatura fuera de cada unidad que dentro de estas. Por otro lado la temperatura radiante en la unidad con muro verde es menor que la del techo verde a las 8, 14 y 17 horas, mientras que la temperatura operativa solo es a las 8 horas (Ver ilustración 71); lo que manifiesta que aunque ambos parámetros tienen una relación, no tienen el mismo comportamiento ya que la temperatura operativa también depende de la temperatura interior de cada módulo y como resultado se obtuvo, a excepción de la primera hora, temperaturas operativas mayores en la unidad con muro alcanzando como se muestra en la Ilustración 76 unos mayores índices de PMV y PPD y por ende unas mejores condiciones térmicas en módulo con techo verde.

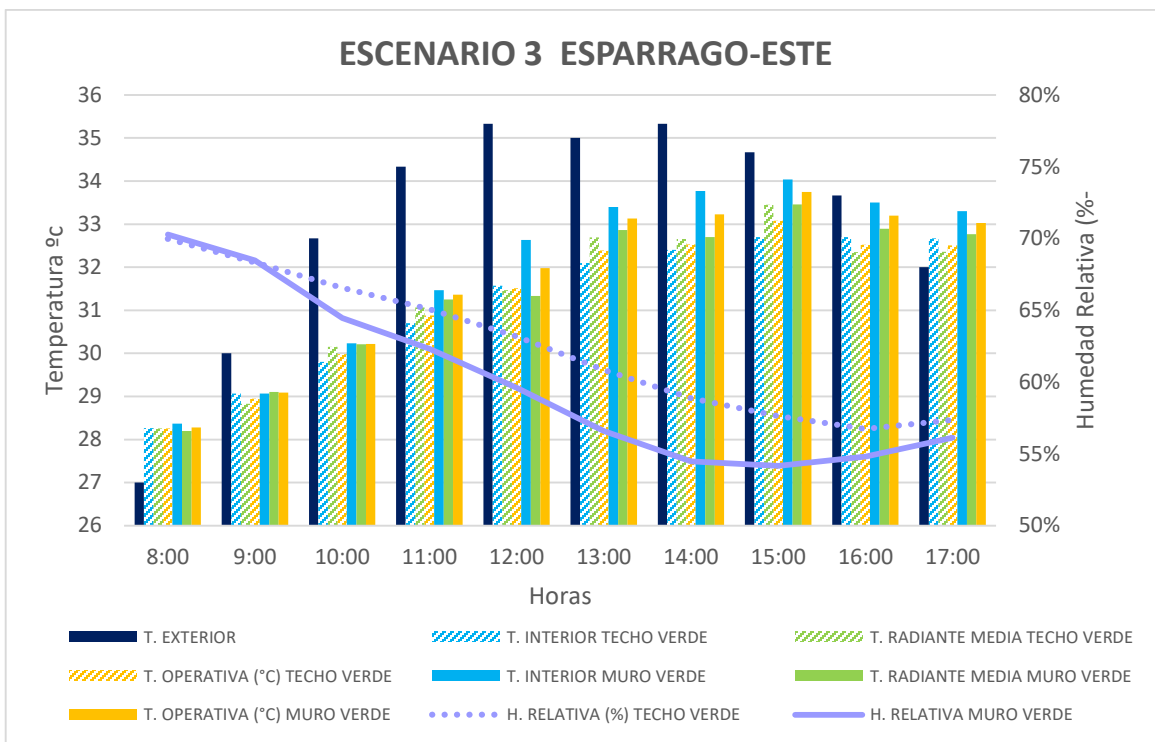


Ilustración 72. Humedad relativa promedio y temperaturas promedio para el tercer escenario.
 Fuente:(Barón & Navarro, 2020)

Para el tercer escenario tanto la humedad relativa como la temperatura interior presentan las mismas tendencias que los escenarios anteriores: es decir una humedad mayor, una temperatura interior menor y una temperatura operativa menor en la unidad con techo verde para todas las horas. En el caso de la temperatura radiante, solamente es mayor a las 8 horas y las 12 horas en la unidad con techo verde, para las demás horas esta es generalmente menor a la unidad con muro verde. Por último, la temperatura exterior solo es menor a las demás, a primera y última hora, el resto del tiempo las temperaturas son menores al interior de los módulos. Debido a lo anterior para este escenario los indicadores de confort establecen unas mejores condiciones térmicas en el módulo con techo verde debido a que presentan valores de PMV y PPD más bajos como los representados en la *ilustración 76*, sin embargo, eso no indica que estas condiciones sean aceptables y cumplan con la norma ya que como se representa en la TABLA 15 las sensaciones térmicas son de ligeramente cálidas a calurosas fuera de los límites de neutralidad térmica.

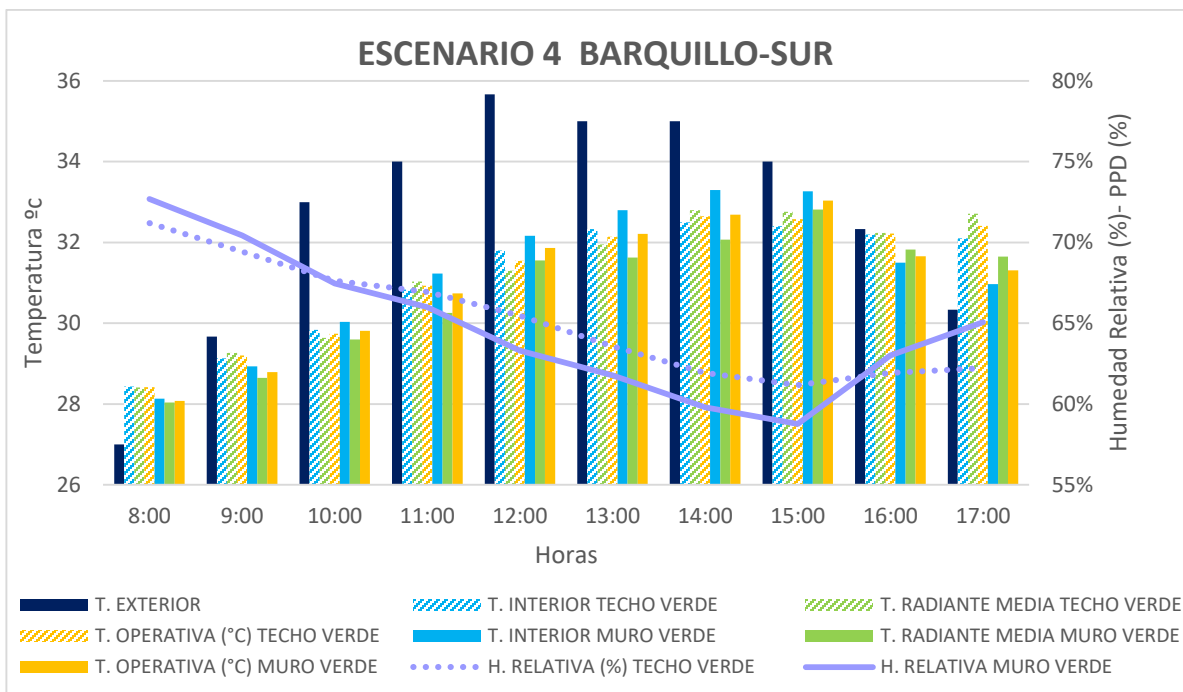


Ilustración 73. Humedad relativa promedio y temperaturas promedio para el cuarto escenario.

Fuente:(Barón & Navarro, 2020)

En el cuarto escenario se cambia la vegetación del muro verde por Barquillo Morado y se inician las mediciones con el muro verde ubicado en la fachada Sur. Los parámetros presentan variaciones respecto a los tres escenarios anteriores puesto que no es tan evidente como en los casos anteriores que la unidad con techo verde se desempeñe térmicamente mejor que la otra. Debido a que para modulo con techo verde las temperaturas interiores son mayores en 4 de las 10 horas de medición mientras que las temperaturas operativas son mayores en 5 de las 10 horas de medición; por lo que se obtuvo como resultado para el techo verde, índices de PMV y PPD mayores en 6 de las 10 horas de medición como se muestra en la *ilustración 77*, estableciendo que para este escenario el sistema de muro verde obtuvo en promedio unas mejores condiciones térmicas que la unidad con techo verde. Sin embargo, como en se muestra en la *Tabla 16* y al igual que los escenarios anteriores la sensación térmica en ambos módulos no es neutra por lo que no cumple con los requisitos de aceptabilidad térmica. En relación a la temperatura radiante media se observa generalmente un valor mayor en la unidad habitacional con techo verde, implicando superficies con mayor temperatura durante la mayor parte del tiempo; con respecto a la humedad relativa esta tiende a ser mayor desde las 10 a las 15 horas, pero menor el resto del tiempo.

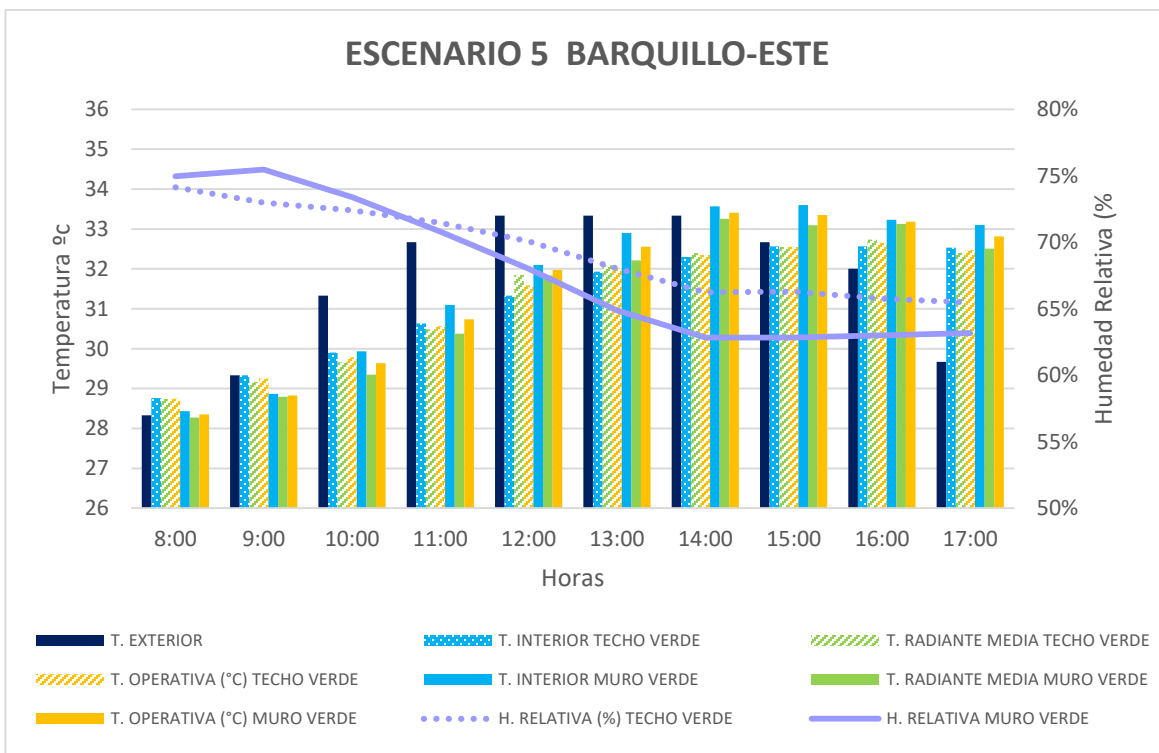


Ilustración 74. Humedad relativa promedio y temperaturas promedio para el quinto escenario.
 Fuente:(Barón & Navarro, 2020)

Para el quinto escenario se observa que para las tres primeras horas las condiciones térmicas son mejores en el módulo con muro verde, debido a que se presentan temperaturas interiores, radiantes y operativas menores que las del módulo con techo verde, sin embargo para el resto de horas el comportamiento es opuesto, con temperaturas menores en sistema de techo verde y mayores en el sistema de muro, de igual manera se puede ratificar con los índices de confort en la ilustración 77 donde se muestran unos valores de PMV y PPD mayores para el módulo con techo verde, durante las tres primeras horas pero menores el resto de mediciones. La humedad relativa durante las tres primeras horas tiene un porcentaje mayor en modulo con muro verde pero luego se comporta igual que los escenarios anteriores es decir con un mayor porcentaje de humedad relativa en el módulo con techo verde.

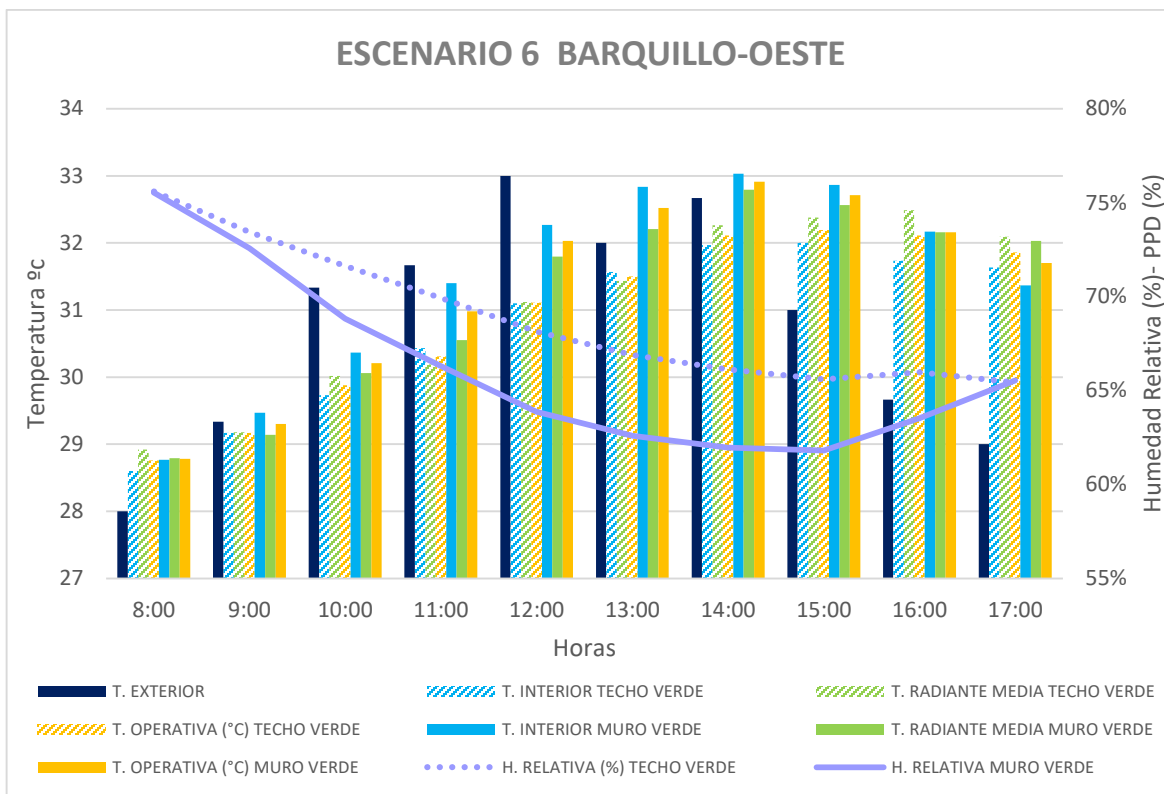


Ilustración 75. Humedad relativa promedio y temperaturas promedio para el sexto escenario.
 Fuente:(Barón & Navarro, 2020)

Para el sexto escenario, se ubicó el muro verde en la fachada oeste y comportamiento de los parámetros medidos para cada hora se puede observar en la *ilustración 75*, se puede identificar que en la unidad con techo verde se presentó una humedad relativa mayor, una temperatura interior menor y una temperatura operativa menor en comparación de la unidad con muro verde, a excepción de la última hora en donde el comportamiento fue el opuesto. Por otra parte, la temperatura radiante es mayor las dos primeras y las dos últimas horas para el módulo con techo verde y se obtuvo índices de PMV y PPD menores las ocho primeras horas en la unidad con techo verde en relación a la unidad con muro verde (*ver ilustración 77*). Concluyendo así unas mejores condiciones térmicas en el módulo con techo verde durante las 8 primeras horas y un mejor índice de confort para módulo con muro verde las dos horas restantes.

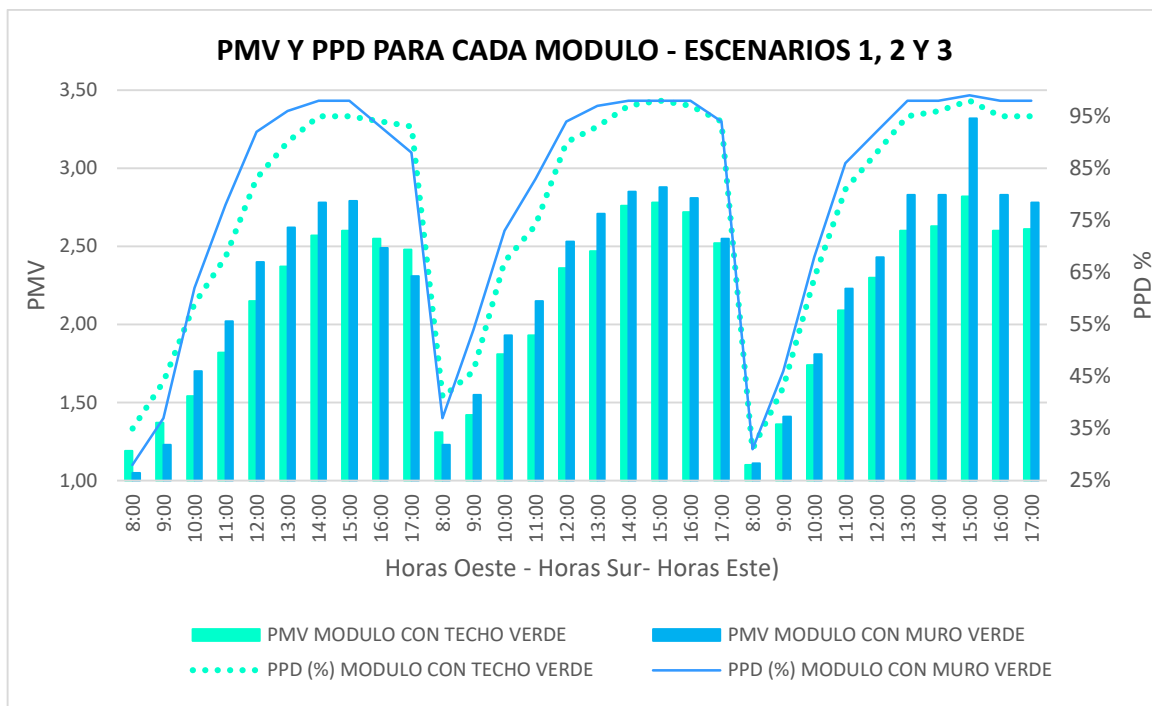


Ilustración 76. Índices de confort térmico PMV y PPD para los escenarios 1, 2 Y 3. Fuente:(Barón & Navarro, 2020)

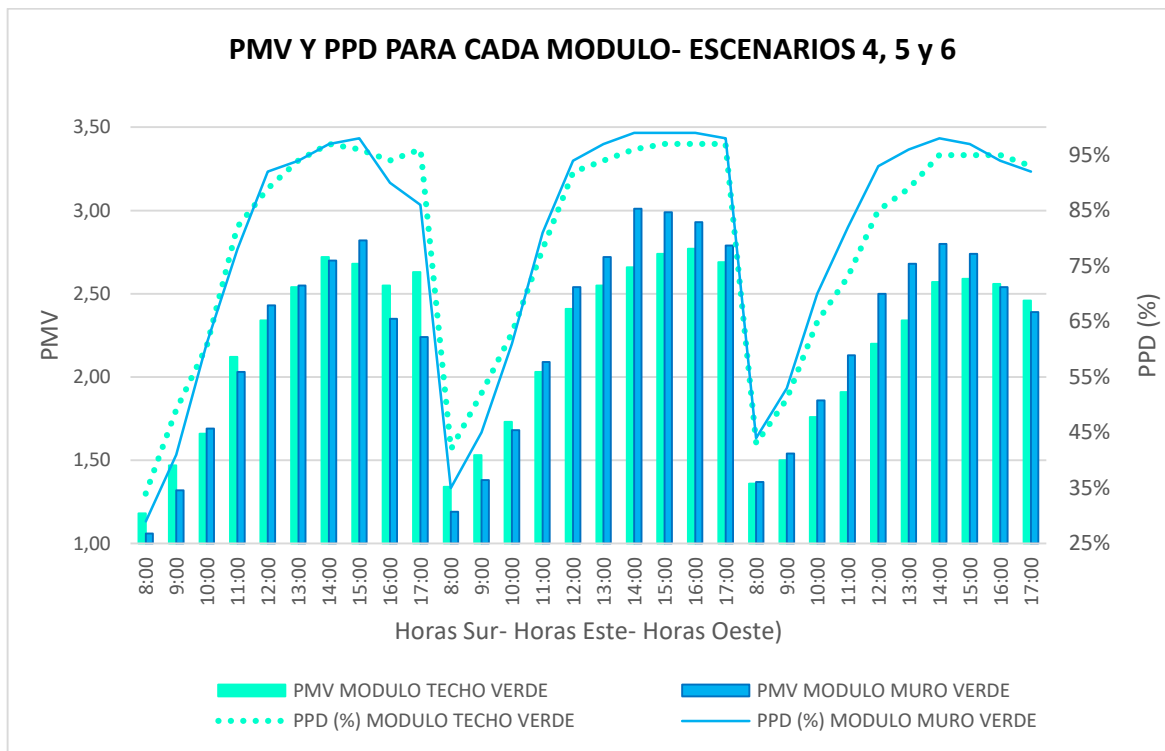


Ilustración 77. Índices de confort térmico PMV y PPD para los escenarios 4, 5 y 6. Fuente:(Barón & Navarro, 2020)

Tabla 15. Sensación térmica y confort térmico por hora para los escenarios 1,2 y 3 en cada módulo.

ESCENARIO	Hora	MODULO TECHO VERDE		MODULO MURO VERDE	
		SENSACION TÉRMICA	CONFORT TÉRMICO	SENSACIÓN TÉRMICA	CONFORT TÉRMICO
1. Techo Verde vs Muro Verde (Esparrago-Oeste)	8:00	Poco cálido	No Cumple	Poco Cálido	No Cumple
	9:00	Poco cálido	No Cumple	Poco Cálido	No Cumple
	10:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	11:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	12:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	13:00	Cálido	No Cumple	Caliente	No Cumple
	14:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
	15:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
	16:00	Caliente	No Cumple	Cálido	No Cumple
17:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple	
2. Techo Verde vs Muro Verde (Esparrago-Sur)	8:00	Poco cálido	No Cumple	Poco Cálido	No Cumple
	9:00	Poco cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	10:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	11:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	12:00	Cálido	No Cumple	Caliente	No Cumple
	13:00	Cálido	No Cumple	Caliente	No Cumple
	14:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
	15:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
	16:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
17:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple	
3. Techo Verde vs Muro Verde (Esparrago-Este)	8:00	Poco cálido	No Cumple	Poco Cálido	No Cumple
	9:00	Poco cálido	No Cumple	Poco Cálido	No Cumple
	10:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	11:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	12:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	13:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
	14:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
	15:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
	16:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
17:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple	

Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

Tabla 16. Sensación térmica y confort térmico por hora para los escenarios 4,5 y 6 en cada módulo.

ESCENARIO	Hora	MODULO TECHO VERDE		MODULO MURO VERDE	
		SENSACION TÉRMICA	CONFORT TÉRMICO	SENSACIÓN TÉRMICA	CONFORT TÉRMICO
4. Techo verde vs Muro verde (Barquillo-Sur)	8:00	Poco cálido	No Cumple	Poco Cálido	No Cumple
	9:00	Poco cálido	No Cumple	Poco Cálido	No Cumple
	10:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	11:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	12:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	13:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
	14:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
	15:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
	16:00	Caliente	No Cumple	Cálido	No Cumple
17:00	Caliente	No Cumple	Cálido	No Cumple	
5. Techo verde vs Muro verde (Barquillo-Este)	8:00	Poco cálido	No Cumple	Poco Cálido	No Cumple
	9:00	Cálido	No Cumple	Poco Cálido	No Cumple
	10:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	11:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	12:00	Cálido	No Cumple	Caliente	No Cumple
	13:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
	14:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
	15:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
	16:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
17:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple	
6, Techo verde vs Muro verde (Barquillo-Oeste)	8:00	Poco cálido	No Cumple	Poco Cálido	No Cumple
	9:00	Poco cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	10:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	11:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	12:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple
	13:00	Cálido	No Cumple	Caliente	No Cumple
	14:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
	15:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
	16:00	Caliente	No Cumple	Caliente	No Cumple
17:00	Cálido	No Cumple	Cálido	No Cumple	

Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

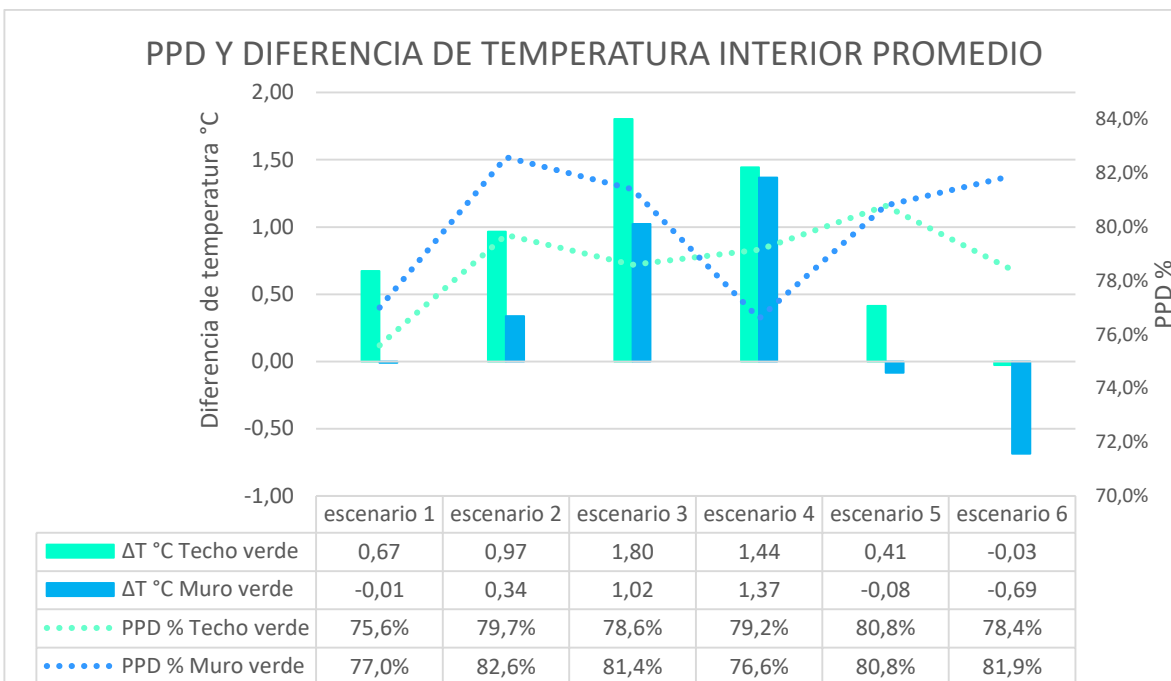


Ilustración 78. Diferencias de temperatura promedio y PPD promedio para cada escenario.
 Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

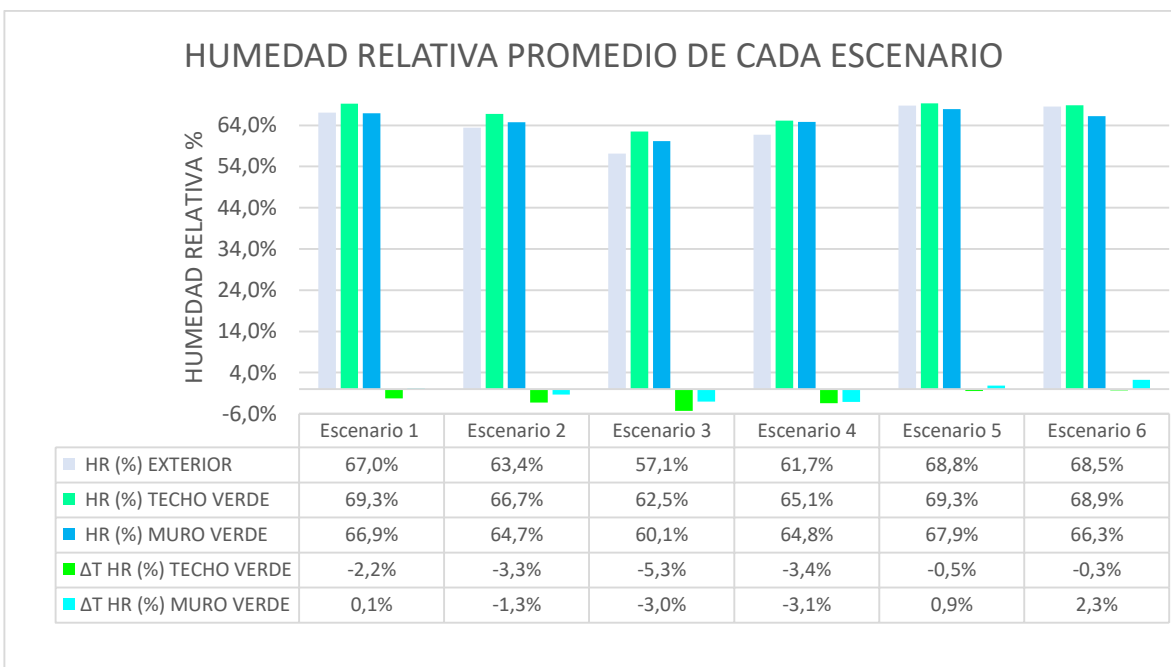


Ilustración 79. Humedad relativa y diferencia de Humedad Relativa por escenario.
 Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

6.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS DE VEGETACIÓN

Para establecer cuál de los dos sistemas tiene una mayor mejoría en las condiciones térmicas de cada unidad habitacional, se propuso inicialmente comparar el total de horas de confort en donde el PMV indicara un valor en el rango de -0,5 a 0,5 para una sensación térmica neutra, sin embargo como se observa en las *ilustraciones 76 y 77* los valores de PMV se encuentran por fuera de los límites, con valores mayores que 1; a su vez las TABLAS 14 y 15 muestran que la sensación térmica al interior de ambos módulos tiende a ser de ligeramente cálida a caliente para todas las horas y escenarios realizados.

También se comparó el promedio de las diferencias de temperatura exterior respecto a la interior para cada escenario, obteniendo como resultado una mayor disminución de la temperatura interior en la unidad con techo verde para 5 de los 6 escenarios, ya que en el escenario 6 en promedio la temperatura interior es mayor que la exterior, obteniendo una diferencia negativa. La *ilustración 78* muestra que, para todos los escenarios en promedio las diferencias de temperatura interior son menores en el módulo con muro verde. Estableciendo bajo este criterio que el sistema de techo verde ofrece mejores condiciones térmicas interiores que sistema de muro verde.

Debido a que ambos módulos no alcanzaron un confort térmico aceptable, el criterio de comparación se fundamentó en PPD y las diferencias de temperatura exterior e interior promedio para cada escenario. Se empleó el método D del anexo B de la norma UNE EN ISO 7730:2006 para el cual se calculó el PPD promedio en el tiempo durante las horas de medición obteniendo un único valor para cada escenario en cada módulo. La *ilustración 78* muestra que el PPD promedio del módulo con techo verde es menor en 4 de los 6 escenarios e igual en un escenario en comparación al módulo con muro verde, lo que indica que para los 6 escenarios en promedio se presenta menor porcentaje de insatisfacción térmica en la unidad con techo verde, es decir las condiciones térmicas en base a este criterio son mejores casi en su totalidad en el módulo con techo verde.

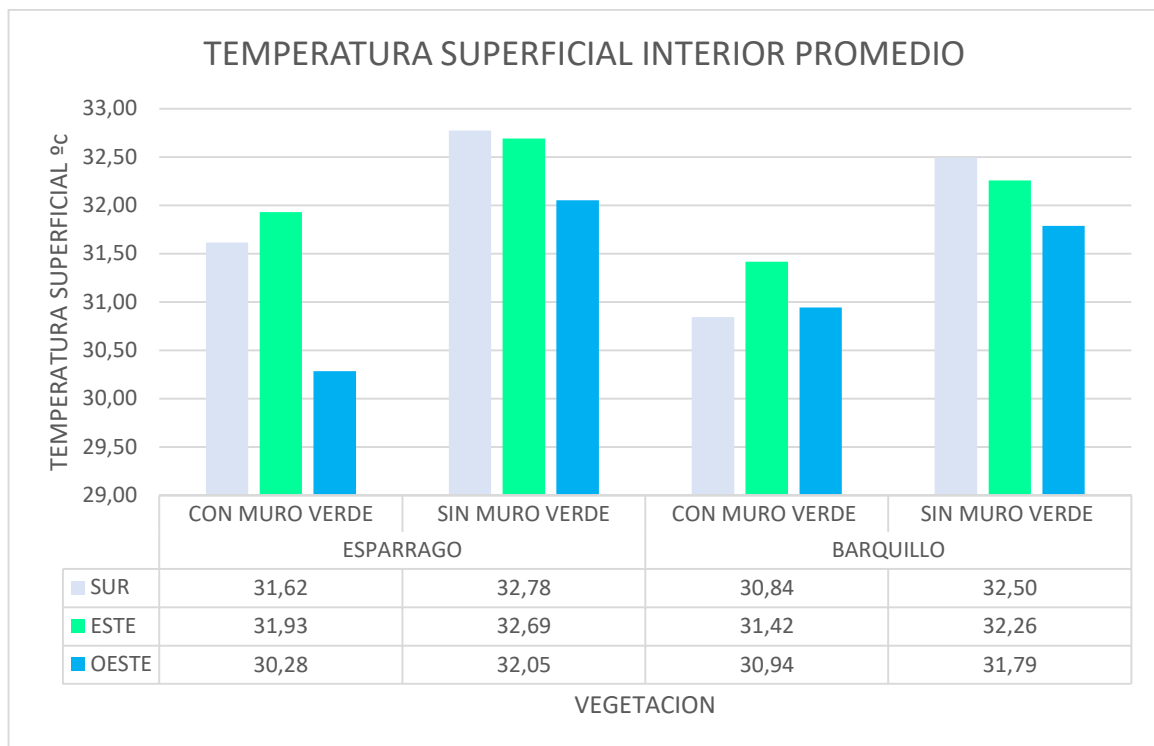


Ilustración 80. Temperatura superficial interior de cada fachada con y sin presencia de muro verde respecto al mismo modulo.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

Tabla 17. Parámetros de selección de la mejor vegetación.

PARAMETROS	VEGETACION	
	Esparrago	Barquillo
Temperatura Exterior Promedio	32,21 °C ± 2,27	31,66 °C ± 2,22
Diferencia de temperatura ΔT °C (T. Exterior- T. interior)	✓0,45	✗0,20
Porcentaje estimado de insatisfechos PPD %	✗80,33%	✓79,77%
Diferencia de humedad relativa ΔHR % (HR Exterior- HR Interior)	✗-1,39%	✓0,02%
Temperatura Radiante Media Promedio (°C)	✓31,09	✗31,10

Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

Tabla 18. Parámetros de selección de la mejor orientación.

PARAMETROS	ORIENTACION		
	SUR	ESTE	OESTE
Temperatura Exterior Promedio	32,37°C ± 1,45	32,3°C ± 1,54	31,13°C ± 1,72
Diferencia de temperatura ΔT °C (T. Exterior- T. interior)	✓0,85	✗0,47	✗-0,35
Porcentaje estimado de insatisfechos PPD %	✗79,60%	✗81,10%	✓79,45%
Diferencia de humedad relativa ΔHR % (HR Exterior- HR Interior)	✗-1,0%	✗-0,9%	✓1,2%
Diferencia de temperatura superficial ΔTs °C (Ts sin M. verde - Ts con M. verde)	✓1,41	✗0,80	✗1,31

Fuente: (Barón & Navarro, 2020)

6.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL TIPO DE VEGETACIÓN

En la TABLA 17 se encuentra el resultado de los parámetros evaluados para la selección de la vegetación con mejor comportamiento térmico. Se realizó la prueba t student para comparar el promedio de la temperatura exterior de los grupos de datos de las dos alternativas y no se encontró una diferencia estadísticamente significativa, en consecuencia, es válido comparar los resultados obtenidos para cada parámetro con una correcta aceptación estadística. El primer criterio de comparación corresponde a las diferencias de temperatura interior y exterior, se tuvo como resultado una mayor diferencia en el esparrago para una disminución promedio 0,45 °C de la temperatura exterior en comparación del Barquillo Morado que solo obtuvo una disminución promedio de 0,20 °C en consecuencia la mejor alternativa bajo este concepto es el esparrago. Con respecto al segundo parámetro los resultados corresponden a unos valores PPD de 80,33% para el Esparrago y 79,77% para el Barquillo con una pequeña diferencia de 0,56% a favor del Barquillo debido a que tiene un menor valor de porcentaje estimado de insatisfechos y en consecuencia lo denota como la mejor alternativa para este criterio. El estudio de la diferencia promedio de la humedad relativa exterior en relación a la interior para cada vegetación, obtuvo resultados de -1,39% y 0,02% para el Esparrago y el Barquillo respectivamente lo cual indica que en promedio la

humedad relativa dentro de la unidad habitacional fue menor con el Barquillo, por el contrario el Esparrago en promedio obtuvo una humedad relativa mayor a la exterior; debido a lo anterior y teniendo en cuenta que altas humedades relativas contribuyen a una insatisfacción térmica, se seleccionó el Barquillo como mejor alternativa basado en este criterio. Por último, el promedio de la temperatura radiante media apuntó al esparrago como mejor alternativa al obtener un menor valor de la temperatura radiante, indicando que en promedio las temperaturas de las superficies de la unidad de vivienda fueron menores cuando el muro verde tenía al Esparrago como tipo de vegetación con una pequeña diferencia de 0.01°C en comparación al Barquillo. Para concluir los parámetros indican que ambos tipos de vegetación tienen iguales beneficios y a efecto de seleccionar una mejor alternativa es válido elegir cualquiera de las dos, sin embargo se consideró el hecho de que la temperatura exterior promedio durante el esparrago es mayor en $0,55^{\circ}\text{C}$ que durante el Barquillo y aun así obtuvo una temperatura radiante media menor y una mayor diferencia de temperatura y un PPD casi igual al del Barquillo, por tal razón se consideró el Esparrago como la mejor alternativa de vegetación para el muro verde.

6.6 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA ORIENTACIÓN DEL MURO VERDE

En la *Tabla 18* se encuentra el resultado de los parámetros evaluados para la selección de la orientación con muro verde con mejor comportamiento térmico, al igual que para la vegetación se realizó un análisis estadístico de los promedios del grupo de datos de cada alternativa obteniéndose que las diferencias entre estas son poco significativas y por ende es válido realizar un análisis comparativo entre ellas. Para el primer parámetro, correspondiente a las diferencias de temperatura dentro y fuera de la unidad habitacional, se obtuvo un valor de $0,85^{\circ}\text{C}$ para la posición Sur, $0,47^{\circ}\text{C}$ para la posición Este y $-0,35^{\circ}\text{C}$ para la posición Oeste; en consecuencia se infiere que en promedio hay una mayor disminución de la temperatura en la posición Sur, mientras que para la posición Oeste generalmente las temperaturas dentro de la unidad fueron mayores que las exteriores, por lo anterior bajo este parámetro la mejor alternativa corresponde a la posición Sur. En relación al PPD se obtuvo valores de 79,60% en la posición Sur, 81,10% en la posición Este y 79,45% en la posición Oeste, por tal razón se deduce que se presenta una menor insatisfacción térmica cuando el

muro es colocado en la posición Oeste concluyendo que esta es la mejor alternativa en relación a este criterio. Para las diferencias en la humedad relativa se tiene que, para todas las posiciones, en promedio la humedad relativa interior siempre fue mayor que la exterior con valores de -1,0%, -0,9% y 1,2% para Sur, Este y Oeste respectivamente pero como para las tres alternativas la diferencia fue mayor en la posición Oeste se selecciona como mejor alternativa para este parámetro. Por último se evaluó la temperatura superficial promedio al interior de cada fachada con y sin presencia de muro verde; los resultados obtenidos están representados en la Ilustración 80 y las diferencias obtenidas para cada orientación se encuentran en la *Tabla 18* con valores de 1,41°C, 0,80°C y 1,31°C para Sur, Este y Oeste respectivamente, por lo que deduce una mayor disminución de la temperatura superficial en la fachada Sur y por ende se selecciona como la mejor alternativa para este parámetro.

Teniendo en cuenta todos los parámetros anteriores se concluye que tanto la posición Sur como la Oeste se encuentran igualados en el número de parámetros de selección, dos para cada alternativa sin embargo en la *Tabla 18* se observa una mayor temperatura exterior promedio en la fachada Sur que en la Oeste por lo que concluye un mejor desempeño del muro en la posición sur ya que disminuye más la temperatura al interior del módulo de vivienda, disminuye en mayor cantidad la temperatura de la superficie y probablemente obtendría un menor PPD que la posición Oeste con la misma temperatura exterior promedio.

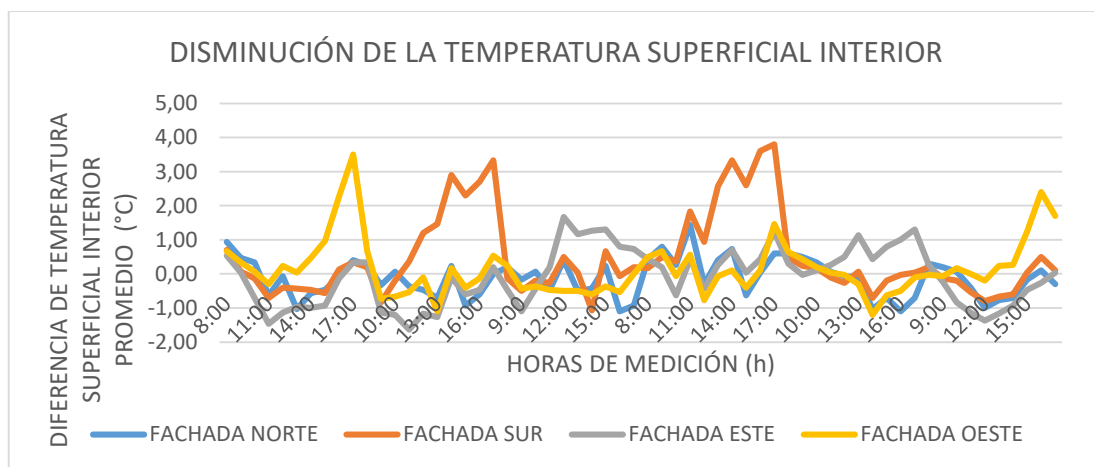


Ilustración 81. Diferencias de temperatura superficial para cada orientación del módulo con muro verde respecto al módulo con techo verde ($T_s t. verde - T_s m. verde$).

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

6.7 ANALISIS DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL.

Se realizó la evaluación del comportamiento de la temperatura superficial interior para cada orientación con la presencia del muro verde y sin presencia de ella comparando las diferencias de temperatura tanto para el módulo con muro verde como para el módulo con techo verde. Para la fachada Sur se logró una disminución de la temperatura superficial interior promedio de 1.41°C en relación a su propio modulo y 1.66°C en relación al módulo con techo verde. Para la fachada Este se lograron reducciones promedio de 0.80 y 0.50 en relación al propio modulo y al que tiene techo verde, respectivamente. Para la fachada Oeste se lograron diferencias de 1.31°C y 0.70°C en comparación al propio modulo y al contrario respectivamente.

Lo anterior indica los beneficios del implemento de sistemas de ecologización vertical en la reducción de las temperaturas superficiales. Las mayores reducciones se alcanzaron en la fachada sur en comparación a ambos módulos y las menores en la fachada este; por otra parte se logró una mayor disminución promedio en contraste a el módulo que tiene el muro verde, lo cual se debe a que en el módulo con techo verde debido a la presencia de éste se logra mitigar la temperatura interior y por ende la temperatura de las superficies causando que al compararlas con las superficies del otro modulo en presencia del muro verde, las diferencias no sean tan altas.

La ilustración 81 muestra el comportamiento de las diferencias de temperatura superficial interior de un módulo respecto al otro ($Ts t. verde - Ts m. verde$) durante los seis escenarios, se observa que los picos más altos se dan para aquella orientación que tiene instalado el muro verde en ese escenario para las demás orientaciones las diferencias tienden a hacer negativas concluyendo que solo la fachada que tiene el muro verde logra tener una temperatura superficial considerablemente menor que la del otro modulo en la misma orientación para todas las demás fachadas, las temperaturas son iguales o mayores que las del módulo que posee el techo verde.

6.8 ANALISIS DE LA TEMPERATURA INTERIOR

La ilustración 82 representa las diferencias de la temperatura del aire exterior respecto a la interior durante los seis escenarios para ambos módulos, se observa que el módulo con techo verde logra reducciones de temperatura superiores para la mayoría de las mediciones en comparación al módulo con muro verde. Las diferencias de temperaturas máximas fueron de 3.87°C y 3.50°C ; las mínimas fueron de -2.87°C y 3.40°C ; y las promedio 0.88°C y 0.32°C para el módulo con techo verde y para el módulo con muro verde respectivamente. Se deduce que el techo verde funciona mejor como sistema de enfriamiento que el muro verde para las condiciones dadas en este estudio. Teniendo en cuenta que no se tomaron mediciones durante la noche no se puede determinar el comportamiento de ambos sistemas durante esas horas aunque se notó que para las primeras mediciones las temperaturas tanto superficiales como interiores eran generalmente más bajas en el módulo con muro verde lo que infiere que aunque el sistema de techo verde tiene mejor comportamiento térmico durante el día, durante la noche evita el calor absorbido se libere en menor tiempo y por ende se enfríe más rápidamente durante la noche así que es pertinente evaluar el comportamiento durante la noche y a su vez evaluar el confort térmico para establecer cuál de los dos sistemas ofrece mayores beneficios durante la noche.

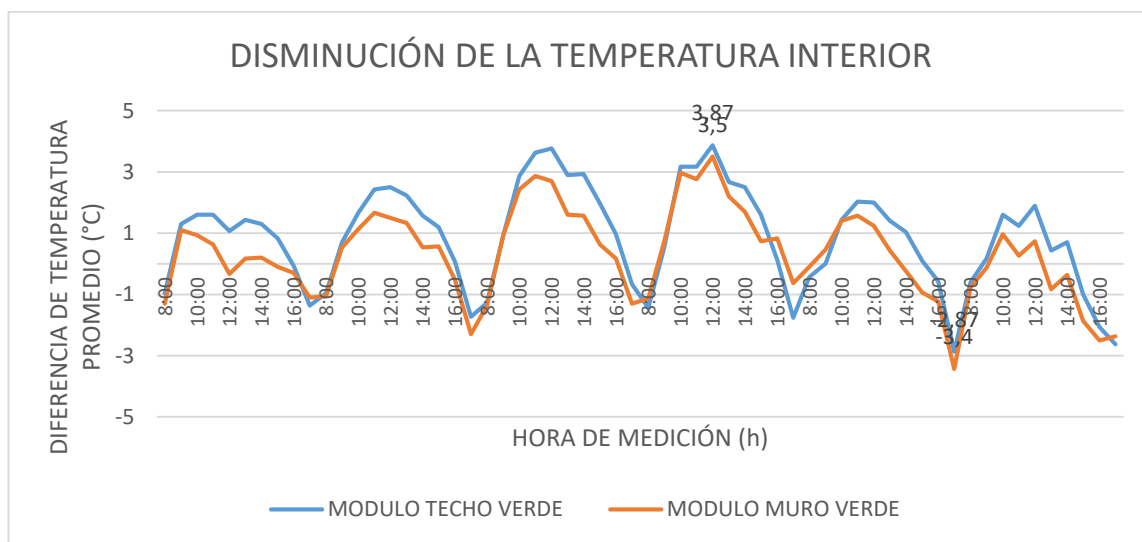


Ilustración 82. Diferencia de temperatura del aire para cada módulo (T. Exterior- T. interior).

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

6.9 ANALISIS DEL CONFORT Y RENDIMIENTO TERMICO RESPECTO LA LITERATURA.

La *tabla 2* muestra los resultados obtenidos por algunas investigaciones en lo referente al rendimiento térmico de los sistemas de ecologización vertical como muros y fachadas verdes. Teniendo en cuenta que no todos los estudios citados tienen la misma línea de investigación solo se tomaron parámetros en relación a la reducción de temperatura para poder compararlos con los obtenidos en el presente estudio.

Respecto a la temperatura superficial interior los resultados obtenidos se encuentran entre los límites de los estudios consultados, sin embargo se esperaban reducciones mayores que la literatura debido a que las condiciones climáticas de zonas tropicales húmedas implican temperaturas superiores que en climas templados los cuales son característicos de los estudios examinados por lo que se suponen diferencias mayores; no obstante el hecho de que no se lograran valores superiores a la disminución máxima de 3.8°C, podría deberse a la transferencia de calor por convección entre fachadas expuestas a la radiación directa con temperaturas mayores a la que contiene el muro verde, por lo que aunque el muro verde evita que aumente la temperatura superficial interna debido a la radiación exterior esta tendera a aumentar interiormente por el calor emitido por las fachadas restantes; por tal razón se lograría mejores rendimientos térmicos al cubrir todas las fachadas expuestas a la radiación solar directa.

En lo concerniente a la temperatura interior, se registró una disminución máxima de 3.5°C mientras que para las investigaciones analizadas se alcanzaron disminuciones superiores, con valores máximos entre 4°C y 12°C a excepción de Chen et al. (2013) que obtuvo una reducción máxima de 1.1°C; por otra parte al comparar los valores promedio, se observa que para la literatura los resultados se encuentran entre 0.1°C y 1.5°C en comparación al promedio de 0.32°C alcanzado por esta investigación. Teniendo en cuenta lo anterior el desempeño de un sistema de muro verde que solo cubra una sola orientación para una unidad habitacional con más de una fachada recibiendo radiación solar directa no logra alcanzar

resultados satisfactorios puesto que las reducciones son poco significativas respecto a otros estudios y en relación a las condiciones óptimas para un confort térmico aceptable.

Debido a que no se pudieron registrar las temperaturas medias diarias por lo menos de siete a treinta días antes del inicio de las mediciones se evaluó el confort térmico utilizando el modelo estático y no adaptativo sin embargo, la ASHRAE 55- 2017, permite utilizar la temperatura media mensual como temperatura media prevaleciente cuando no se tiene registro de datos, por tal razón se empleó la temperatura media mensual del mes de diciembre publicada en por el centro de investigación oceanográficas e hidrográficas (CIOH) teniendo en cuenta que las mediciones se iniciaron a comienzos del mes de enero; esta temperatura fue de 29°C y se empleó para determinar la temperatura neutral y por consiguiente el rango de confort térmico empleando la ecuación de confort adaptativo de la ASHRAE 55- 2017, y parámetros para un 80% y 90% de aceptabilidad los resultados obtenidos se encuentran en los anexos ya que no se consideró inicialmente dentro de los alcances de esta investigación evaluar el confort por el modelo adaptativo no obstante es pertinente ya que actualmente la mayoría de los estudios enfocados en ambientes naturalmente ventilados emplean el modelo adaptativo como indicador, por lo que es necesario para establecer una comparación con la literatura.

Los resultados obtenidos por esta investigación indican unos valores promedio de PMV y PPD de 2,17 y 2,25 para las unidades habitaciones utilizadas lo que indican que generalmente se estima que las condiciones de confort sean inaceptables para aproximadamente para el 79% al 80% de los ocupantes, estos valores se encuentran muy superiores a los obtenidos por Shaeri et al. (2018), con valores de 0,88 a 0,91 (*ver tabla 1*), para condiciones climáticas similares sin embargo esto se podría deber a que las residencias objeto de estudio se encontraban cerca al mar y las corrientes de aire podrían mejorar considerablemente las condiciones de confort. Además, al compararla con la investigación de Rosales (2018), quien obtuvo un PMV promedio de -0,77 para las aulas de la universidad de la costa en barranquilla, Colombia muy cerca de la ciudad de Cartagena se evidencia una diferencia notoria ya que ese valor corresponde a una sensación térmica ligeramente fría muy diferente a las sensaciones térmicas obtenidas en este estudio sin embargo esto se debe a que el estudio

realizado en Barranquilla se realizó con ventilación mecánica donde el punto de ajuste fue 17°C y además que las medidas se tomaron de las 18:30 a las 21:30 horas en donde la temperatura es menor a la de las horas diurnas.

Por otro lado, al analizar los rangos de confort obtenidos por la ecuación del modelo adaptativo para una temperatura media prevaleciente de 29°C se establecieron unos límites de confort de $26,79 \pm 2,5$ y $26,79 \pm 3,5$ de la temperatura operativa para una aceptabilidad de 90% y 80% respectivamente (*ver ilustraciones 83 y 84*); se determinó que se cumplen las condiciones de confort al interior de las unidades de vivienda en las horas de 8 a 10 y 8 a 11 de la mañana para un 90% y 80% de aceptabilidad respectivamente (ver tabla 19 y 20 en anexos). En comparación a otros estudios, Lu et al., establecieron un rango de confort de 23,1-29,1 para edificios en la ciudad de Hainan para condiciones muy similares a la ciudad de Cartagena, se observa que los rangos son muy parecidos lo que muestra que corresponde a los valores estimados en ciudades tropicales y que el análisis que realizado por el modelo adaptativo describiría en gran medida a las condiciones presentadas en las unidades habitacionales. La investigación de Rosales obtuvo un rango de 24°C-27°C para la ciudad de Barranquilla, pero para aulas climatizadas mecánicamente y en horario nocturno sin embargo solo está aproximadamente de 2 a 3°C de diferencia de los límites obtenidos por la ecuación de confort lo cual es aceptable considerando las diferencias entre los estudios. Por último, García et al, un rango de 19,9-24,9 para oficinas de la ciudad de Bogotá para un clima tropical húmedo, pero frío, lo que indica que las personas que residen en esa ciudad tienen una menor tolerancia al calor que las personas en la ciudad de Cartagena, pero una mayor tolerancia al frío evidenciando la capacidad de las personas de adaptarse a las condiciones de inconformidad térmica.

7. CONCLUSIONES

Basado en los resultados obtenidos en la investigación y el análisis previo fundamentado por la literatura y por estudios anteriores, se determinó que la mejoría en el confort térmico obtenida por el sistema de muro verde fue menor a la lograda por el sistema de techo verde debido a que los índices de confort térmico en promedio fueron mayores en la unidad de vivienda con muro verde; sin embargo pese a existir una mejora en el bienestar térmico desarrollada por ambos sistemas, ninguna de las unidades habitacionales alcanzó unas condiciones térmicas aceptables para los límites establecidos por la normativa en una sensación térmicamente neutra. Los valores promedio obtenidos para el PMV fueron (2,17 y 2,25), y para el PPD fueron 78,71% y 80,05% para el techo verde y el muro verde respectivamente; ubicándose por arriba de los límites; los cuales son 0,5 para el PMV y 10% para el PPD. Al categorizar el índice PMV en contexto de sensación térmica se observó en términos de malestar térmico general que las horas críticas se presentaron habitualmente de 1pm a 4pm con una sensación térmica "calurosa" mientras que las horas más frescas se presentaron de 8am a 9am con una sensación térmica "ligeramente cálida" para el resto de horas la sensación fue "cálida"; cabe recordar que las horas de estudio fueron de 8am a 5pm. A pesar de que la unidad con muro verde no alcanzó un confort térmico aceptable y que el techo verde probó tener un mejor rendimiento con igual área de cobertura, se considera que sí se justifica su aplicación a las viviendas desde el punto de vista térmico, debido a que alcanza una disminución de 0,32°C en promedio al igual que el techo verde que logró también una disminución promedio de 0,88°C. De igual importancia desde el punto de vista económico el muro verde fue diseñado de una manera artesanal con materiales reciclados y con una instalación básica, sin mano de obra especializada, sumado a un riego netamente manual con capacidad de reutilización del agua para riego u otras actividades lo que fomenta una posibilidad de obtener una mayor área de cobertura con mejores rendimientos y con igual o menor costo de implementación que un sistema de techo verde.

De las 5 especies comunes de vegetación se seleccionó el Esparrago y Barquillo Morado como aquellas que más resistieron las condiciones climáticas características de verano para un periodo de 15 días en ausencia de riego. De las dos especies anteriores se seleccionó el

Esparrago como la vegetación más adecuada debido a que obtuvo una mayor disminución de temperatura con un valor promedio de $0,45^{\circ}\text{C}$ en comparación al Barquillo que solo obtuvo en $0,20^{\circ}\text{C}$

De las cuatro orientaciones se instaló el muro verde en tres de ellas, ya que la fachada norte no recibió radiación solar directa. De las tres fachadas restantes la mejor alternativa correspondió a la posición Sur ya que obtuvo una disminución promedio de temperatura de $0,85^{\circ}\text{C}$, mayor que las demás orientaciones y una diferencia de la temperatura superficial interior de $1,41^{\circ}\text{C}$ siendo esta mayor que las demás posiciones.

La importancia del estudio radica en el hecho de que se determinó que un solo sistema no es suficiente para lograr un confort térmico aceptable para las condiciones de clima tropical húmedo, sino que es necesario combinar varios sistemas para evaluar si se alcanza un confort óptimo. No obstante, se comprobó que tanto el techo verde como el muro verde lograron disminuciones significativas de temperatura y aplicados correctamente y en mayor cobertura lograrían mayores rendimientos térmicos.

En comparación a investigaciones referentes a muros verdes los resultados son aceptables a los obtenidos por distintos autores. La literatura muestra disminuciones de la temperatura interior promedio de $0,1^{\circ}\text{C}$ a 2°C y máximas de $1,1^{\circ}\text{C}$ a 12°C , mientras que para esta investigación se obtuvo una disminución promedio de $0,3^{\circ}\text{C}$ y una máxima promedio en el escenario 4 con un valor de $3,5^{\circ}\text{C}$ y una disminución máxima de todas las mediciones de $4,4^{\circ}\text{C}$ para el tercer día del escenario 4 (17/01/20) a las 12 del mediodía. Al comparar la disminución de la temperatura superficial, algunas investigaciones consiguieron resultados menos favorables a los obtenidos en este estudio por ejemplo Susorova et al. (2013) y Chen et al. (2013) alcanzaron un promedio de $0,9^{\circ}\text{C}$, y $0,5^{\circ}\text{C}$ respectivamente mientras que el presente estudio solo obtuvo una disminución de la pared interior promedio de $1,17^{\circ}\text{C}$ no obstante existen estudios con reducciones superiores como Cuce (2016) con una reducción promedio de $2,5^{\circ}\text{C}$, Manso y Castro (2016) con un máximo de 7°C además de Olivieri et al. (2014) con una disminución promedio de $6,4^{\circ}\text{C}$ y por último Sánchez et al, (2010) con una disminución de $2,5^{\circ}\text{C}$ para unos climas generalmente templados, subtropicales o tropicales secos y húmedos.

8. RECOMENDACIONES

El presente estudio se limitó al utilizar parámetros con valores constantes como nivel de ropa y actividad debido a que no se realizó la investigación con ocupantes, se recomienda utilizar otro tipo de actividades implicando actividades de pie, y diferentes combinaciones de ropa características de verano y estableciendo un análisis respecto a ello. Otra limitación importante corresponde a que estudio solamente se enfocó al malestar térmico general y no al malestar térmico local como por ejemplo la asimetría radiante en superficies, corrientes de aire e impacto solar directo; debido a que también son pertinentes evaluarlos ya que también tienden afectar las condiciones del confort de un entorno. Se pueden emplear otros métodos de evaluación de confort térmico como el adaptativo (asumiendo un control local del entorno, es decir hacer el análisis para puerta abierta, puerta cerrada, ventana abierta y ventana cerrada), para luego compararlo con los indicadores obtenidos por el método PMV. En otras investigaciones se toma la distancia del muro verde a la fachada como variable; sería importante evaluar el impacto de la distancia del muro para las condiciones interiores de confort, así como ampliar el rango de toma de medidas, con el fin de evaluar el bienestar térmico y realizar un análisis completo de la climatología tropical húmeda es decir tanto de día como de noche. Por último, de recomienda hacer un estudio de costos para ambos sistemas y evaluar el impacto económico de emplear varios sistemas de ecologización al mismo tiempo versus los rendimientos térmicos obtenidos, así como el ahorro energético y económico alcanzado.

Consideramos que el uso de los dos sistemas en conjunto podría significar una mayor reducción de temperatura; de igual forma, en este estudio solo se tuvo en cuenta la implementación de muro verde en una sola fachada de la unidad siendo ésta la que obtiene una disminución de temperatura, por lo que es de esperarse que su implementación en todas las fachadas significaría una disminución mayor. Se recomienda realizar nuevos estudios en lo pertinente a mayor cobertura de muro verde, así como la combinación de sistemas ecológicos y tratamiento de aguas mediante estos sistemas con el objeto de continuar los avances obtenidos en este estudio y explorar nuevas líneas de investigación.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, A., & del rio, M. (2011). *Sistemas vegetales verticales, estudio de los efectos de la integración arquitectónica de sistemas vegetales verticales y propuestas de uso como técnica pasiva de ahorro de energía en el clima continental mediterráneo*. Universidad Politécnica de Madrid Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica Máster, Madrid, España.
- Besir, A. B., & Cuce, E. (2018). Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(July 2017), 915–939. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
- Carlucci, S., Bai, L., de Dear, R., & Yang, L. (2018). Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents. *Building and Environment*, 137(February), 73–89. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>
- Chalá, D., Romero, Z., & Quiñones, E. (2015). *Lineamientos técnicos dentro del marco de la sostenibilidad ambiental y social para la rehabilitación de viviendas abandonadas en zona rurales de los montes de maria*. (tesis de pregrado) Universidad de Cartagena, Cartagena de indias D.T. y C., Colombia.
- Chen, Q., Li, B., & Liu, X. (2013). An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate. *Energy and Buildings*, 61, 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.030>
- Coma, J., Pérez, G., de Gracia, A., Burés, S., Urrestarazu, M. & Cabeza, L. (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*, 111, 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014>
- Corredor, J., & Borda, A. (2013). Análisis Comparativo Del Sistema De Paredes Verdes Mediante El Uso De Llantas Recicladas Para Determinar La Viabilidad De Un Modelo A Escala Para Paredes Vegetadas. (Tesis de Maestría) Universidad de La Sabana, Chía, Colombia., 103. Retrieved from [http://intellectum.unisabana.edu.co:8080/jspui/bitstream/10818/10409/1/Lina María Arangure Burgos\(TESIS\).pdf](http://intellectum.unisabana.edu.co:8080/jspui/bitstream/10818/10409/1/Lina_María_Arangure_Burgos(TESIS).pdf)
- Cuce, E. (2016). Thermal regulation impact of green walls: An experimental and numerical investigation. *Applied Energy*, 194, 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.079>
- De Pombo, J., Gonzalez, D., & Mouthon, J. (2016). Evaluación Del Efecto Térmico Y Captación De Escorrentía Producida Por Una Planta Piloto De Techo Verde. (Tesis de Pregrado) Universidad de Cartagena, Cartagena D.T. y C., Colombia., 91. Retrieved from

http://190.242.62.234:8080/jspui/bitstream/11227/2693/1/DEPOMBO_GONZALEZ.pdf

- Djedjig, R., Belarbi, R., & Bozonnet, E. (2017). Experimental study of green walls impacts on buildings in summer and winter under an oceanic climate. *Energy and Buildings*, 150, 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.032>
- Djongyang, N., Tchinda, R., & Njomo, D. (2010). Thermal comfort: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2626–2640. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.040>
- Enescu, D. (2017). A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(May), 1353–1379. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.175>
- EPA. (2016). Cartagena, pionera en jardines verticales en estaciones de Sistema de Transporte Masivo | EPA. Retrieved April 18, 2019, from <http://epacartagena.gov.co/cartagena-pionera-en-jardines-verticales-en-estaciones-de-sistema-de-transporte-masivo/>
- EPA. (2017). *Plan de silvicultura urbana del distrito de cartagena de indias establecimiento público ambiental epa cartagena de indias*. Retrieved from <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/03/PLAN-DE-SILVICULTURA-URBANO-DE-CARTAGENA-2017.pdf>
- Feitosa, R. C., & Wilkinson, S. J. (2018). *Attenuating heat stress through green roof and green wall retrofit*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.034>
- Forgiarini, R., Giraldo, N., & Lamberts, R. (2015). A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*, 105, 178–205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>
- García, A., Olivieri, F., Larrumbide, E., & Ávila, P. (2019). Thermal comfort assessment in naturally ventilated offices located in a cold tropical climate, Bogotá. *Building and Environment*, 158(May), 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.013>
- Garcia, J., Ariza, J., & Ruiz, N. (2016). *Diseño e implementación de jardines verticales como estrategia pedagógica en la educación ambiental del colegio distrital instituto técnico industrial francisco josé de caldas*. <https://doi.org/10.5151/cidi2017-060>
- Gobierno de la ciudad de Buenos Aires. (2009). Cambio Climático- plan de acción Bs.As 2030 - Google Libros. Retrieved April 17, 2019, from <https://books.google.com.co/books?id=0Yv2s7MsozwC&pg=PA145&dq=isla+de+calor+urbana&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwj224SyxdjhAhVsoFkKHWC4BmYQ6AEIODAD#v=onepage&q=isla de calor urbana&f=false>
- Gomez, J., & Cruz, F. (2016). Diagnostico del impacto del plastico (botellas) sobre el medio

- ambiente: Un estado del arte. (tesis de pregrado) Universidad Santo Tomas, Facatativa, Colombia.
- IDEAM. (2014). Escenarios de cambio climatico - IDEAM. Retrieved July 24, 2019, from <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/escenarios-cambio-climatico>
- Lopez, J., Sarmiento, F., & Mouthon, J. (2015). *Evaluación del comportamiento térmico de una vis, para sugerir lineamientos que mejoren los factores bioclimáticos y el confort de los ocupantes.* (tesis de pregrado) universidad de cartagena, Cartagena D.T. y C., Colombia.
- López, T. (1992). Jardines verticales. *Aparejadores.* (tesis) Universidad politécnica de Valencia, Valencia España Retrieved from: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2466078>
- Lu, S., Pang, B., Qi, Y. & Fang, K. (2018). Field study of thermal comfort in non-air-conditioned buildings in a tropical island climate. *Applied Ergonomics* 66, 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.08.008>
- Manso, M., & Castro, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 863–871. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.07.203>
- Mazzali, U., Peron, F., Romagnoni, P., Pulselli, R. M., & Bastianoni, S. (2013). Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate. *Building and Environment*, 64, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.005>
- Muñoz, L., & Torres, R. (2013). Las fachadas verdes como herramienta pasiva de ahorro energético en el bloque administrativo de la Universidad Pontificia Bolivariana , seccional Montería Green facades as a passive tool to save energy in the Pontifical. *DEARQ Journal of Architecture*, núm. 13, 140–149.
- Norma Técnica Colombiana. (2004). NTC 5316:CONDICIONES AMBIENTALES TÉRMICAS DE INMUEBLES PARA PERSONAS. *Icontec Internacional*, 1, 13.
- Observatorio Ambiental De Cartagena. (2015). PRECIPITACIÓN – Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias. Retrieved August 1, 2019, from <http://observatorio.epacartagena.gov.co/gestion-ambiental/calidad-ambiental/sistema-urbano/precipitacion/>
- Olivieri, L., Olivieri, F. & Neila, J. (2014). Experimental study of the thermal-energy performance of an insulated vegetal façade under summer conditions in a continental mediterranean climate. *Building and Environment*, 77, 61-76. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.019>
- OMM. (2019). La OMM confirma que los últimos cuatro años han sido los más cálidos desde que se tienen registros | Organización Meteorológica Mundial. Retrieved April 18, 2019, from <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/la-omm-confirma-que->

los-últimos-cuatro-años-han-sido-los-más-cálidos

- ONU. (2019). Población | Naciones Unidas. Retrieved April 18, 2019, from <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>
- Organización Internacional de Normalización (ISO). (2005). Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (ISO 7730). Switzerland. ISO Copyright office. <https://www.iso.org>
- Perini, K., Ottelé, M., Fraaij, A., Haas, E. & Raiteri, R. (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment*, 46, 228-2294. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>
- Rosales, D. (2018). *Evaluación del confort térmico en la universidad de la costa en la ciudad de barranquilla*. (Tesis de maestría). Universidad de la costa. Barranquilla, Colombia.
- Sánchez, J., Ruiz, L., Olivieri, F. & Ventura, E. (2018). Experimental assessment of the thermal behavior of a living wall system in semi-arid environments of central Mexico. *Energy and Buildings* 174, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.060>
- Secretaria Distrital de Ambiente. (2015). Techos verdes y jardines verticales, Guia practica. *Alcaldia Mayor de Bogotá*, 29. Retrieved from http://oab2.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/guia_techos_verdes_jardines_verticales.pdf
- Shaeri, J., Yaghoubi, M., Aflaki A. & Amin Habibi.(2018). Evaluation of Thermal Comfort in Traditional Houses in a Tropical Climate. *Buildings* 2018, 8, 126. doi:10.3390/buildings8090126
- Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción Refrigeración y Aire Acondicionado Ingenieros (ASHRAE). (2017). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (p. 64). p. 64. ATLANTA.
- Susorova, I., Angulo, M., Bahrami, P. & Stephens, B. (2013). A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. *Building and Environment*, 67, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.027>
- Wong, N. H., Kwang Tan, A. Y., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P. Y., Chan, D., ... Wong, N. C. (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 45(3), 663–672. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.005>

10. ANEXOS

Tabla 19. evaluación de confort térmico a través del modelo adaptativo con base a la ANSI/ASHRAE 55 2017 para un 80% de aceptabilidad.

Hora	Escenario	Muro verde		Techo verde		Escenario	Muro verde		Techo verde	
		T. operativa	Confort	T. operativa	Confort		T. operativa	Confort	T. operativa	Confort
8:00	1	✓ 27,97	SI	✓ 28,31	SI	4	✓ 28,08	SI	✓ 28,42	SI
9:00		✓ 28,46	SI	✓ 28,8	SI		✓ 28,79	SI	✓ 29,2	SI
10:00		✓ 29,7	SI	✓ 29,52	SI		✓ 29,81	SI	✓ 29,74	SI
11:00		✗ 30,6	NO	✓ 30,02	SI		✗ 30,74	NO	✗ 30,93	NO
12:00		✗ 31,67	NO	✗ 30,92	NO		✗ 31,86	NO	✗ 31,55	NO
13:00		✗ 32,32	NO	✗ 31,54	NO		✗ 32,21	NO	✗ 32,14	NO
14:00		✗ 32,82	NO	✗ 32,14	NO		✗ 32,69	NO	✗ 32,65	NO
15:00		✗ 32,91	NO	✗ 32,28	NO		✗ 33,04	NO	✗ 32,58	NO
16:00		✗ 32,1	NO	✗ 32,18	NO		✗ 31,66	NO	✗ 32,22	NO
17:00	✗ 31,55	NO	✗ 31,98	NO	✗ 31,31	NO	✗ 32,41	NO		
8:00	2	✓ 28,45	SI	✓ 28,69	SI	5	✓ 28,35	SI	✓ 28,75	SI
9:00		✓ 29,32	SI	✓ 28,98	SI		✓ 28,83	SI	✓ 29,25	SI
10:00		✗ 30,37	NO	✓ 30,05	SI		✓ 29,64	SI	✓ 29,78	SI
11:00		✗ 31,04	NO	✗ 30,42	NO		✗ 30,74	NO	✗ 30,56	NO
12:00		✗ 32,1	NO	✗ 31,55	NO		✗ 31,97	NO	✗ 31,59	NO
13:00		✗ 32,66	NO	✗ 31,91	NO		✗ 32,56	NO	✗ 32,01	NO
14:00		✗ 33,1	NO	✗ 32,75	NO		✗ 33,41	NO	✗ 32,35	NO
15:00		✗ 33,2	NO	✗ 32,84	NO		✗ 33,35	NO	✗ 32,56	NO
16:00		✗ 32,97	NO	✗ 32,68	NO		✗ 33,18	NO	✗ 32,65	NO
17:00	✗ 32,23	NO	✗ 32,1	NO	✗ 32,81	NO	✗ 32,47	NO		
8:00	3	✓ 28,28	SI	✓ 28,26	SI	6	✓ 28,78	SI	✓ 28,76	SI
9:00		✓ 29,09	SI	✓ 28,95	SI		✓ 29,3	SI	✓ 29,17	SI
10:00		✓ 30,22	SI	✓ 29,98	SI		✓ 30,21	SI	✓ 29,88	SI
11:00		✗ 31,36	NO	✗ 30,88	NO		✗ 30,98	NO	✗ 30,31	NO
12:00		✗ 31,98	NO	✗ 31,51	NO		✗ 32,03	NO	✗ 31,11	NO
13:00		✗ 33,13	NO	✗ 32,39	NO		✗ 32,52	NO	✗ 31,5	NO
14:00		✗ 33,23	NO	✗ 32,53	NO		✗ 32,91	NO	✗ 32,11	NO
15:00		✗ 33,75	NO	✗ 33,08	NO		✗ 32,71	NO	✗ 32,19	NO
16:00		✗ 33,2	NO	✗ 32,52	NO		✗ 32,16	NO	✗ 32,11	NO
17:00	✗ 33,03	NO	✗ 32,51	NO	✗ 31,7	NO	✗ 31,86	NO		
Total		8 horas (Esparrago)		10 horas		Total	9 horas (Barquillo)		9 horas	

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

Nota: la temperatura neutral y el rango de confort fue determinada por las siguientes ecuaciones de la ANSI/ASHRAE 55, 2017.

$$\text{Temperatura neutra } (tn) = 0,31\overline{t_{pma(out)}} + 17,8 = (29 * 0,31) + 17,8 = 26,79^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Rango de confort } 80\% \text{ aceptabilidad} = tn \pm 3,5 = 26,79^{\circ}\text{C} \pm 3,5$$

$\overline{t_{pma(out)}}$ = prevailing mean outdoor air temperature = 29°C para el mes de diciembre de 2019. Fuente: (Centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas, 2020)

Tabla 20. evaluación de confort térmico a través del modelo adaptativo con base a la ANSI/ASHRAE 55 2017 para un 90% de aceptabilidad.

Hora	Escenario	Muro verde		Techo verde		Escenario	Muro verde		Techo verde	
		T. operativa	Confort	T. operativa	Confort		T. operativa	Confort	T. operativa	Confort
8:00	1	✓ 27,97	SI	✓ 28,31	SI	4	✓ 28,08	SI	✓ 28,42	SI
9:00		✓ 28,46	SI	✓ 28,8	SI		✓ 28,79	SI	✓ 29,2	SI
10:00		✗ 29,7	NO	✗ 29,52	NO		✗ 29,81	NO	✗ 29,74	NO
11:00		✗ 30,6	NO	✗ 30,02	NO		✗ 30,74	NO	✗ 30,93	NO
12:00		✗ 31,67	NO	✗ 30,92	NO		✗ 31,86	NO	✗ 31,55	NO
13:00		✗ 32,32	NO	✗ 31,54	NO		✗ 32,21	NO	✗ 32,14	NO
14:00		✗ 32,82	NO	✗ 32,14	NO		✗ 32,69	NO	✗ 32,65	NO
15:00		✗ 32,91	NO	✗ 32,28	NO		✗ 33,04	NO	✗ 32,58	NO
16:00		✗ 32,1	NO	✗ 32,18	NO		✗ 31,66	NO	✗ 32,22	NO
17:00	✗ 31,55	NO	✗ 31,98	NO	✗ 31,31	NO	✗ 32,41	NO		
8:00	2	✓ 28,45	SI	✓ 28,69	SI	5	✓ 28,35	SI	✓ 28,75	SI
9:00		✗ 29,32	NO	✓ 28,98	SI		✓ 28,83	SI	✓ 29,25	SI
10:00		✗ 30,37	NO	✗ 30,05	NO		✗ 29,64	NO	✗ 29,78	NO
11:00		✗ 31,04	NO	✗ 30,42	NO		✗ 30,74	NO	✗ 30,56	NO
12:00		✗ 32,1	NO	✗ 31,55	NO		✗ 31,97	NO	✗ 31,59	NO
13:00		✗ 32,66	NO	✗ 31,91	NO		✗ 32,56	NO	✗ 32,01	NO
14:00		✗ 33,1	NO	✗ 32,75	NO		✗ 33,41	NO	✗ 32,35	NO
15:00		✗ 33,2	NO	✗ 32,84	NO		✗ 33,35	NO	✗ 32,56	NO
16:00		✗ 32,97	NO	✗ 32,68	NO		✗ 33,18	NO	✗ 32,65	NO
17:00	✗ 32,23	NO	✗ 32,1	NO	✗ 32,81	NO	✗ 32,47	NO		
8:00	3	✓ 28,28	SI	✓ 28,26	SI	6	✓ 28,78	SI	✓ 28,76	SI
9:00		✓ 29,09	SI	✓ 28,95	SI		✗ 29,3	NO	✓ 29,17	SI
10:00		✗ 30,22	NO	✗ 29,98	NO		✗ 30,21	NO	✗ 29,88	NO
11:00		✗ 31,36	NO	✗ 30,88	NO		✗ 30,98	NO	✗ 30,31	NO
12:00		✗ 31,98	NO	✗ 31,51	NO		✗ 32,03	NO	✗ 31,11	NO
13:00		✗ 33,13	NO	✗ 32,39	NO		✗ 32,52	NO	✗ 31,5	NO
14:00		✗ 33,23	NO	✗ 32,53	NO		✗ 32,91	NO	✗ 32,11	NO
15:00		✗ 33,75	NO	✗ 33,08	NO		✗ 32,71	NO	✗ 32,19	NO
16:00		✗ 33,2	NO	✗ 32,52	NO		✗ 32,16	NO	✗ 32,11	NO
17:00	✗ 33,03	NO	✗ 32,51	NO	✗ 31,7	NO	✗ 31,86	NO		
Total		5 horas (Esparrago)		6 horas		Total	5 horas (Barquillo)		6 horas	

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

Nota: la temperatura neutral y el rango de confort fue determinada por las siguientes ecuaciones de la ANSI/ASHRAE 55, 2017.

$$\text{Temperatura neutra (tn)} = 0,31\overline{t_{pma(out)}} + 17,8 = (29 * 0,31) + 17,8 = 26,79^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Rango de confort 90\% aceptabilidad} = tn \pm 2,5 = 26,79^{\circ}\text{C} \pm 2,5$$

$\overline{t_{pma(out)}}$ = prevailing mean outdoor air temperature = 29°C para el mes de diciembre de 2019. Fuente: (Centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas, 2020)

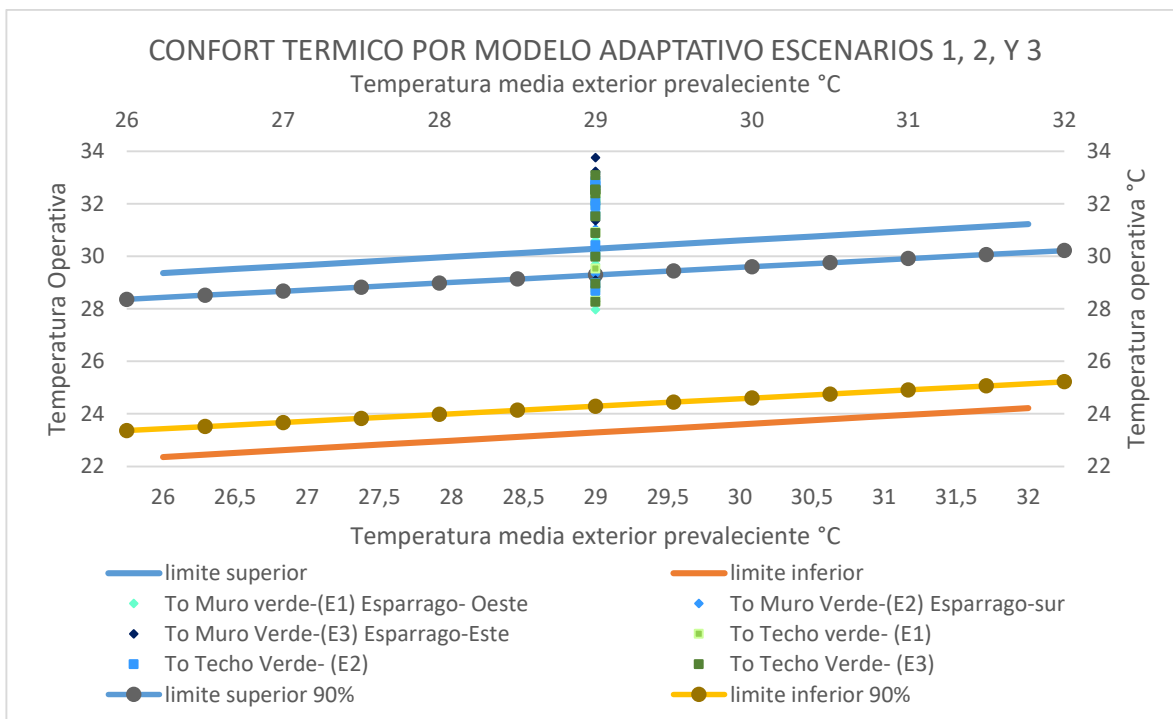


Ilustración 83. Evaluación del confort térmico por el modelo adaptativo; escenarios 1,2 y 3.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

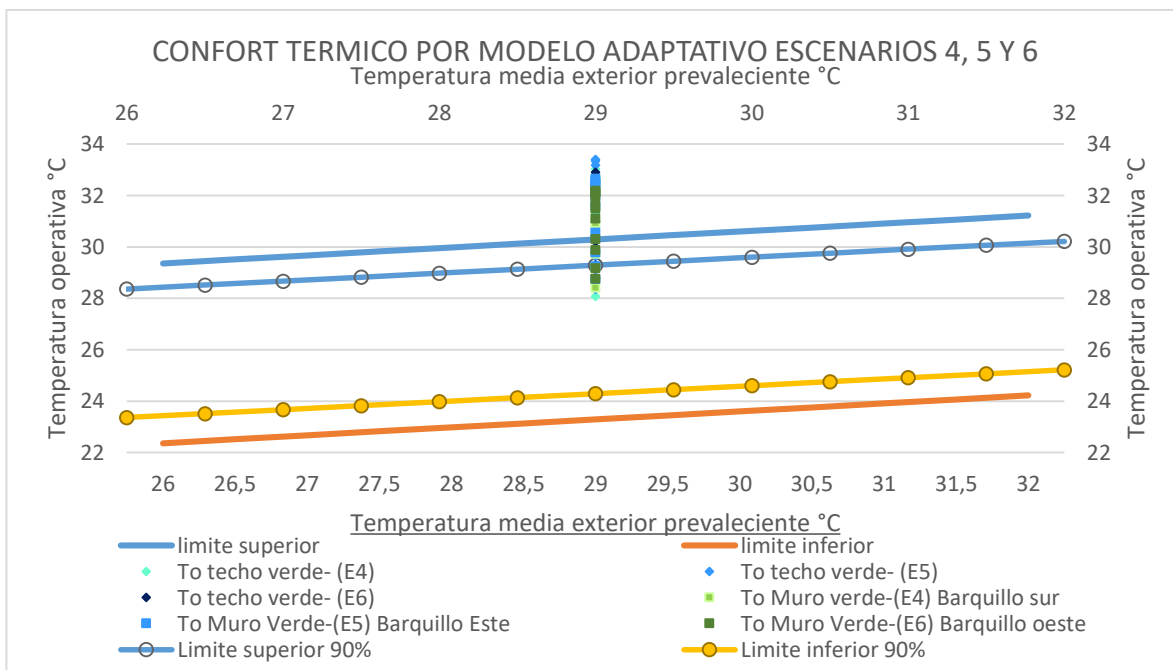


Ilustración 84. evaluación del confort térmico por el modelo adaptativo; escenarios 4, 5 y 6.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

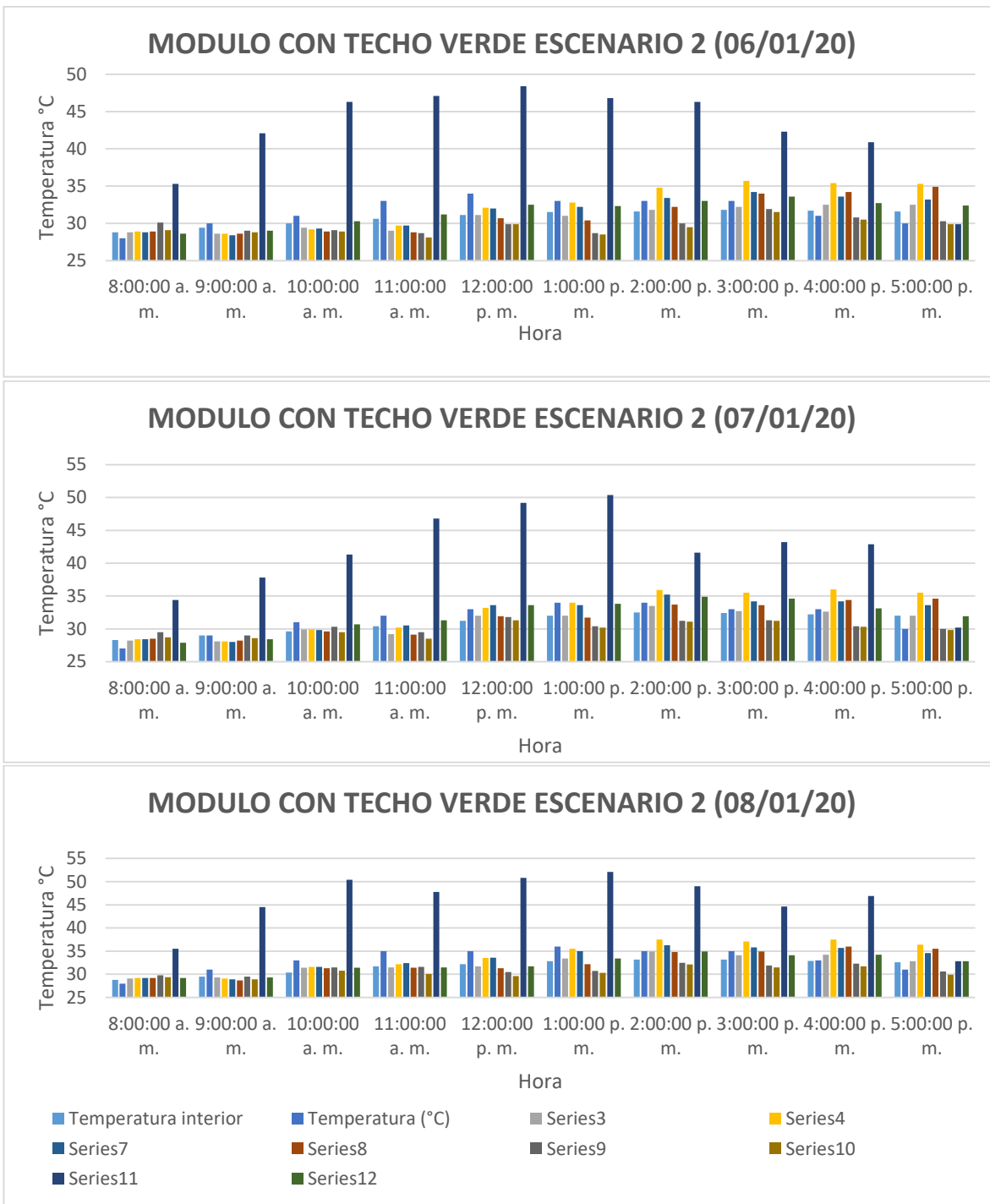


Ilustración 85. Temperaturas modulo techo verde escenario 2.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

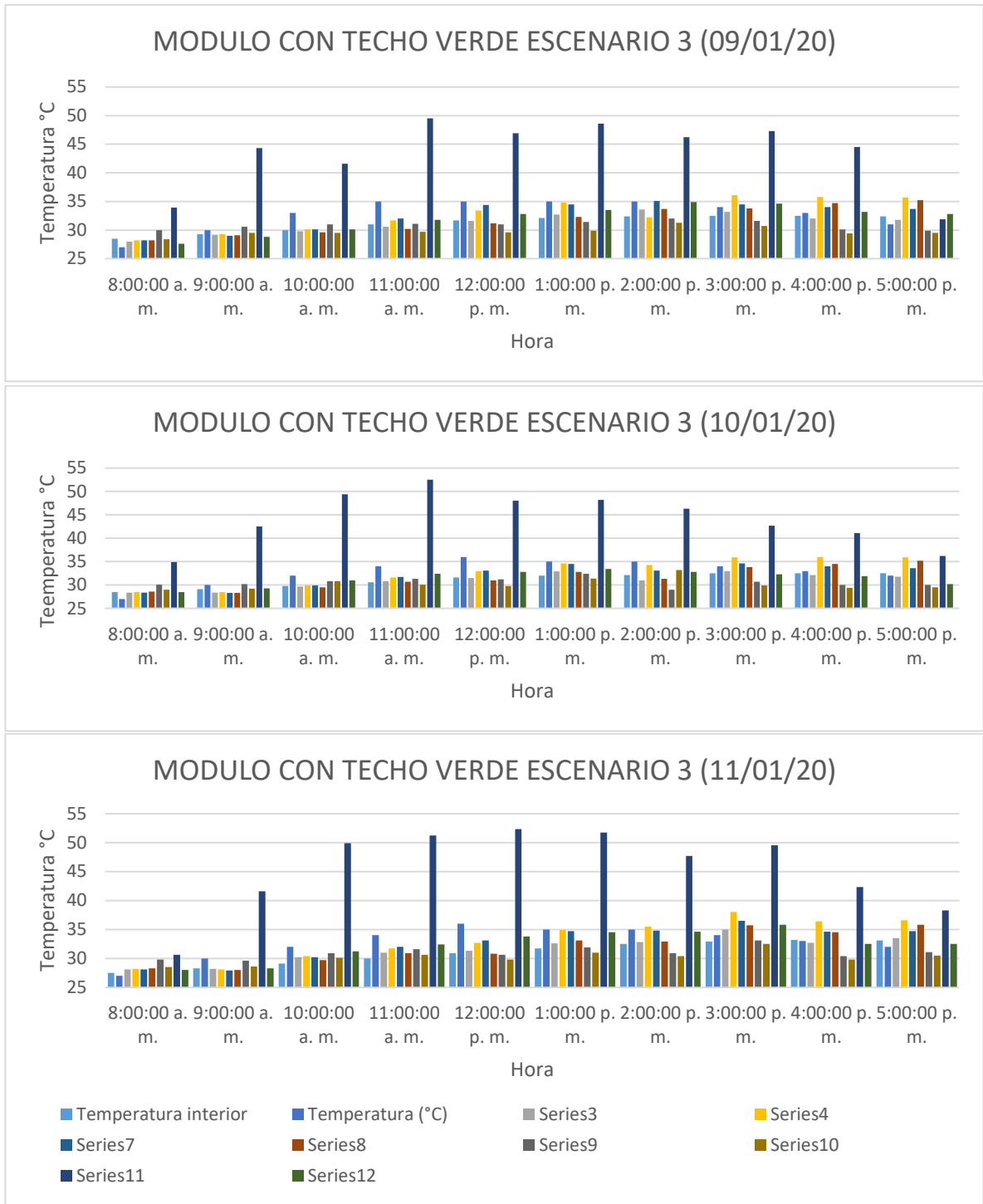


Ilustración 86. temperaturas modulo techo verde escenario 3.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

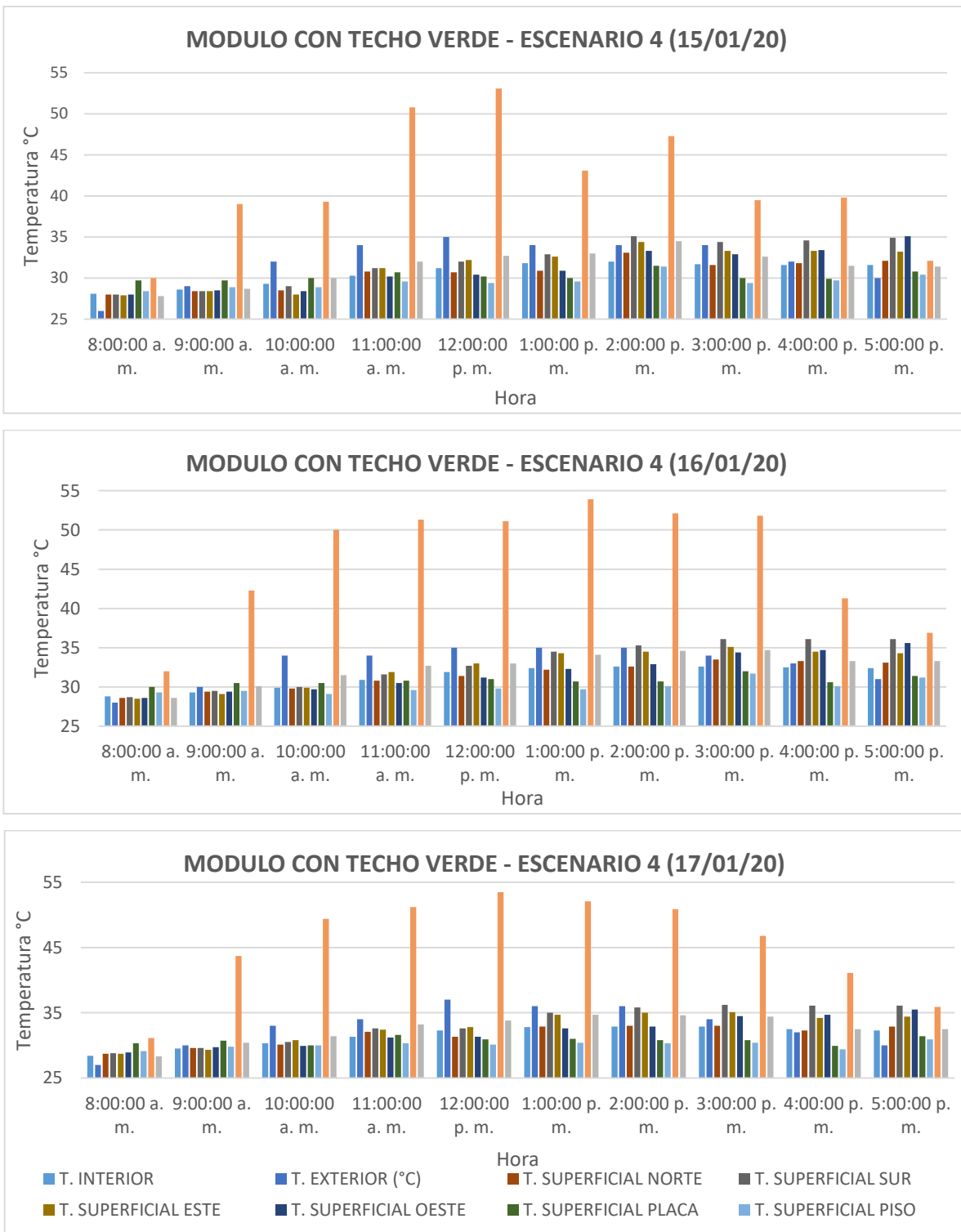


Ilustración 87. Temperaturas modulo techo verde escenario 4.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

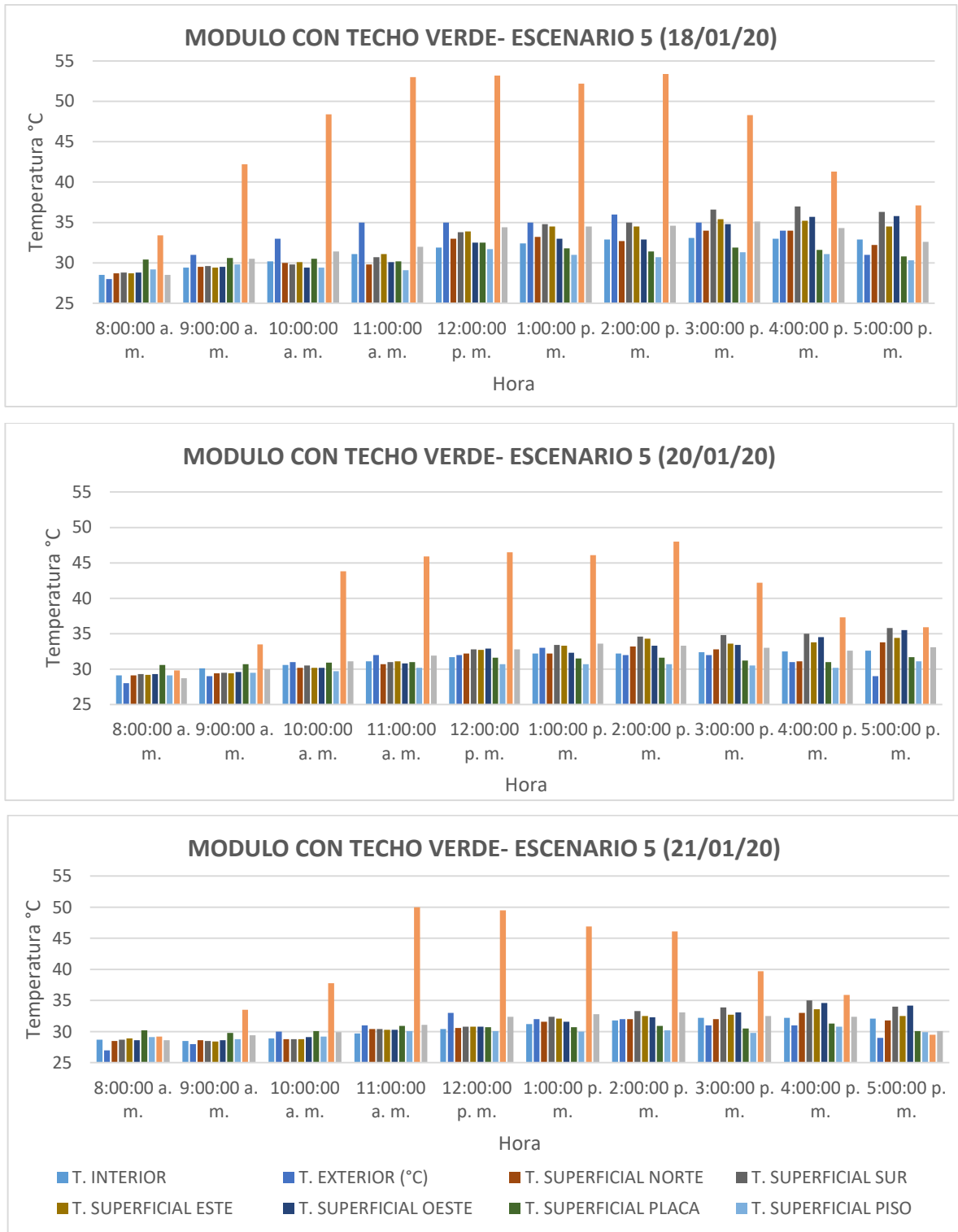


Ilustración 88. Temperaturas modulo techo verde escenario 5.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).

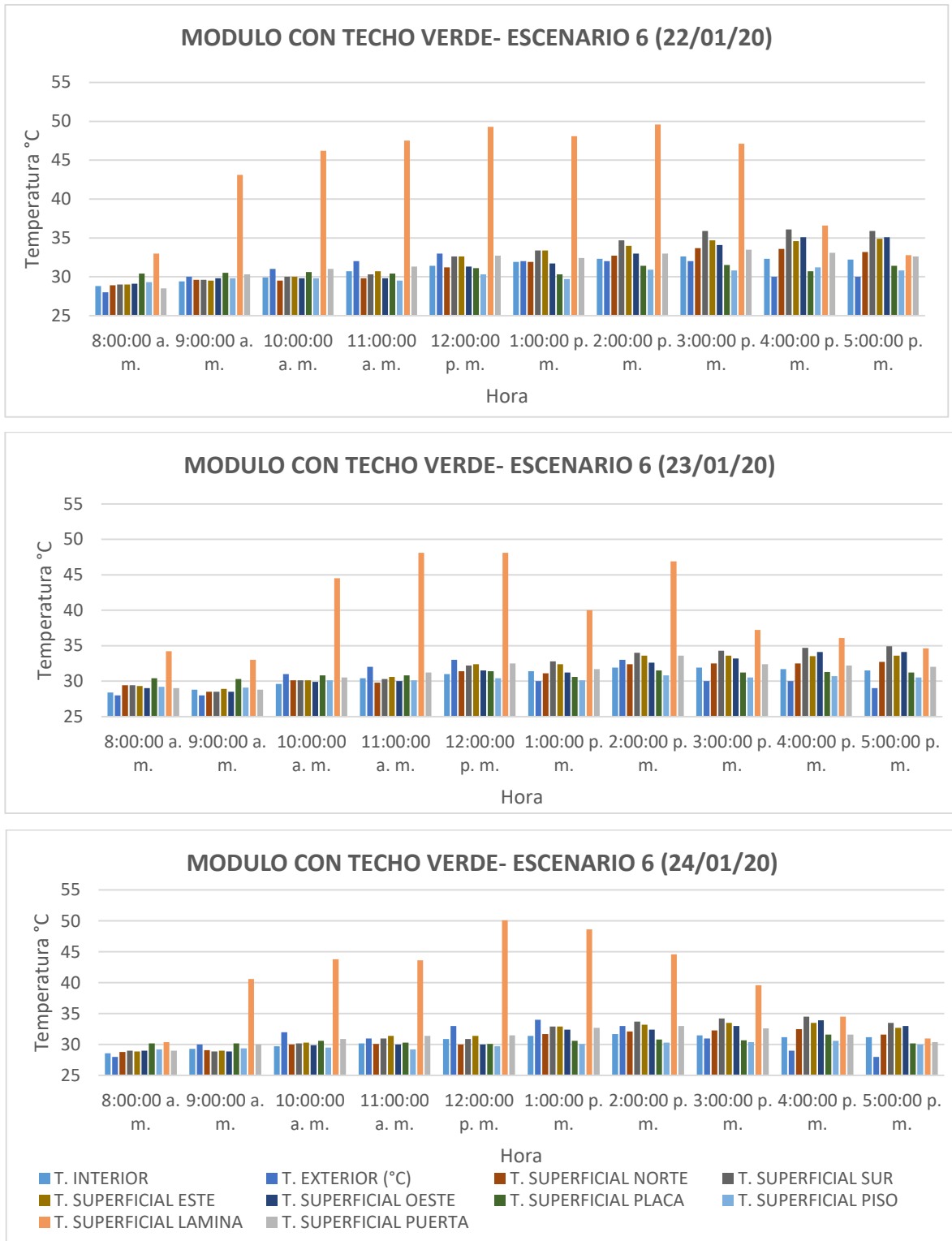


Ilustración 89. Temperaturas modulo techo verde escenario 6.

Fuente: (Barón & Navarro, 2020).