



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
PROGRAMA EDUCATIVO DE ARQUITECTURA



**EVALUACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE CALENTAMIENTO PASIVO PARA LAS
CONDICIONES TÉRMICAS EN LA CIUDAD DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA**
(Caso de estudio: Muro Trombe con masa térmica variable)

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE
ARQUITECTO

QUE PRESENTA

YULISSA DAYANNA GUTIÉRREZ SAUCEDO

Correo electrónico UABC: yulissa.gutierrez@uabc.edu.mx

Correo personal: yulissagtz304@gmail.com

Director de tesis: Dr. Julio César Rincón Martínez

Identificador ORCID: orcid.org/0000-0002-1946-3609

Co-Director de tesis: Dr. Marcos Eduardo González Trevizo

Identificador ORCID: orcid.org/0000-0002-7382-2641

Ensenada B.C., a enero de 2023.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
PROGRAMA EDUCATIVO DE ARQUITECTURA



**EVALUACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE CALENTAMIENTO PASIVO PARA LAS
CONDICIONES TÉRMICAS EN LA CIUDAD DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA**
(Caso de estudio: Muro Trombe con masa térmica variable)

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE
ARQUITECTO

QUE PRESENTA

YULISSA DAYANNA GUTIÉRREZ SAUCEDO

Correo electrónico UABC: yulissa.gutierrez@uabc.edu.mx

Correo personal: yulissagtz304@gmail.com

Director de tesis: Dr. Julio César Rincón Martínez

Co-Director de tesis: Dr. Marcos Eduardo González Trevizo

Revisores de tesis: Dra. Ivett Zavala Guillén

Dra. Elizabeth Martínez Bermúdez

Dr. Francisco Fernández Melchor

Ensenada B.C., a enero de 2023.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

EVALUACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE CALENTAMIENTO PASIVO PARA LAS
CONDICIONES TÉRMICAS EN LA CIUDAD DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA
(Caso de estudio: Muro Trombe con masa térmica variable)


TESIS


PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL TÍTULO DE
ARQUITECTO


PRESENTA:

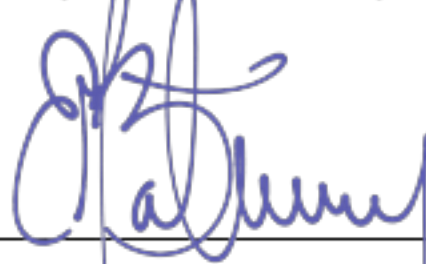
YULISSA DAYANNA GUTIÉRREZ SAUCEDO

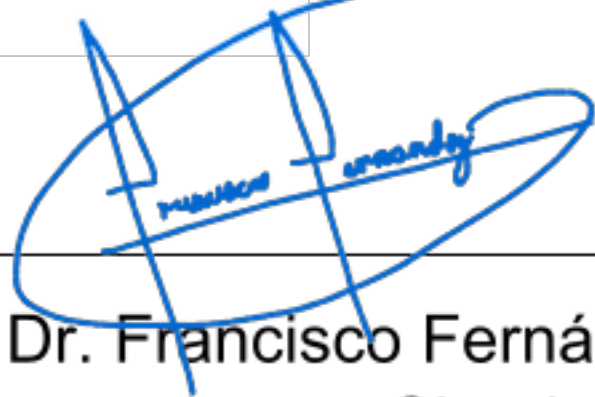
Aprobada por:


Dr. Julio César Rincón Martínez
Director


Dr. Marcos Eduardo González Trevizo
Codirector
(Secretario)


Dra. Ivett Zavala Guillén
Sinodal
(Vocal)


Dra. Elizabeth Martínez Bermúdez
Sinodal
(Vocal)


Dr. Francisco Fernández Melchor
Sinodal
(Vocal)

Ensenada, B. C., octubre de 2022.

DEDICATORIA

A mis padres y abuelos,

Con amor y respeto,
Por su apoyo incondicional durante mi vida y mis estudios.

A mi director de tesis,
Por creer en mí y en mi capacidad.

Y, por último, pero no menos importante a mis amigos,
Por alentarme y darme ánimos.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres

Erika M. Gutiérrez Saucedo y Luis Eduardo Cibrián Torres

Que gracias a su esfuerzo, sacrificio y trabajo lograron darme mi carrera universitaria; por apoyarme y guiarme en las metas y objetivos que deseo cumplir, pero sobre todo por fomentar en mí, la necesidad de seguirme superando.

A mi hermana

Itzel Cibrián Gutiérrez

Por ayudarme en la realización de mi proyecto.

A mis abuelos

Jorge Gutiérrez Camacho y Lidia Saucedo Amador

Por siempre preocuparse y cuidar de mí; por darme su apoyo incondicional en mis proyectos de vida.

A mi director de tesis

Dr. Arq. Julio César Rincón Martínez

Que aún cuando muchas veces no ponía atención en sus clases, creyó en mí y en mi capacidad para realizar esta tesis, me motivó a seguir aprendiendo y logró sacarme de mi zona de confort muchas veces.

A mis amigos

Los de la orden del cimarrón, Luz, Frida y Melanie

Que siempre me alentaron y me motivaron a creer en mí y de todo lo que puedo ser capaz, por las risas y el apoyo en los momentos difíciles; pero sobre todo por estar ahí.

Al equipo de servicio social

Yoadi Robles, Marleny Gutiérrez, Sandra Mares, Alan Macias, Darío Quero y Esiquio García

Por formar un gran equipo, sin el cual no hubiese sido posible construir y concluir la parte práctica de mi investigación.

Al profesor de la FIAD

Arq. Walter García

Por la asesoría brindada en la ejecución de la técnica tapial.

Al equipo DHAM

Ing. Daniel Mora y compañía

Por apoyarme en la realización de este proyecto.

RESUMEN

La ciudad de Ensenada, Baja California, es uno de los sitios más septentrionales de México, su clima es seco extremo y su bioclima es templado seco. Las condiciones medias anuales de temperatura son de 17.3 °C y humedad relativa de 75.8 %, en promedio, lo que advierte predominantemente condiciones de bajo calentamiento a lo largo del año. Además, con las técnicas empleadas en el diseño y la construcción de las edificaciones contemporáneas se deja entre ver la carencia de sistemas pasivos de calentamiento que contribuyan en la habitabilidad de los espacios, lo que implica un gasto energético injustificado para el acondicionamiento de interiores y un impacto negativo en la economía y la salud del usuario. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación es evaluar, durante el periodo frío, el desempeño térmico de los tres sustratos con mayor representatividad geográfica en la ciudad: Cambisol, regosol y phaeozem, implementados como parte de la masa térmica de un muro Trombe dispuestos en la cara sur de diferentes módulos experimentales. Para lo anterior, se diseñó, construyó y monitoreó un prototipo experimental a base de sistema ligero replicado en cada uno de los sustratos analizados. El periodo de evaluación fue del 02 de diciembre de 2021 al 28 de febrero de 2022; las variables registradas fueron la temperatura del aire y la humedad relativa en los siguientes puntos de cada módulo: Cámara de aire, núcleo de la masa térmica, espacio interior y ambiente exterior. El análisis de datos se llevó a cabo a partir de una hoja de cálculo que permitió procesar, graficar e interpretar estadísticamente los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos demostraron la eficiencia de la masa térmica al mostrar un retardo promedio de 13 horas en cada uno de los sustratos. El mayor retardo se registró de las 09:00 horas a las 23:00 horas, debido a las ganancias obtenidas durante el horario diurno. El cambisol fue el sustrato con mayor efectividad de los tres analizados, pues la oscilación térmica conseguida correspondió a 14.3 °C - 26.6 °C, en promedio, valores que contribuyen con la habitabilidad ambiental del espacio interior.

Palabras clave: Acondicionamiento pasivo, Arquitectura bioclimática, Clima mediterráneo, Construcción con tierra, Módulo experimental, Muro tapial, Variables ambientales.

ABSTRACT

Ensenada city in Baja California, is one of the northernmost places in Mexico. It has an extreme dry climate and a temperate dry bioclimate, its average annual temperature is 17.3 °C and its relative humidity of 75.8%, which warns of prevailing cold conditions throughout the year. The design and construction of contemporary buildings in this city show the lack of passive heating systems that contribute to the habitability of architectural spaces, which implies an unjustified energy demand for their conditioning and a negative impact on the users' economy and health. Therefore, the objective of this thesis is to evaluate during the cold period the thermal performance of the three substrates with the greatest geographical representation in the city: Cambisol, Regosol and Phaeozem, implemented in the thermal mass of a Trombe wall oriented on the south face of three experimental modules. For this, an experimental prototype based on Dry Wall construction system was designed, built and monitored. The evaluation period was from December 2, 2021 to February 28, 2022; the temperature and relative humidity were recorded at each experimental module: Air chamber, thermal mass, indoor and outdoor environment. Data analysis was carried out from a spreadsheet that allowed the statistical processing, graphing and interpretation of the results obtained. The results demonstrated the efficiency of the thermal mass by showing an average delay of 13 hours in each substrates. The greatest delay occurred from 09:00 to 23:00, due to the gains obtained during daytime hours. Cambisol was the most effective substrate of the three analyzed, since the thermal oscillation achieved was to 14.3 °C - 26.6 °C, average, values that favor thermal habitability indoors.

Keywords: Passive conditioning, Bioclimatic architecture, Mediterranean climate, Rammed earth construction, Experimental module, Mud wall, Environmental variables.

INDICE

RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGAIÓN	5
1.1. Problemática	5
1.2. Justificación	7
1.3. Objetivos	8
1.3.1. General	8
1.3.2. Específicos	8
1.4. Hipótesis	9
1.4.1. General	9
1.4.2. Específicas	9
1.5. Alcances	10
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES	11
2.1. Marco teórico	11
2.2. Estado del arte	17
CAPÍTULO III. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	25
3.1. Caso de estudio	25
3.2. Periodos de evaluación	27
3.3. Variables e instrumentos de medición	29
3.3.1. Variables ambientales	29
3.3.2. Instrumentos de medición	30
3.4. Diseño y construcción de los módulos experimentales	38
3.4.1. Diseño	38
3.4.2. Construcción	43
3.4.3. Puesta en marcha	67

CAPITULO IV. REGISTRO Y PROCESAMIENTO DE DATOS	69
4.1. Monitoreo y registro de datos	69
4.2. Procesamiento y graficación de datos	71
CAPITULO V. RESULTADOS	72
5.1. Desempeño térmico de los sustratos	72
5.1.1. Sustrato Cambisol	74
5.1.2. Sustrato Regosol	81
5.1.3. Sustrato Phaeozem	88
5.2. Desempeño hídrico de los sustratos	95
5.2.1. Sustrato Cambisol	96
5.2.2. Sustrato Regosol	98
5.2.3. Sustrato Phaeozem	101
CONCLUSIONES	104
REFERENCIAS	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema normalizado de un muro Trombe	15
Figura 2. Construcción de referencia	18
Figura 3. Construcción con sistema pasivo de acumulación.	18
Figura 4. variaciones de funcionamiento	22
Figura 5. Vivienda de estudio.	24
Figura 6. Temperaturas promedio a lo largo de un año normalizado en ensenada.	28
Figura 7. Cámara de imagen térmica	34
Figura 8. Termómetro infrarrojo	35
Figura 9. Data logger elitech rc-51h	36
Figura 10. Registrador de datos	37
Figura 11. Dimensionamiento del prototipo de módulo experimental	39
Figura 12. Detalle de muros de steel framing	40
Figura 13. Detalle de muro Trombe	41
Figura 14. Apunte isométrico	41
Figura 16. Vista en alzado de módulo experimental	42
Figura 15. Vista en planta de módulo experimental.	42
Figura 17. Armado de estructura a base de postes y canales metálicos.	50
Figura 18. Instalación de fibra de vidrio.	51
Figura 19. Instalación de panel de yeso.	51
Figura 20. Instalación de paneles de cemento.	51
Figura 21. Vano en la parte inferior del módulo.	52
Figura 22. compuerta cuadrada de madera y poliestireno.	52
Figura 23. acabado final interior.	53
Figura 24. Mapeo edafológico en el que se ubica la posición geográfica de cada sustrato estudiado.	54
Figura 25. Secado del sustrato.	56
Figura 26. desintegración de terrones.	57
Figura 27. Cernido de los sustratos.	57
Figura 28. cubetas con el sustrato obtenido.	58
Figura 29. espécimen de laboratorio desde el cual se definieron algunas características físicas.	59
Figura 30. Ubicación seleccionada para el emplazamiento de los módulos.	60
Figura 31. <i>Izquierda.</i> Aplicación de desmoldante. <i>Derecha.</i> Ensamble de cimbra.	60
Figura 32. <i>Izquierda.</i> Aplicación de 5% del agregado de cemento. <i>Derecha.</i> Aplicación del 10% de agua.	61
Figura 33. <i>Izquierda.</i> Vaciado del contenido de la cubeta. <i>Derecha.</i> Compactación del sustrato.	62
Figura 34. <i>Ambos.</i> Descimbrado del muro tapial.	63
Figura 35. <i>Ambos.</i> Colocación de chaflan con de mortero simple.	63

Figura 36. <i>Izquierda</i> . Traslado y maniobra. <i>Derecha</i> . Acoplamiento de módulos con muros tapial.	64
Figura 37. Módulos experimentales sobre polines de madera.	65
Figura 38. <i>Ambos</i> . Acoplamiento de los módulos con muros tapial.	66
Figura 39. <i>Izquierda</i> . Aplicación de acabados finales. <i>Derecha</i> . Instalación de ventana fija.	67
Figura 40. Módulos en condiciones de iniciar operación.	68
Figura 41. Ubicación de sensores en cada módulo experimental.	70
Figura 42. Comparativa entre las condiciones térmicas de la ciudad y las del sitio de evaluación.	74
Figura 43. Comportamiento térmico del sustrato cambisol: exterior vs cámara de aire.	75
Figura 44. Comportamiento térmico del sustrato cambisol: exterior vs masa térmica.	78
Figura 45. Comportamiento térmico del sustrato cambisol: exterior vs espacio interior.	80
Figura 46. Comportamiento térmico del sustrato regosol: exterior vs cámara de aire.	82
Figura 47. Comportamiento térmico del sustrato regosol: exterior vs masa térmica.	84
Figura 48. Comportamiento térmico del sustrato regosol: exterior vs espacio interior. Fuente: elaboración propia.	87
Figura 49. Comportamiento térmico del sustrato phaeozem: exterior vs cámara de aire. Fuente: elaboración propia.	89
Figura 50. Comportamiento térmico del sustrato phaeozem: exterior vs masa térmica.	92
Figura 51. Comportamiento térmico del sustrato phaeozem: exterior vs espacio interior. Fuente: elaboración propia.	94
Figura 52. Comparativa entre las condiciones hígricas de la ciudad y las del sitio de evaluación.	96
Figura 53. Comportamiento hígrico exterior-cámara de aire- espacio interior	97
Figura 54. Comportamiento hígrico del sustrato regosol: exterior-cámara de aire- espacio interior.	100
Figura 55. Comportamiento hígrico del sustrato phaeozem: exterior-cámara de aire- espacio interior	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Variaciones de funcionamiento estudiadas de un muro Trombe del autor luna <i>et al.</i> (2014).	19
Tabla 2. Especificaciones técnicas de las variables que registra la cámara de imagen térmica	35
Tabla 3. Especificaciones técnicas de las variables ambientales que registra el termómetro infrarrojo cw364	36
Tabla 4. Especificaciones técnicas de las variables ambientales que registra el data logger elitech:	37
Tabla 5. Especificaciones técnicas de las variables ambientales que registra el datalogger 88395:	38
Tabla 6. Materiales empleados en la ejecución de los módulos experimentales.	43
Tabla 7. Especificaciones de extracción y traslado de los sustratos	54

INTRODUCCIÓN

El muro Trombe es un sistema de captación solar pasivo que, dependiendo el fin para el cual se utiliza, puede no tener partes móviles ni algún tipo de mantenimiento. Este sistema pasivo está conformado por una lámina de vidrio con un grosor específico (ventana fija), una cámara de aire y una masa térmica (muro). Esta última, puede estar conformada por diferentes materiales, tales como: Tierra, piedra, ladrillo, block, concreto o algún material sólido preferentemente extraído de forma local. Asimismo, debe contener orificios en la parte superior e inferior de la masa térmica que comuniquen a la cámara de aire con el espacio interior a acondicionar, con el fin de generar de manera convectiva un flujo constante en la masa de aire.

Este sistema debe estar preferentemente orientado hacia el sur en el hemisferio norte, y al hacia el norte en el hemisferio sur, ya que, éste capta por medio de la lámina acristalada la radiación infrarroja del Sol con el fin de, por un lado, calentar el aire de la cámara que se estaría transmitiendo instantáneamente al espacio interior, y por otro, calentar la superficie y el núcleo de la masa térmica en aras de almacenar la mayor cantidad de calor durante horario diurno para transmitirlo al interior durante los momentos de bajo calentamiento. Lo anterior, debido a que ésta

posee la habilidad de absorber y resguardar la energía térmica para posteriormente radiarla al interior.

Esta estrategia pasiva es utilizada para acondicionar térmicamente un espacio, es decir, calentarlo durante invierno y enfriarlo durante verano, logrando así, mantener una sensación de confort dentro del espacio habitable. Además, permite economizar el gasto energético del edificio dada la notable reducción de costos en energía por la subutilización de sistemas activos de calentamiento. En un estudio experimental desarrollado en Marmaris, Turquía en 1977, se construyeron dos modelos semejantes, uno como referencia y otro donde se aplica el sistema pasivo (muro Trombe), los cuales después de un levantamiento y procesamiento de datos demostraron que el modelo con muro Trombe puede transmitir de un 15 a un 35 % de radiación al interior, mientras que el de referencia solo del 8 al 21 % (Tasdemiroglu, Ramos Berjano, & Tinaut, 1982), por mencionar un ejemplo. Esto muestra que la implementación de un muro Trombe logra obtener y satisfacer la carga energética requerida.

La ciudad litoral de Ensenada se localiza sobre el Océano Pacífico y cuenta con dos tipos de climas: Los templados húmedos, que se presentan en las partes altas, y los secos, que se localizan en el resto del territorio geográfico, por lo que presenta un clima árido, donde la temperatura media anual es de 18 °C a 19 °C, con temperaturas extremas mayores a 30 °C en los meses de mayo a septiembre, y hasta de 5 °C en enero; presentando generalmente lluvias durante el invierno.

En Ensenada los principales tipos de suelo, por extensión territorial, son: Cambisol, regosol y phaeozem, de acuerdo con el mapeo edafológico del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2022). El suelo es un recurso natural que puede encontrarse en cualquier sitio ya sea de territorio continental o insular, por lo que puede figurar como materia prima para la construcción. Algunas técnicas constructivas que emplean a la tierra como materia prima de construcción son: Tapial, adobe, bajareque y COB, por mencionar algunas; todas ellas técnicas constructivas ancestrales que han evidenciado ciertas ventajas térmico-acústicas y, en algunos casos, estructurales para la construcción en conjuntos vernáculos.

Además, el utilizar los sustratos como materia prima local implica menor consumo energético, reducción en los costos de construcción, mano de obra empírica y eficiencia en la reintegración al medio ambiente.

A este respecto, los suelos poseen propiedades que pueden ser estudiadas y evaluadas, tal como: Estabilidad estructural, características mecánicas, porosidad, fertilidad y, sobre todo, propiedades térmicas, las cuales pueden contribuir a la retención del calor sin generar contaminantes como los generados por utilizar otros materiales de construcción. Dadas las cualidades antes mencionadas, la tierra se posiciona como uno de los materiales con mejores características para emplearse en la masa térmica de un muro Trombe y contribuir a su apropiado funcionamiento como estabilizador térmico.

En esta investigación se busca evaluar el desempeño térmico de los tres sustratos representativos de la ciudad de Ensenada dispuestos en un muro Trombe ubicado en la cara sur de distintos módulos experimentales: Cambisol, regosol y phaeozem, como técnica de diseño pasivo que atienda los requerimientos de bajo calentamiento que dan lugar durante el periodo frío en dicha ciudad. En este sentido, esta investigación se estructura en cinco capítulos, los cuales presentan el contenido siguiente:

En el *Capítulo I. Planteamiento de la investigación*, se define el tema del cual se pretende llevar a cabo la investigación, donde se establecen los precedentes, las ideas y los planteamientos iniciales.

En el *Capítulo II. Antecedentes*, se presentan diversos conceptos, conocimientos y estudios que están relacionados con el tema de la investigación, mostrando fuentes de información documental, con el propósito de crear comparación en el proceso y reflexiones obtenidas en los casos de estudio.

En el *Capítulo III. Diseño de la investigación*, se describen cada una de las consideraciones que permitieron desarrollar de forma sistemática la investigación, con el propósito de evidenciar una metodología estricta abordada y brindar la base para su reproducción en otras condiciones de estudio.

En el *Capítulo IV. Registro y procesamiento de datos*, se desarrollan los procedimientos metodológicos para la fijación de los sensores dentro de cada uno de los módulos, así como, el monitoreo y registro de diferentes variables ambientales a lo largo del periodo de estudio. Adicionalmente, se describen los métodos gráficos y de procesamiento utilizados para el análisis descriptivo del comportamiento del objeto de estudio a lo largo del periodo analizado.

En el *Capítulo V. Resultados*, se presentan los hallazgos obtenidos a partir del procesamiento de datos contenido en el capítulo anterior, específicamente, la relación entre el comportamiento higrotérmico del ambiente exterior y, el desempeño higrotérmico de cada uno de los módulos experimentales y las partes que lo conforman.

Capítulo I.

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

El planteamiento del problema define el tema que se pretende averiguar y, a su vez, va formando una estructura donde se establecen los precedentes de la investigación, afinando las ideas y los planteamientos iniciales. Por lo anterior, este capítulo se estructura en: Problemática, justificación, objetivos, hipótesis y alcances.

1.1. Problemática

La ubicación geográfica de la ciudad de Ensenada es 31° 52' latitud norte, 116° 37' longitud oeste y una altitud de 1 a 1 900 msnm (INEGI, 2009); se encuentra a 90 km al sur de la frontera con Estados Unidos de Norteamérica. De acuerdo con la clasificación climática de García (2004) y la agrupación bioclimática de Fuentes y Figueroa (1990), el sitio cuenta con un clima seco extremoso (BS0 ks(e)) y un bioclima templado seco, respectivamente. En un año normalizado, la temperatura

media anual es de 17.3 °C; la humedad relativa media, de 75.8 %; la precipitación pluvial total, de 217.3 mm; y, la velocidad media de viento, de 2.5 m/s, con un rango de incidencia promedio del suroeste al noroeste (Huerta Tapia, 2018; SMN-CONAGUA, 2017).

En la ciudad de Ensenada se puede identificar la carencia del uso de técnicas o sistemas pasivos de calentamiento en los edificios durante el periodo frío de un año normalizado; esto, probablemente por la falta de conocimiento en el diseño, el sistema constructivo y el costo que representan este tipo de sistemas, ya que en la actualidad los arquitectos locales de la ciudad deciden omitirlos y prefieren redimir los requerimientos higrotérmicos a partir de la inclusión de sistemas mecánicos o automatizados que demandan un consumo energético permanente.

A su vez, la falta de utilización de estas técnicas o estrategias pasivas de calentamiento genera un consumo innecesario de energía (eléctrica o de gas), ya que implementan sistemas activos en las edificaciones provocando un impacto negativo en la economía y la salud de los usuarios que habitan esos espacios.

No obstante, la implementación de técnicas de diseño pasivo desde la conceptualización del proyecto, como el muro Trombe, podrían lograr la climatización pasiva de los espacios interiores sin el uso de sistemas activos de calefacción o aire acondicionado, ya que en este caso, el dispositivo se basa en la captación y almacenamiento de la radiación solar directa y la circulación del aire que se produce por la diferencia de temperaturas, para lograr transmitir calor durante los meses fríos del año y permitir un mejor enfriamiento a lo largo de los meses cálidos a través de la transferencia de calor convectiva entre interior-externo que promueve la estratificación térmica. De esta manera, se contribuye en el logro de condiciones térmicas confortables para el usuario, por un lado, y, por otro, se reduce el consumo de energía del edificio.

1.2. Justificación

En la ciudad de Ensenada se presentan tres tipos representativos de suelo, según la extensión territorial que representan: Cambisol, regosol y phaeozem. Como es sabido, el calor específico de la tierra hace que ésta sea considerada, en el campo de la Arquitectura Bioclimática, como uno de los sumideros de calor más convenientes para almacenar y estabilizar el calor por periodos prolongados, por lo que su uso en el diseño de espacios advierte un potencial térmico sustancial para lograr las condiciones de confortabilidad térmica en interiores.

En ese sentido, la presente investigación se enfoca en evaluar el desempeño térmico de esos tres tipos de suelo, dispuestos como el elemento que conforma la masa térmica de un muro Trombe. Para ello, el muro Trombe se ubicó en un módulo experimental hermético cuyas características de diseño, construcción y evaluación se describen en los apartados *Diseño y construcción de los módulos experimentales* (pág. 38) y *Puesta en marcha* (pág. 67).

Una característica adicional que cabe señalar es que, dado que la masa térmica del muro Trombe estará conformada por los tres tipos de suelo representativos, por su extensión territorial en la ciudad, ésta se convierte en un material de construcción ecológico y sustentable que permite reducir costos de construcción, transporte, tiempo de ejecución y tiempo para reintegrarse al medio ambiente; así como los costos por consumo energético durante la vida útil del edificio que lo emplee.

Para lograr lo anterior, esta tesis forma parte de un proyecto de investigación denominado *Estudio del potencial térmico del suelo de Ensenada dirigido a la implementación de diseño pasivo*, el cual busca estudiar las propiedades físicas de los suelos que, geográficamente hablando, representan mayoría en extensión territorial en la ciudad, a partir de la estimación de la conductividad, emisividad y reflectividad de cada uno de ellos. En este tenor, en tanto el proyecto de investigación atiende el estudio de las propiedades físicas de los suelos, esta tesis aborda la evaluación del desempeño térmico de ellos en interiores, a partir de su implementación en elementos arquitectónicos verticales: Muros Trombe.

Por ende, se busca que los resultados obtenidos con este trabajo tengan una contribución en futuras investigaciones o evaluaciones, pero, sobre todo, que estos conocimientos sean utilizados en la etapa de diseño y construcción de proyectos arquitectónicos que se pretendan realizar en la ciudad, buscando la manera de implementar el uso de estrategias pasivas de calentamiento, logrando incentivar el diseño y la Arquitectura bioclimática.

1.3. Objetivos

En este apartado se describen los objetivos general y específicos en los cuales está dirigido el desarrollo de la investigación, con el propósito de alcanzar los resultados esperados.

1.3.1. General

Diseñar y evaluar el desempeño térmico de tres muros Trombe dispuestos en la cara sur de distintos módulos experimentales, a partir del empleo en su masa térmica de los tres tipos de suelos representativos en la ciudad de Ensenada: Cambisol, regosol y phaeozem, como técnica de diseño pasivo que atienda los requerimientos de bajo calentamiento que dan lugar durante el periodo frío en dicha ciudad.

1.3.2. Específicos

Del objetivo general, se pueden desprender los siguientes objetivos particulares:

- Identificar el periodo térmico predominante de Ensenada a partir del análisis de la temperatura ambiente, la humedad relativa y la velocidad de viento que se presentan en un año normalizado.
- Diseñar el prototipo de módulo experimental que alojará a cada uno de los muros Trombe elaborados a partir de los tres tipos de suelo más comunes en Ensenada, por medio del sistema constructivo de tapial (tierra amasada).

- Construir tres módulos experimentales con muro Trombe, elaborados con un tipo de suelo distinto. En esta etapa, se tendrá especial cuidado en la compresión a la que se amase la tierra a fin de coincidir con las muestras de suelo estudiadas en laboratorio (estudio geotérmico en el que se apoya esta investigación).
- Evaluar el desempeño térmico de los tres módulos experimentales durante invierno (periodo frío) en la ciudad de Ensenada: Diciembre, enero y febrero.

1.4. Hipótesis

Las hipótesis son consideradas como teorías o proposiciones tentativas que dan respuesta inicial al tema a desarrollar y ayudan a obtener algunas guías para la realización de la investigación (Hernández et al., 2014). En ese entendido, a continuación, se describen la hipótesis general y específicas de esta investigación.

1.4.1. General

Los suelos cambisol, regosol y phaeozem, representativos por su territorialidad en la ciudad de Ensenada, cuentan con las propiedades térmicas suficientes para almacenar por periodos prolongados el calor ganado diariamente con la incidencia solar, por lo que, dispuestos en la masa térmica de un muro Trombe orientado al sur, ofrecen las condiciones térmicas suficientes para contribuir en el calentamiento pasivo de los espacios interiores durante el periodo frío de un año normalizado en la ciudad.

1.4.2. Específicas

De la hipótesis general, se pueden desprender las siguientes particulares:

- Las condiciones térmicas predominantes en la ciudad de Ensenada son frías y se presentan en al menos tres cuartas partes del año con temperaturas medias inferiores a los 20 °C.

- El diseño del muro Trombe utilizado en la etapa experimental y de evaluación de esta investigación, en principio, está conformado por una lámina acristalada de 6 mm, una cámara de aire de 0.12 m y una masa térmica de 0.22 m conformada con los sustratos representativos de Ensenada.
- La construcción de los prototipos experimentales con los tres tipos de suelo diferentes (cambisol, regosol y phaeozem), permite obtener una comparación y un referente de desempeño entre ellos bajo las condiciones térmicas del periodo de estudio.
- El desempeño térmico de cada módulo experimental depende del calor específico de cada tipo de suelo.

1.5. Alcances

Los alcances generales que fueron planteados en el desarrollo de la investigación son los siguientes:

- Se realizó la evaluación de tres módulos experimentales de 1.2 x 1.2 x 1.2 m integrando un muro Trombe en su cara sur, como estrategia de calentamiento pasivo.
- Para la implementación de la estrategia pasiva se utilizó el esquema normalizado del muro Trombe (cristal, cámara de aire y masa térmica), en virtud de que el alcance de esta tesis se enfoca en la evaluación del desempeño térmico de los tres tipos de suelos empleados en su masa térmica.
- La masa térmica utilizada en el muro Trombe de los módulos experimentales fueron los tres tipos de suelo predominantes en la ciudad de Ensenada: Cambisol, regosol y phaeozem.
- Los módulos mencionados sólo fueron evaluados por un periodo de tres meses (periodo invernal): Diciembre, enero y febrero.

Capítulo II. ANTECEDENTES

A continuación, se presentan diversos conceptos, conocimientos y estudios que están relacionados con el tema de la presente investigación, mostrando fuentes de información documental, con el propósito de crear una comparación del proceso y reflexiones obtenidas en otros casos de estudio. Por esta razón, el capítulo se encuentra estructurado por el marco teórico y el estado del arte.

2.1. Marco teórico

Para la Arquitectura, la habitabilidad es el concepto más importante que se busca lograr en un espacio, ya que, según la RAE (2020), es la Arquitectura la “cualidad de ser habitable”. El término *habitar*, del latín *habitāre*, significa *vivir en un lugar o residir en él*.

La habitabilidad consiste en la satisfacción de necesidades espaciales del ser humano y cómo se desenvuelve en él durante la realización de sus actividades cotidianas, ya que el hombre siempre va en busca de un lugar del cual pueda apropiarse, estableciendo una sensación de confort térmico, lumínico, hídrico, acústico y electromagnético, entre otros (Arzoz, 2014).

El confort térmico es uno de los aspectos más relevantes que deben ser atendidos al momento de diseñar y construir un espacio arquitectónico, ya que el usuario que habitará ese espacio debe lograr obtener un entorno agradable dentro de la edificación, tanto en verano como en invierno, sin necesidad de utilizar equipos electromecánicos que demanden un consumo energético adicional (sistemas activos). Por esta razón, desde el momento en el que se inicia el diseño o la etapa de anteproyecto, se debe considerar la implementación de sistemas pasivos tanto de enfriamiento como de calentamiento, para así obtener el confort térmico deseado para los usuarios. En este sentido, la Arquitectura debe diseñarse en torno al aprovechamiento máximo de los recursos naturales que el medio natural ofrece (temperatura, viento, humedad, recorrido aparente del sol, flora, topografía, etc.), convirtiéndose, entre otros, en:

- Arquitectura solar pasiva (uso eficiente de la energía solar sin el uso de sistemas mecánicos).
- Arquitectura solar activa (aprovechamiento de la energía solar mediante sistemas mecánicos y/o eléctricos).

Para poder atender este factor, primero se deben investigar o conocer las condiciones climáticas del sitio donde se realizará la edificación. La radiación solar, temperatura, vientos, humedad y precipitación, entre otros, son algunos de los conceptos que deben tomarse en cuenta a la hora de iniciar la etapa preliminar del diseño.

La Arquitectura bioclimática es aquella que utiliza y aprovecha los recursos naturales de su entorno para mejorar las condiciones de habitabilidad de una

edificación, obteniendo espacios agradables térmicamente para el usuario sin la demanda adicional de energía para lograr su cometido. Como dice Antonio Baño Nieva (s.f.) “(...) la actividad arquitectónica es una filosofía o conjunto de pensamientos organizados que tienen como objetivo la integración del objeto arquitectónico en su entorno natural”.

A partir de lo mencionado anteriormente se deben definir algunos conceptos y técnicas de la Arquitectura bioclimática como:

- La trayectoria solar es lo que produce las estaciones del año, respecto al ángulo que forma el eje de rotación de la tierra, ya que este no siempre es perpendicular, con la trayectoria de traslación de la tierra alrededor del Sol, esto también produce las variaciones de las horas solares y el ángulo de radiación solar.
- La radiación solar se divide en tres tipos: La radiación directa es aquella que es recibida y que no ha sido absorbida ni dispersada, ya que no ha modificado su trayectoria. Mientras que la radiación difusa ha sido recibida en la superficie terrestre después de que su dirección cambió y causó dispersión en la atmósfera. Y, por último, la radiación reflejada es, como su nombre lo menciona, la que es reflejada por la superficie terrestre.
- La temperatura es uno de los factores del clima que ayuda a determinar si se encuentra un equilibrio térmico, la temperatura mide el grado de calor o frío y las variaciones sobre un cuerpo. Sagastume González (2006) menciona que “(...) la temperatura está muy condicionada a otros parámetros o factores como la radiación solar, viento, ubicación geográfica, entre otros (...)”.
- El viento es aire en movimiento generado como consecuencia en la búsqueda de un equilibrio en las presiones. Este se produce cuando se calienta una masa de aire en un punto de la tierra, cuando el aire se calienta este se eleva ya que tiene un menor peso, el aire va de zonas más frías a zonas más calientes.
- “En Arquitectura, el viento además de ser considerado como la principal forma de climatización en climas cálidos húmedos, es estudiado a través de

maquetas expuestas a túneles de viento donde se observa mediante simuladores, los obstáculos a los que se enfrenta el movimiento del aire y se determinan las posibles formaciones de turbulencias para mejorar el diseño de las edificaciones” (Sagastume González, 2006).

- La humedad se define como la cantidad de vapor de agua que es contenido o retenido en el aire y es fundamental para determinar el clima de un sitio. La humedad puede considerarse absoluta y relativa. La absoluta es la cantidad de vapor de agua que contiene la atmosfera y es inversamente proporcional a la temperatura, lo que quiere decir que mientras más calor, más humedad. La relativa es la relación entre la cantidad de vapor de agua que tiene una masa de aire y la máxima que podría tener, eso quiere decir que, si se tiene el 100% de humedad relativa, faltaría el aire y no sería posible vivir ahí (Soler Palau, 2018).
- La precipitación es un factor climatológico que se manifiesta cuando el movimiento del aire por convección produce elevaciones de aire formando gotas que caen en estado sólido (nieve o granizo) o líquido (agua).

“Desde el punto de vista arquitectónico, puede resultar un parámetro de gran importancia en algunas zonas climáticas debido principalmente a su frecuencia, a la elevada o escasa cantidad de agua que puede caer y a su estado físico, determinando muy especialmente el tipo de cubierta a utilizar, su inclinación y/o materiales constructivos a emplear. Además, como aspecto positivo, puede proveer a los usuarios de agua no potable para determinados usos” (Sagastume González, 2006).
- La Inercia térmica es la capacidad que tiene una masa para conservar energía térmica que recibe durante el día, para después liberarla gradualmente. La capacidad de almacenamiento depende de la masa, densidad y el calor específico del material.

La transmisión de calor se produce de tres maneras diferentes: Por conducción, que es cuando la energía calorífica se transmite cuando existe un contacto directo entre dos cuerpos u objetos con distintas temperaturas, este proceso suele suceder en elementos sólidos y no tanto en elementos líquidos y gases. En la convección, la

energía calorífica es transmitida por el movimiento físico de moléculas de las zonas con alta temperatura a zonas con baja temperatura, para buscar un equilibrio de temperatura, esto solo en estados líquidos y gaseosos. Y la radiación transmite energía en forma de ondas electromagnéticas, donde la intensidad depende de la temperatura a la que se encuentre, provocando una sensación de calor inmediata (Cengel & Boles, 2011).

Los sistemas pasivos son técnicas de acondicionamiento que no necesitan de energía convencional para su funcionamiento, y son añadidos a la edificación. Estos sistemas permiten la captación, control, almacenamiento y distribución de energía natural. Además, deben ser amigables con el ambiente, utilizando materiales o recursos que se encuentren en el entorno natural del sitio.

“El muro Trombe es un sistema de captación solar pasivo que no tiene partes móviles y que no necesita casi ningún mantenimiento. Esta alternativa propone potenciar la energía solar que recibe un muro y así convertirlo en un sencillo sistema de calefacción” (Tomás Franco, 2011). Este sistema pasivo está compuesto por una lámina de vidrio con un espesor específico, una cámara de aire y una masa térmica (muro); esta última puede ser de diversos materiales como piedra, ladrillo, block y tapial, entre otros, asimismo, debe contener unos orificios en la parte superior e inferior del muro para ventilación (Figura 1).

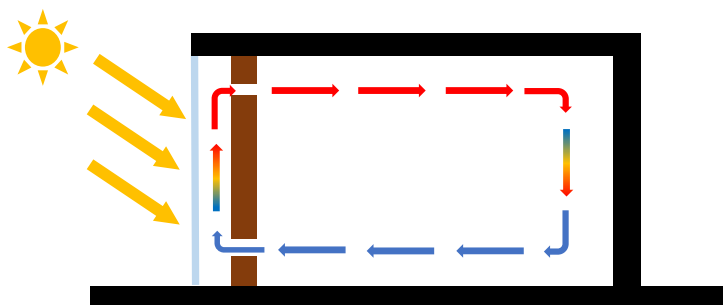


Figura 1. Esquema normalizado de un muro Trombe
Fuente: Elaboración propia.

La masa térmica es la habilidad de un material de absorber y guardar la energía térmica, puede almacenar energía solar durante el día y volver a radiarla por la noche. Utilizada correctamente, puede equilibrar las temperaturas internas

promediando los extremos diurnos (día-noche). Esto aumenta la comodidad y reduce los costos de energía.

Una cámara de aire es un espacio que se crea entre dos muros o vidrios, que están unidos por un armazón, este aislamiento térmico ayuda a reducir la cantidad de calor que escapa a través del muro, logrando que en invierno se mantengan cálidos los espacios y en verano no exista un sobrecalentamiento en la edificación.

Actualmente los arquitectos buscan implementar sistemas pasivos que ayuden a mejorar el confort térmico de un espacio. Uno de los recursos que se utiliza para lograr una ventilación agradable en los espacios es el viento, ya que éste es un recurso natural, renovable y gratuito. Existen diferentes tipos de ventilación: Natural, cruzada e inducida, entre otras.

La ventilación cruzada, como lo dice Pereida (2018),

“(...) es cuando las aberturas en un determinado entorno o construcción se disponen en paredes opuestas o adyacentes, lo que permite la entrada y salida de aire. Indicada para edificios en zonas climáticas con temperaturas más altas, el sistema permite cambios constantes de aire dentro del edificio, renovándolo y, aun así, reduciendo considerablemente la temperatura interna”.

La ventilación Inducida es aquella donde se colocan aberturas a nivel del suelo para captar el aire frío, empujando el aire caliente hacia arriba y que este salga por una abertura en la parte superior de la edificación. Ya que “el aire caliente es más ligero que el aire frío, en este caso en un entorno externo o interno, el aire caliente sube y el aire frío baja” (Pereira, 2018).

En la Arquitectura, al aislante se le conoce como el impedimento del paso de calor o de frío. Principalmente el aislante suele ser un material que se utiliza al momento de construir una edificación, existen distintos tipos de aislantes dependiendo el material que se utilice y de la resistencia térmica que este tenga. Los más comunes son espuma de poliuretano, lana de vidrio, poliestireno expandido, poliestireno extruido, entre otros.

La orientación correcta en el diseño de una edificación es muy importante para la arquitectura bioclimática, ya que, al lograr la orientación adecuada, conforme a las

condiciones climáticas de un sitio, se logra obtener un confort térmico sin la necesidad de utilizar sistemas activos, obteniendo un ahorro energético.

El aprovechamiento solar en el hemisferio norte, debe hacerse orientando el edificio hacia el sur, mientras que, en el hemisferio sur, debe hacerse orientando a éste hacia el norte.

Dependiendo de cuanta energía solar se desea captar dentro de una edificación, se orientará a ésta de un punto cardinal a otro. Las ganancias solares en el hemisferio norte, por orientación, son:

- Sur: El Sol da todo el día en invierno, primavera y otoño. En verano sólo en las horas centrales del día, cuando da más calor.
- Sureste: En invierno da todo el día. El resto del año da hasta el mediodía.
- Este: Incide todo el año desde el amanecer hasta el mediodía.
- Noreste: En invierno no da. El resto del año hasta mediodía.
- Norte: el sol sólo dará en verano, en las primeras horas de la mañana y las últimas de la noche.
- Noroeste: En invierno no da. El resto del año, desde mediodía hasta el ocaso.
- Oeste: Incide todo el año desde el mediodía hasta el ocaso.
- Suroeste: En invierno todo el día. El resto del año, desde mediodía hasta el ocaso.

2.2. Estado del arte

El estado del arte hace referencia a los avances o conocimientos con respecto a un tema. Estos conocimientos se obtienen a través de diversas investigaciones, mostrando una recopilación de ideas, conceptos, opiniones y fuentes de información de tipo documental, que permita el estudio y la reflexión del conocimiento acumulado de un área específica (Molina, 2005).

El primer caso analizado en este trabajo, se desarrolló en Marmaris, Turquía (Tasdemiroglu, Ramos Berjano, & Tinaut, 1982), donde, desde 1977 se lleva a cabo un

estudio experimental con un muro Trombe en un laboratorio de aplicaciones térmicas de energía solar. En este estudio se crearon dos construcciones semejantes, una como referencia (Figura 3) y la otra para aplicar el sistema pasivo (Figura 2). Para la evaluación del comportamiento de estas dos construcciones, se llevó a cabo un levantamiento de datos de la incidencia de la radiación solar, de las temperaturas interiores y exteriores y de la convección del muro, en lapsos de media hora. Esto ayuda a conocer las fracciones solares transmitidas en el proceso de convección, radiación y termo-circulación.

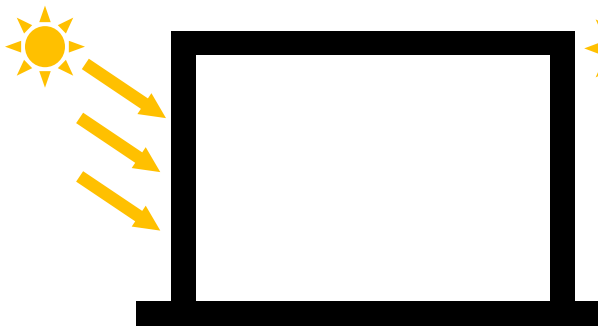


Figura 3. Construcción de referencia
Fuente: Elaboración propia.

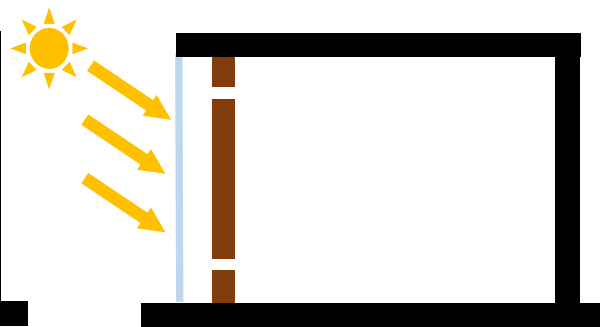


Figura 2. Construcción con sistema pasivo de acumulación.
Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados arrojados por el estudio de Tasdemiroglu, Ramos Berjano y Tinaut (1982), basado en los datos recabados, demuestra que el modelo experimental que tiene el muro Trombe en su fachada sur recibe en su interior de 15 a 35% de la radiación solar, mientras que el modelo de referencia solo transmite a su interior en la fachada sur de 8 a 21% de radiación. Esto nos dice que el muro Trombe puede lograr satisfacer la carga térmica total anual de casas, siempre y cuando se encuentren en la Costa del Mar Egeo.

Por otro lado, en Mexicali, Baja California, se realizó un estudio titulado *Desempeño térmico en variaciones de muro Trombe en clima cálido seco extremoso*, en el que se utilizó como caso de estudio un prototipo de vivienda de interés social que contaba con un área de 45.0 m² y un volumen de 121.2 m³.

En este caso, Luna et al. (2014) propusieron estudiar diferentes tipos de muro Trombe, estos fueron ubicados en la fachada sur de los prototipos, ya que es la

zona en la cual se recomienda colocar este tipo de sistemas pasivos de calentamiento en el hemisferio norte, debido a la obtención de mayor incidencia de radiación solar en el periodo frío del año.

Para la simulación térmica propusieron el programa *Design Builder*, con el cual desarrollaron un análisis de su comportamiento, costo y condiciones de confort térmico. De acuerdo con los autores ya mencionados (2014), "(...) el programa permite el análisis horario, mensual y anual de energía, emisiones de carbono, confort térmico, y, temperaturas máximas y mínimas de los espacios".

En la Tabla 1 y la Figura 4 se presentan las variaciones que se utilizaron en el estudio:

Tabla 1. Variaciones de funcionamiento estudiadas de un muro Trombe del autor Luna et al. (2014).

DESCRIPCIÓN DEL MURO TROMBE	ESTRATEGIA DE CLIMATIZACIÓN PASIVO
Tipo 1	Periodo frío
a) Con intercambio conductivo.	Calentamiento pasivo, a través de la masa térmica del muro.
b) Sin intercambio convectivo con el espacio interior y ambiente exterior.	Periodo cálido
c) Sin sombreado anual del vidrio.	<i>Día:</i> calentamiento pasivo, por no considerar sombreado del vidrio, consecuencia del arreglo diseñado para periodo frío.
	<i>Noche:</i> enfriamiento pasivo nocturno, con pérdidas de energía debido a la emisividad alta del vidrio y muro pintado de negro.
Tipo 2	Periodo frío
a) Con intercambio convectivo muro Trombe-espacio interior, en periodo frío.	<i>Día:</i> calentamiento pasivo por convección natural entre muro Trombe y espacio interior.
b) Sin sombreado anual del vidrio.	<i>Noche:</i> calentamiento pasivo por emisividad de la masa térmica del muro hacia el espacio interior.
	Periodo cálido

Día y noche: obstrucción de flujo convectivo de aberturas muro Trombe-espacio interior, para evitar sobrecalentamiento.

Tipo 3

- a) Sin intercambio convectivo con espacio interior.
- b) Con enfriamiento convectivo natural muro Trombe-ambiente exterior durante periodo cálido.
- c) Sin sombreado anual del vidrio.

Periodo frío

Día y noche: calentamiento pasivo, a través de la masa térmica del muro. Sin intercambio convectivo entre muro Trombe y ambiente exterior.

Periodo cálido

Día: calentamiento pasivo por la falta de sombreado.

Noche:

- a) Enfriamiento convectivo nocturno por diferencia de temperatura entre muro Trombe y ambiente exterior.
- b) Pérdidas de energía por emisividad alta de vidrio y masa térmica del muro pintado de negro.

Tipo 4

- a) Con intercambio convectivo muro Trombe- espacio interior en periodo frío.
- b) Con enfriamiento convectivo natural muro Trombe-ambiente exterior en periodo cálido.
- c) Sin sombreado anual del vidrio.

Periodo frío

Día: calentamiento pasivo por convección natural entre muro Trombe y espacio interior.

Noche: calentamiento pasivo por emisividad de la masa térmica del muro hacia el espacio interior.

Periodo cálido

Día: Calentamiento pasivo por radiación solar directa y diferencia de temperatura por la falta de sombreado.

Tipo 5

- a) Con intercambio convectivo muro Trombe-espacio interior en periodo frío.
- b) Con enfriamiento convectivo natural muro Trombe-ambiente exterior en periodo cálido.
- c) Con sombreado de vidrio sólo en periodo cálido.

Periodo cálido

Día: Calentamiento pasivo por diferencial de temperatura, sin radiación solar directa por sombre.

Noche:

- a) Enfriamiento convectivo nocturno por diferencia de temperatura entre muro Trombe y ambiente exterior.
- b) Pérdidas de energía por emisividad alta del vidrio y masa térmica del muro pintado de negro.

Fuente: (Luna León , Bojórquez Morales, Romero Moreno, Gallegos Ortega, & Corral Martínez, 2014).

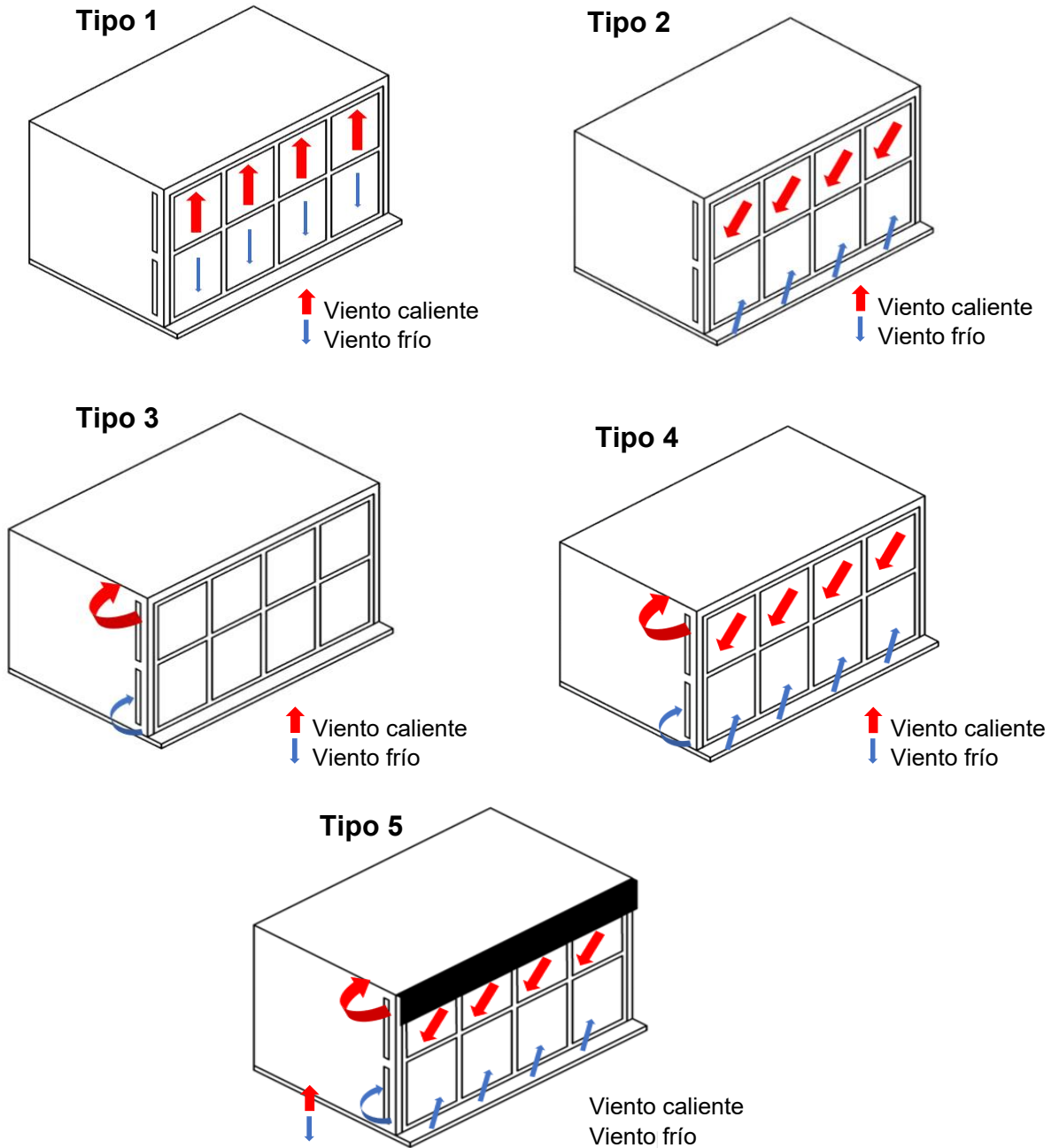


Figura 4. Variaciones de funcionamiento
Fuente: Elaboración propia basada en el autor Luna et al. (2014).

Los resultados y conclusiones que se obtuvieron fueron favorecedores ya que se logró incrementar el confort térmico utilizando estrategias de adecuación en este caso con el muro Trombe, en comparación con las viviendas que no implementan ninguna estrategia pasiva.

“El análisis por periodo muestra que la técnica de muro Trombe es 95.7 % efectiva en el periodo frío y 4.4 % en el cálido (...). Los resultados sobre costo de energía por climatización artificial muestran un potencial anual de ahorro de \$3 012.⁰⁰, comparado con la vivienda sin ninguna adecuación. En el periodo frío el ahorro es de \$1 027.⁰⁰, mientras que en el cálido es de \$1 984.⁰⁰“ (Luna León , Bojórquez Morales, Romero Moreno, Gallegos Ortega, & Corral Martínez, 2014).

Otro caso de estudio consultado en esta sección, fue el de una vivienda social en el norte de la zona metropolitana de la ciudad de México. Esta vivienda fue monitoreada por Rueda (2014) para llevar la relación de los datos recabados sobre temperatura del aire y humedad al interior. Además del monitoreo en sitio se generó un modelo de simulación en el programa de *Design Builder* para obtener el desempeño térmico y energético en el periodo de un año.

Para el estudio de la vivienda se tomó en cuenta el estudio de la temperatura, radiación solar, asoleamiento y algunos requerimientos bioclimáticos como: El diagrama bioclimático, triángulos de confort, diagrama psicométrico y días grado. En la investigación se realizó el monitoreo de 15 sensores que estaban instalados en la vivienda, los sensores mencionados eran de tipo *Data Loggers*.

Se implementó el uso de un muro Trombe en la vivienda de estudio, este se realizó basado en el documento *Thermal Storage Wall Design Manual* de Wilson (1979). Para el diseño del muro Trombe se utilizó un muro negro de concreto con un espesor de 150 mm y se utilizó una cámara de aire de 3 1/2 pulgadas entre el cristal y el muro masivo, además se implementó el uso de dos aberturas para el control del aire en ambos extremos del muro. Estas aberturas se programaron para abrirse durante los meses de invierno en las mañanas y estar cerrados durante el resto del año.

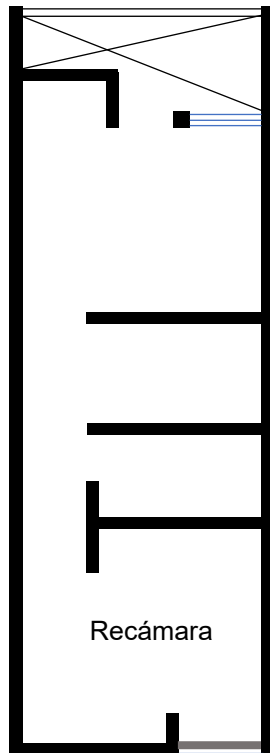


Figura 5. Vivienda de estudio.
Fuente: Elaboración propia basada en el autor Rueda, 2014.

Con la integración del muro Trombe se tuvo un aumento de temperatura entre 1.5 °C y 2.5 °C, este aumento gracias a este sistema es proporcional a la temperatura operativa. Esto indicó que se generó una mayor ganancia de temperatura gracias al sistema de muro Trombe que se implementó en esta vivienda social de estudio.

De acuerdo con Fernández-González (2007) quien realizó una investigación de 5 sistemas de adecuación pasivos, donde cada uno fue aplicado en un módulo experimental distinto: 1) Ganancia solar directa, 2) muro Trombe, 3) muro húmedo, 4) techo estanque e 5) invernadero. Su objetivo era buscar las barreras para obtener un adecuado confort térmico en un espacio donde se estudiarían los sistemas propuestos en un clima invernal severo como el de Muncie, Indiana.

Cada módulo experimental tuvo variaciones de temperatura durante el día, pero se llegó a la conclusión de que el mejor sistema de calentamiento propuesto es el muro Trombe, ya que este sistema es de ganancia directa, produciendo mayores cambios de temperatura, mientras que un sistema de ganancia indirecto solo produce cambios pequeños en la temperatura.

Capítulo III.

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

En este apartado se describen cada una de las consideraciones que permitieron desarrollar de forma sistemática la investigación, con el propósito de evidenciar una metodología estricta abordada y brindar la base para su reproducción en otras condiciones de estudio. Por lo anterior, este capítulo se presenta en cinco secciones: Caso de estudio, Periodos de evaluación, Variables e instrumentos de medición, Diseño y construcción de los módulos experimentales, y, Metodología abordada para el monitoreo y la evaluación de los muros Trombe.

3.1. Caso de estudio

La ciudad de Ensenada se encuentra en el noroeste de México, en la península de Baja California, y está localizada en las coordenadas geográficas siguientes: 31° 52'

latitud norte, 116° 37' longitud oeste y una altitud de 1 a 1 900 msnm (INEGI, 2009); además, Ensenada es una ciudad litoral ubicada sobre el Océano Pacífico.

El municipio en el que se encuentra, cuyo ostenta el mismo nombre, cuenta con dos tipos genéricos de climas: Los templados húmedos que se presentan en partes altas de la sierra y los secos que se localizan en el resto del territorio geográfico. El municipio presenta un clima árido donde la temperatura media anual es de 18 °C a 19 °C con temperaturas más altas, mayores a 30 °C en los meses de mayo a septiembre, y la más baja de 5 °C en enero. Otra característica de Ensenada es que las lluvias caen en invierno y no en verano como en el resto del país (Ayuntamiento de Ensenada, 2010) (Huerta Tapia, 2018).

Debido al clima y a los cambios de temperatura durante todo el año, donde predomina el frío por nueve meses del año, los usuarios implementan sistemas activos de calentamiento dentro de sus hogares, como calentones, principalmente, aunque también aires acondicionados, mini Split, multi Split, durante el periodo cálido (tres meses del año), que generan un consumo adicional de energía (eléctrica y de gas) para lograr obtener un confort térmico, lo que provoca un impacto negativo en la economía de los usuarios.

Actualmente, en la ciudad de Ensenada se puede encontrar que los sistemas constructivos más comunes en la construcción de viviendas o diversos tipos de edificaciones son los siguientes:

- Mampostería: Block común de concreto, mayormente utilizado, o, ladrillo, en algunas zonas periféricas de la ciudad.
- Steel framing: Comúnmente conocido como sistema de estructura ligera o estructura metálica.

El sistema de estructura ligera (steel framing) es el más utilizado actualmente por la mayoría de las constructoras en la ciudad, ya que se reduce el costo total de la obra, debido a que su colocación o instalación es fácil y rápida, logrando reducir costos en mano de obra y tiempo de ejecución. Además, los materiales que se necesitan para su ejecución son fáciles de encontrar en tiendas que se dedican a la venta de

materiales de construcción y se cuentan con diferentes tamaños y espesores de los materiales, según sea la necesidad del usuario. Entre otras, esta es una de las razones por la cual se construyeron de este sistema constructivo los módulos experimentales de esta investigación.

El suelo es un recurso natural compuesto de materia orgánica e inorgánica, es la capa más superficial de la corteza terrestre capaz de sostener vida vegetal natural y distintas actividades humanas. Ensenada cuentan con distintos tipos de suelo: Phaeozem, leptosol, fluvisol, regosol, cambisol y solonchak. De ellos, en esta investigación se estudió y evaluó el potencial térmico de únicamente tres, debido a que son los que mayor predominancia presentan en la superficie geográfica de la ciudad de Ensenada:

- Regosol: Se desarrolla sobre un manto de materiales sueltos, poco consolidados. Son suelos minerales muy poco evolucionados, sobre materiales no consolidados de textura no excesivamente arenosa (tipo Arenosoles).
- Cambisol: El suelo manifiesta cambios en profundidad, estos cambios logran evidenciar el contenido de arcilla, carbonatos y estructura respecto al sustrato. Esta caracterizado por tener una textura arenosa o más fina.
- Phaeozem: Suelos caracterizados por poseer un horizonte superficial oscuro por su elevado contenido en materia orgánica, confiriéndole una elevada estabilidad estructural, porosidad y fertilidad.

3.2. Periodos de evaluación

Considerando las diferentes etapas que conlleva una investigación de estas características se asignó un periodo de cuatro meses para llevar a cabo la interpretación documental de la tesis, donde se trabajó en el planteamiento de la investigación, marco teórico, estado del arte y antecedentes. Asimismo, en las gestiones administrativas para la construcción y adquisición de los módulos experimentales.

Así como también se requirió de tres meses para el monitoreo, el registro y la evaluación propiamente de los módulos experimentales. Además, de dos meses para la interpretación de las condiciones higrotérmicas al interior de los módulos experimentales, el procesamiento de datos, la interpretación de resultados, las conclusiones y la formalización de la investigación.

Por estas razones, los módulos experimentales solo se evaluaron en un periodo de tres meses, siendo en este caso los meses de diciembre, enero y febrero (ver Figura 6), debido a que es el periodo frío (invierno), en el cual se requiere la mayor cantidad de calentamiento pasivo para contribuir a las condiciones de confortabilidad en los espacios.

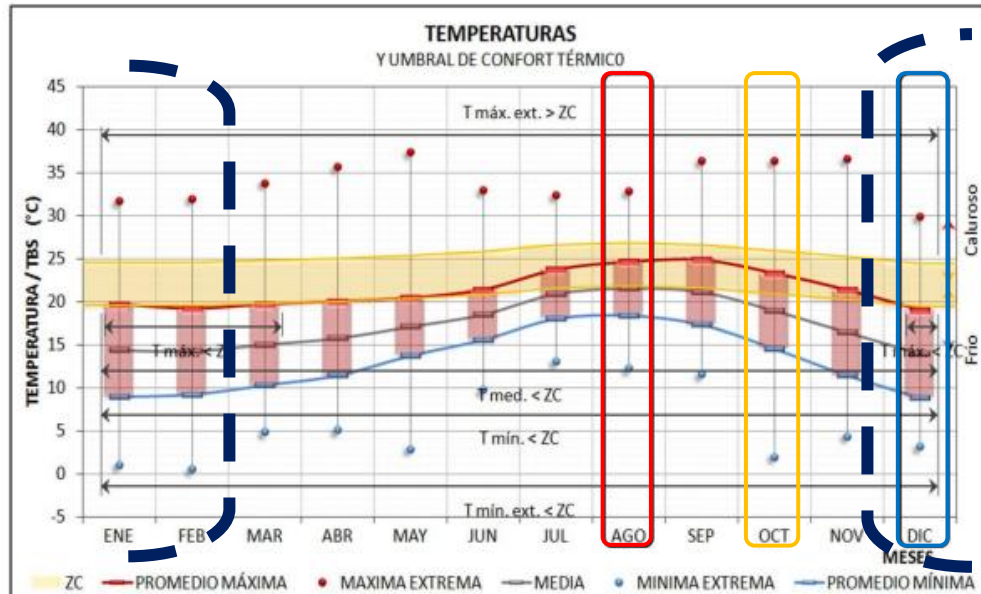


Figura 6. Temperaturas promedio a lo largo de un año normalizado en Ensenada.

Fuente: Huerta Tapia (2018).

Por lo que sería altamente sugerible que dicho monitoreo y estudio se lleve a cabo de manera independiente a la presentación de esta tesis, ya sea con una tesis adicional o, en su caso, como parte del proyecto de investigación que el director del presente documento está llevando a cabo.

3.3. Variables e instrumentos de medición

A continuación, se presenta de manera detallada las consideraciones atendidas para la elección de las variables ambientales y los instrumentos de medición que fueron empleados en el desarrollo de esta investigación. La elección de los instrumentos de medición se basó, por un lado, en las variables ambientales registradas, y, por otro lado, en las especificaciones de las normativas como la ISO 7726 (1998) y la ANSI/ASHRAE 41.1 (1986).

3.3.1. Variables ambientales

Para alcanzar los objetivos de la presente investigación, las variables ambientales que fueron monitoreadas y analizadas durante el periodo de evaluación de los módulos experimentales de muro Trombe, fueron:

- Temperatura del aire y humedad relativa al exterior de los módulos (el sensor se ubicó en un espacio próximo al emplazamiento de los módulos experimentales, con el fin de monitorear las diferencias higrotérmicas entre exterior-interior de cada módulo experimental); y,
- Temperatura del aire y humedad relativa al interior de los módulos (el sensor se ubicó en el centro geométrico de cada uno de los cubos);

Sin embargo, como referentes complementarios al objetivo de esta investigación, simultáneamente se monitorearon las variables ambientales siguientes:

- Temperatura del aire y humedad relativa en la cámara de aire del muro Trombe (el sensor se ubicó en el centro geométrico de la cámara de aire); y,
- Temperatura superficial de la masa térmica del muro Trombe (únicamente la cara que da al exterior, pues la medición de la cara interior no se llevó a cabo debido a la falta de accesibilidad).

3.3.2. Instrumentos de medición

La elección de los instrumentos de medición fue definida de acuerdo con los resultados esperados, el impacto y los alcances que se buscaban obtener durante el monitoreo, además de considerar el diseño y las características de los módulos experimentales de muro Trombe. También hubo otros aspectos que fueron contemplados al definir los instrumentos a utilizar, como:

1. *Variables ambientales:* Las temperaturas y las humedades relativas, tanto del exterior y del interior de los módulos, así como las de la cámara de aire del muro Trombe, fueron las variables que determinaron el tipo de instrumental a utilizar para la medición de las condiciones del aire; adicionalmente, dado que también fue monitoreada la temperatura superficial de la masa térmica, se tomó como base esta variable para seleccionar un instrumento adicional que permitiera la lectura periódica de ésta.
2. *Rango de medición:* De acuerdo con el análisis climático de la ciudad de Ensenada realizado por Huerta Tapia (2018, pág. 33), se puede observar que se presentó en el periodo de análisis (2000-2017) un registro de temperaturas máximas y mínimas anuales de 37.3 °C y 0.5 °C, respectivamente. Además, de un promedio anual máximo de 89.8% y un mínimo de 55.6 % de humedad relativa. Con lo anterior, se tomaron en cuenta algunas especificaciones técnicas en la selección de los instrumentos de medición, como que tuviesen, como mínimo, un intervalo de 0.0 °C a 50.0 °C para la temperatura y uno de 0.0 % a 100.0 % para la humedad relativa.
3. *Precisión de lectura:* De acuerdo con la ISO 7726 (1998, pág. 4), uno de los factores a considerar en la medición de las variables ambientales del entorno físico a estudiar es la precisión con la que los instrumentos de medición emiten las lecturas. En este sentido, considerando que los módulos experimentales estarán expuestos las 24 horas a lo largo del

periodo de evaluación mencionado en los párrafos anteriores, se puede advertir que las diferencias térmicas interiores-exteriores pueden variar gradualmente entre el momento más frío y el momento más cálido de un día normalizado, por lo que se determinó emplear instrumentos de ± 2 unidades de precisión en el registro de lecturas, tanto de temperaturas como de humedades relativas y velocidad del viento.

4. *Intervalo de operación:* A partir de algunas normativas consultadas (ISO 7726, 1998, pág. 4) fue posible identificar que esta característica es de las más importantes en la selección de instrumentos de medición. Por lo anterior se consideró esta variable para definir los instrumentos a utilizar, considerando que ellos contaran con un intervalo de operación superior a las condiciones descritas en el punto 2, tanto en lo que se refiere a la temperatura como en la humedad relativa del ambiente.
5. *Presentación digital de lecturas:* Se atendió este criterio en la selección de instrumentos de medición puesto que con ello se merizó significativamente el error humano al recabar los datos a partir de dígitos dados por el instrumento empleado y no, a partir de una posible lectura análoga malinterpretada por el usuario, por cansancio, falta de tiempo o simplemente porque visualmente no alcanzaba a distinguir la lectura; es por ello que el error humano se evitó, en la medida de lo posible, al emplear instrumentación que en todo momento proporcionaron lecturas digitales.
6. *Capacidad en el guardado de registros:* Dado que los instrumentos de medición operaron a lo largo de todo el periodo de evaluación, tanto al interior como al exterior de los módulos experimentales, se tomó la decisión de utilizar aquellos cuyo guardado fuera automático y periódico a lo largo de los periodos requeridos, por lo que se consiguieron instrumentos cuya capacidad en el guardado de las lecturas fuera suficiente respecto a la frecuencia y el periodo programados. Con frecuencia se refiere a cada cuánto tiempo deben guardarse las lecturas, y, por periodo a cuánto tiempo deben guardarse las mismas

antes de apagar o retirar el instrumento de medición (Rincón Martínez, 2015).

7. *Disponibilidad y accesibilidad:* Por disponibilidad se entendió que los instrumentos de medición se encontraran en *stock* durante el periodo requerido en alguno de los laboratorios de los diferentes programas educativos de la Facultad; paralelamente, por accesibilidad se entendió a la posibilidad de utilizarlos libremente durante el periodo requerido. Con lo anterior, los instrumentos seleccionados para el monitoreo de las variables ambientales, atendieron estas características. Además, se tomó la precaución de que dichos instrumentos contarán con los manuales de uso con el fin de adquirir el conocimiento previo para el manejo correcto de éstos.
8. *Complejidad de operación:* Los instrumentos de medición seleccionados fueron sencillos de utilizar; no fue necesario llevar a cabo una capacitación específica de operación, basta con dar una lectura general a los instructivos o manuales de operación de cada instrumento para poder hacer uso de los mismos.
9. *Seguridad de los instrumentos:* Dada la característica de los módulos experimentales de permanecer en todo momento expuestos al exterior durante su evaluación (y, en consecuencia, en posible contacto con personal ajeno a la investigación), la seguridad de los instrumentos (y de los módulos experimentales) fue prioritaria, por lo que los que monitorearon las condiciones interiores se fijaron de forma permanente, mientras que los que monitorearon las condiciones exteriores se camuflajearon en el entorno de evaluación, atendiendo que sus mediciones no fueran afectadas por algún elemento que pervirtiera la lectura de las condiciones reales del entorno.

Por ello, los instrumentos de medición física empleados en el monitoreo de las variables, fueron:

- Para toma de lectura en exteriores:
 - Un registrador de datos (mca. Elitech, mod. RC-51H) (Figura 9)
- Para toma de lectura en la cámara de aire del muro Trombe:
 - Un registrador de datos (DataLogger mca. AZ Instrument Corp., mod. 88395) (Figura 10)
 - Un medidor de clima (mca. Elitech, mod. RC-51H) (Figura 9)
 - Una cámara de imagen térmica (mca. Hti, mod. HT-02) (Figura 7)
- Para toma de lectura en la masa térmica del muro Trombe:
 - Un termómetro infrarrojo manual (mca. INLIFE, mod. CW364) (Figura 8)
 - Una cámara de imagen térmica (mca. Hti, mod. HT-02) (Figura 7)
 - Una sonda de contacto (DataLogger mca. AZ Instrument Corp., mod. 88395) (Figura 10)
- Para toma de lectura en interiores:
 - Un medidor de clima (mca. Elitech, mod. RC-51H) (Figura 9)

En este sentido, la frecuencia con la que se registraron las variables higrotérmicas en el exterior, la cámara de aire y el interior de los módulos experimentales fue de cada 10 minutos. Para ello, los instrumentos fueron personalizados para trabajar de esa manera durante todo el periodo de evaluación de la presente investigación. Por otro lado, la temperatura del núcleo de la masa térmica se recabó por medio de una sonda de contacto en periodos de cada 10 minutos, en un día normalizado.

3.3.2.1. Especificaciones técnicas de los instrumentos de medición

Según la ANSI/ASHRAE 41.1 (1986, pág. 2), la *precisión* en las lecturas de variables ambientales, es la cercanía entre medidas repetidas de la misma cantidad física, por el mismo método, bajo las mismas condiciones y con el mismo instrumento.

Además, la misma norma menciona que la *sensibilidad* es la relación entre un cambio observado en la posición de un instrumento y la magnitud del cambio en la cantidad de medida requerida para producir esa reacción del indicador. Esta puede

ser expresada como una relación numérica solo si se indican las unidades de medida de ambas cantidades.

De acuerdo con la ISO 7726 (1998) los instrumentos de medición utilizados en el monitoreo de las variables ambientales en los estudios en donde éstas intervienen, deben de atender diferentes características técnicas en cuanto al rango de medición, la precisión y los tiempos de respuesta de los sensores que contienen. Esto, de acuerdo con los datos técnicos de fabricación a fin de especificar características exactas. Por lo tanto, a continuación, se describen las características técnicas de cada uno de los instrumentos mencionados en los párrafos anteriores, obtenidas del manual de usuario publicado por el fabricante.

Cámara de imagen térmica HT-02

La cámara de imagen térmica (mca. HTI, mod. HT-02) es un instrumento que combina las funciones de medición de temperatura de superficie e imagen térmica en tiempo real, además puede convertir la imagen térmica en una imagen visual y éstas pueden ser almacenadas en una PC (Figura 7). La Tabla 2 lista los sensores que trae incluidos, así como las especificaciones técnicas de cada uno de ellos.



Figura 7. Cámara de imagen térmica.
Fuente: HTI (2020).

Tabla 2. Especificaciones técnicas de las variables que registra la cámara de imagen térmica HTI

SENSOR	PRECISIÓN	RESOLUCIÓN	RANGO DE MEDICIÓN
Temperatura	$\pm 2\%$ o $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$	0.15 $^\circ\text{C}$	-20 a +300 $^\circ\text{C}$
Emisividad	0.15 unidades	N/A	Ajustable de 0.1 a 1.0
Longitud de onda	N/A	N/A	8 a 14 μm

*N/A: No aplica

Fuente: HTI (2020).

Termómetro infrarrojo CW364

El termómetro infrarrojo (mca. INLIFE, mod. CW364) es un instrumento de medición que adopta la tecnología láser para registrar lecturas de temperatura a distancia sin necesidad de tener contacto con la superficie de algún elemento. Este termómetro puede medir la temperatura de un objeto a diferentes distancias, sin embargo, el fabricante sugiere un promedio de 360 mm para obtener mayor precisión (Figura 8). La Tabla 3 lista las diferentes variables ambientales que este instrumento permite registrar con los sensores que trae incluidos, así mismo, muestra las especificaciones técnicas de cada una de ellas.



Figura 8. Termómetro infrarrojo.
Fuente: INLIFE (2020).

Tabla 3. Especificaciones técnicas de las variables ambientales que registra el termómetro infrarrojo CW364

SENSOR	PRECISIÓN	RESOLUCIÓN	RANGO DE MEDICIÓN
Temperatura	± 2 °C (en lecturas menores a 100 °C)	0.55 °C	-50 a 550 °C
Emisividad	N/A	N/A	Ajustable de 0.1 a 1.0

*N/A: No aplica

Fuente: INLIFE (2020).

Data Logger Elitech RC-51H

El data logger (mca. Elitech, mod. RC-51H) es un instrumento de medición que registra lecturas de temperatura de bulbo seco y humedad relativa (Figura 9). Este instrumento puede almacenar hasta 32 000 datos con frecuencias desde un segundo hasta cada hora; estas lecturas pueden ser descargadas en la PC. La Tabla 4 lista las diferentes variables ambientales que este instrumento permite registrar con los sensores que trae incluidos, así mismo, muestra las especificaciones técnicas de cada una de ellas.



Figura 9. Data Logger Elitech RC-51H.
Fuente: ELITECH (2022).

Tabla 4. Especificaciones técnicas de las variables ambientales que registra el data logger RC-51H

SENSOR	PRECISIÓN	RESOLUCIÓN	RANGO DE MEDICIÓN
Temperatura	$\pm 0.5(-20^{\circ}\text{C}/+40^{\circ}\text{C})$; $\pm 1.0(\text{other range})$	0.1 $^{\circ}\text{C}$	-30 a 70 $^{\circ}\text{C}$
Humedad Relativa	$\pm 3\% \text{RH}$ (25 $^{\circ}\text{C}$, 20%~90%RH), $\pm 5\% \text{RH}$ (other range)	0.1 %RH	10%~95%

Fuente: ELITECH (2022).

Registrador de datos (DataLogger) 88395

El registrador de datos *DataLogger* (mca. AZ Instrument Corp; mod. 88395) es un dispositivo que toma lecturas de temperatura de bulbo seco, humedad relativa y temperatura de contacto; el data logger puede llegar a registrar hasta 15,999 mediciones (5,333*3). Además, cuenta con un canal para alojar una sonda de temperatura de contacto, el dispositivo utiliza una interfaz de USB para el guardado y lectura de datos por computadora (Figura 10). La Tabla 5 lista las diferentes variables ambientales que este instrumento permite registrar con los sensores que trae incluidos, así mismo, muestra las especificaciones técnicas de cada una de ellas.

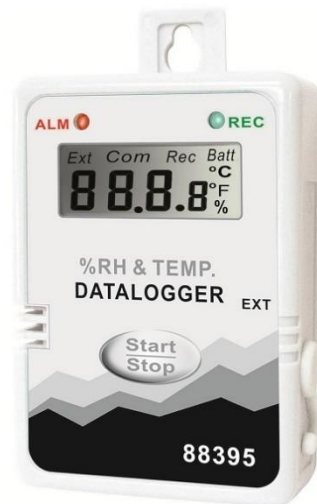


Figura 10. Registrador de datos.
Fuente: AZ Instrument Corp. (2022).

Tabla 5. Especificaciones técnicas de las variables ambientales que registra el DataLogger 88395

SENSOR	PRECISIÓN	RESOLUCIÓN	RANGO DE MEDICIÓN
Temperatura	± 0.6 (-20 a 50 °C), otros ± 1.2 °C	0.1 °C, 0.1°F	-40~85 °C
Humedad Relativa	± 3% RH (a 25°C 10~90% RH, otros ± 5% RH)	0.1% RH	0 a 100% RH
Canal de entrada	± 0.6 (-20 a 50 °C), otros ± 1.2 °C	0.1 °C, 0.1°F	-40~100 °C

Fuente: AZ Instrument Corp. (2022).

3.4. Diseño y construcción de los módulos experimentales

En este apartado se describen las consideraciones que fueron atendidas en el diseño de los módulos experimentales, en particular, las relacionadas con la modulación espacial tipo para implementar en un elemento vertical los diferentes tipos de suelo mencionados en apartados anteriores, cuyo objetivo es evaluar su eficiencia térmica para condicionar espacios interiores. Así mismo, se expone el proceso de construcción empleado para la fabricación de éstos, particularmente, la etapa de ejecución, desde la conformación de los módulos hasta la construcción del muro de tierra a partir de la técnica de tapial.

3.4.1. Diseño

La concepción de los módulos experimentales estuvo estrechamente vinculada con el objetivo general de esta investigación (*ver pág. 8*), que a la letra dice:

Diseñar y evaluar el desempeño térmico de tres muros Trombe dispuestos en la cara sur de distintos módulos experimentales, a partir del empleo en su masa térmica de los tres tipos de suelos representativos en la ciudad de Ensenada: Cambisol, regosol y phaeozem (...).

Por lo anterior, en principio, fue necesario definir con precisión el sistema constructivo de cada módulo experimental. Para ello, y con el objetivo de simular las condiciones habitables de la construcción contemporánea en la ciudad, a partir de un análisis general, se definió que el sistema constructivo predominante en las

construcciones recientes en Ensenada, por su rapidez de ejecución y ventajas económicas, es el Steel framing. En este sentido, y con base en el presupuesto del que derivó la construcción de éstos, se definió como mejor opción constructiva el empleo de este sistema.

Con ello se definieron, en principio, las dimensiones modulares de los cubos experimentales, así como la portabilidad de cada uno de ellos, quedando en 1.20 x 1.20 x 1.20 m para evitar desperdicio, según las dimensiones de las hojas de yeso y tabla-cemento empleados (Figura 11).

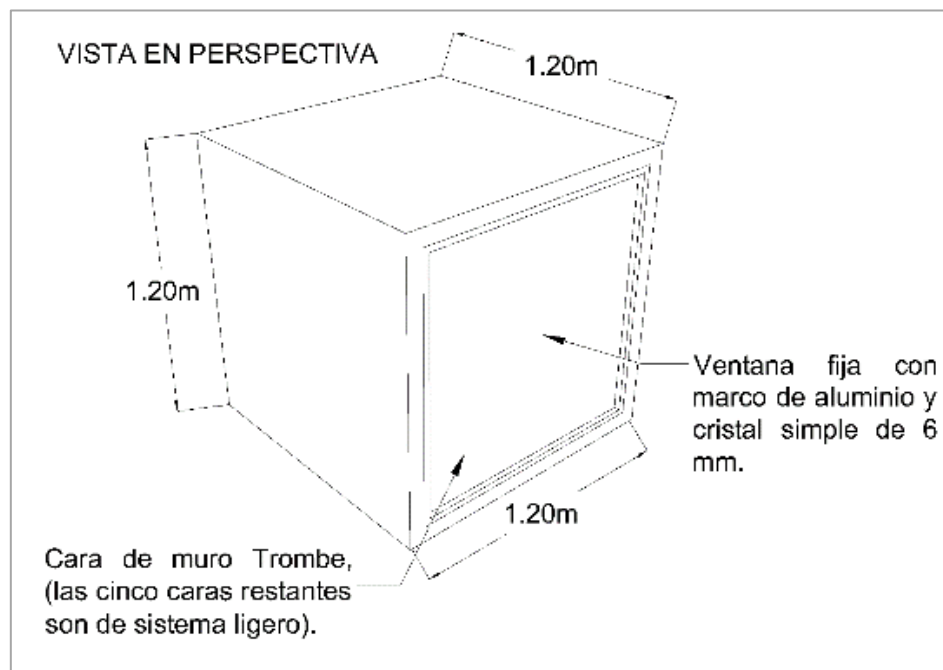


Figura 11. Dimensionamiento del prototipo de módulo experimental.

Fuente: Elaboración propia.

El sistema constructivo del que se conformaron cinco de las seis caras del cubo con esta especificación es el siguiente: De exterior a interior, se conformó de un recubrimiento de cement-bond, una placa de cemento (1/2"), un bastidor de metal (1 5/8", calibre 25) acompañado de aislante térmico R-9 (de fibra de vidrio con aluminio), una placa de yeso (1/2") y un recubrimiento uniforme de redimix blanco (Figura 12).

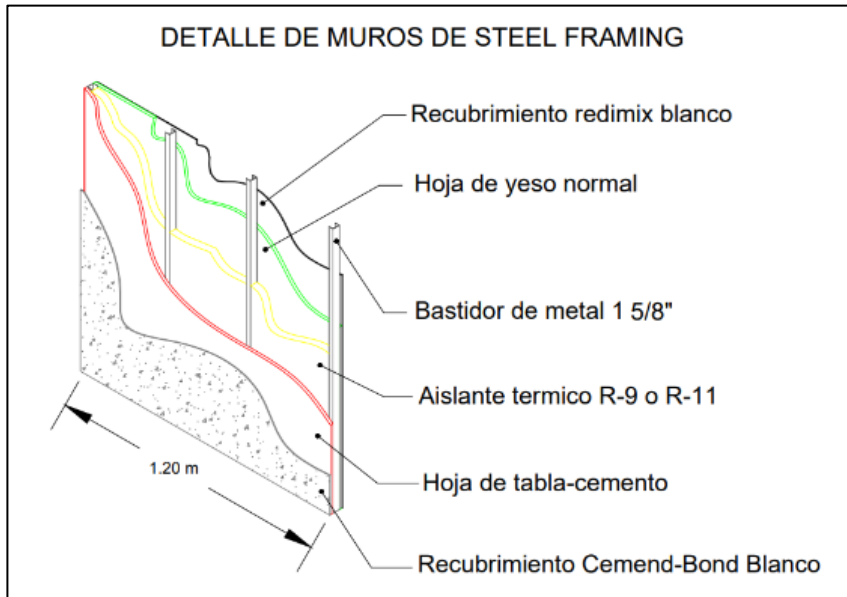


Figura 12. Detalle de muros de steel framing.
Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la sexta cara midió 1.05 x 1.05 x 0.35 m (medidas ajustadas a los paños interiores del módulo) y estuvo conformada de un muro Trombe constituido, de exterior a interior, por una ventana fija con marco de aluminio y cristal simple de 6 mm, una cámara de aire de 0.12 m y un muro de tierra amasada de 0.22 m (mezclada con cemento gris al 10 % de su volumen) hecho a partir de la técnica de tapial (un tipo de suelo por cada módulo: regosol, cambisol y phaeozem) con un alma de acero (malla electro soldada 6-6/10-10) y dos perforaciones superiores y dos inferiores de 2" a base de acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) (que permitan la comunicación entre la cámara de aire y el interior del módulo) (Figura 14). Para efectos de mantenimiento, la cubierta contó con la posibilidad de desmontarse.

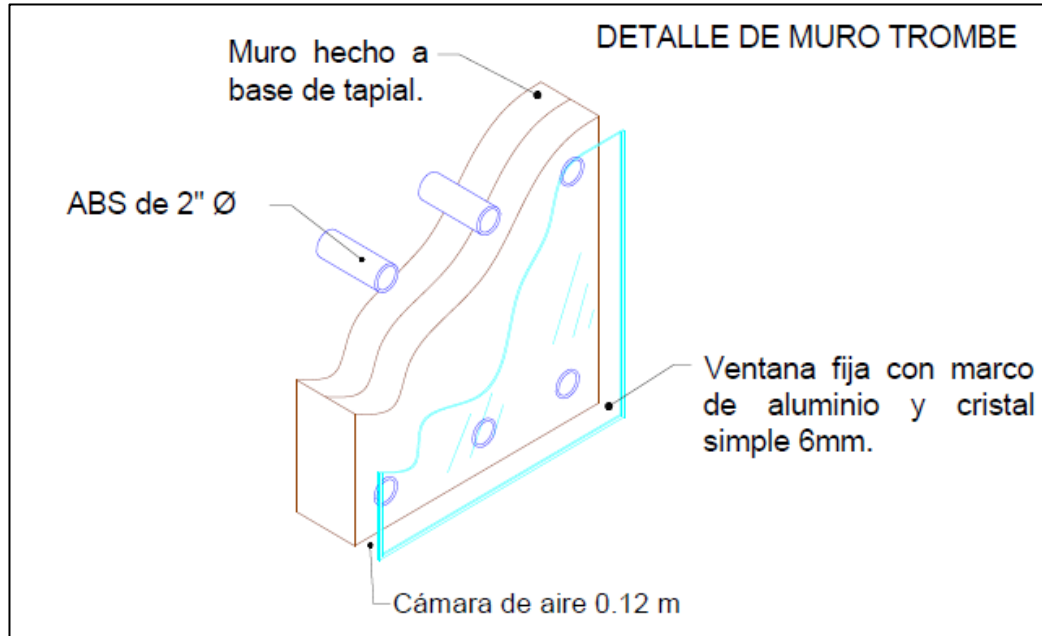


Figura 13. Detalle de muro Trombe.
Fuente: Elaboración propia.

Para mayor detalle de lo anteriormente expuesto, a continuación, se presenta un apunte isométrico (Figura 14), el alzado lateral (Figura 15) y la planta (Figura 16) de la conformación de cada módulo experimental.

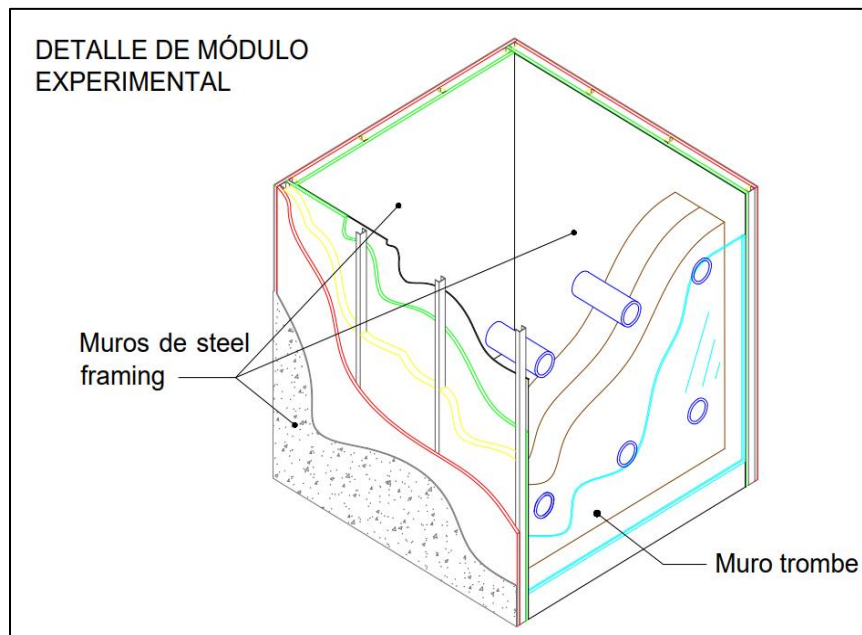


Figura 14. Apunte isométrico.
Fuente: Elaboración propia.

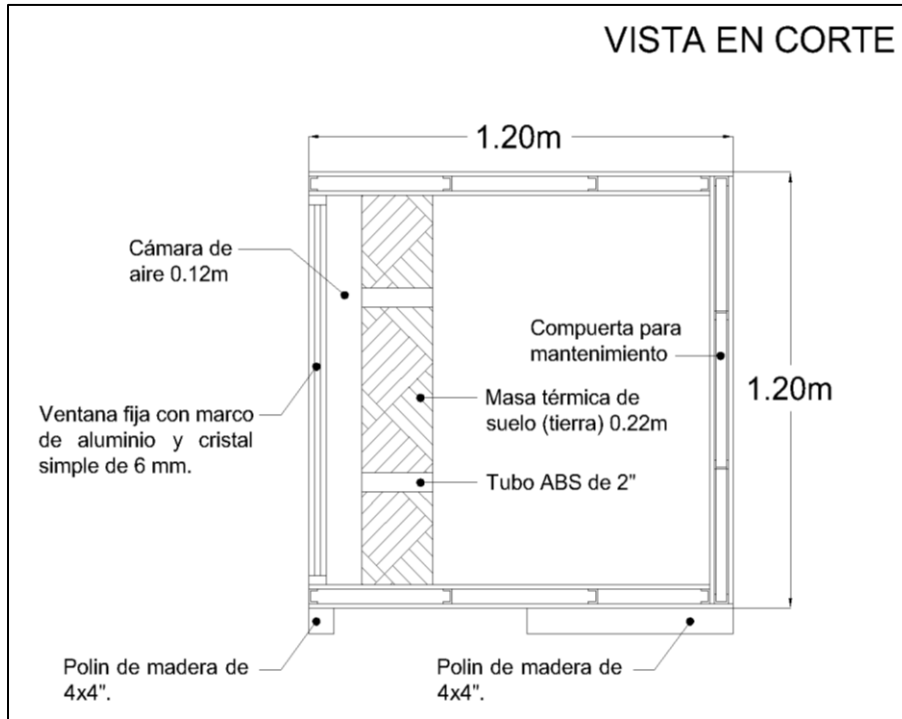


Figura 15. Vista en alzado de módulo experimental.
Fuente: Elaboración propia.

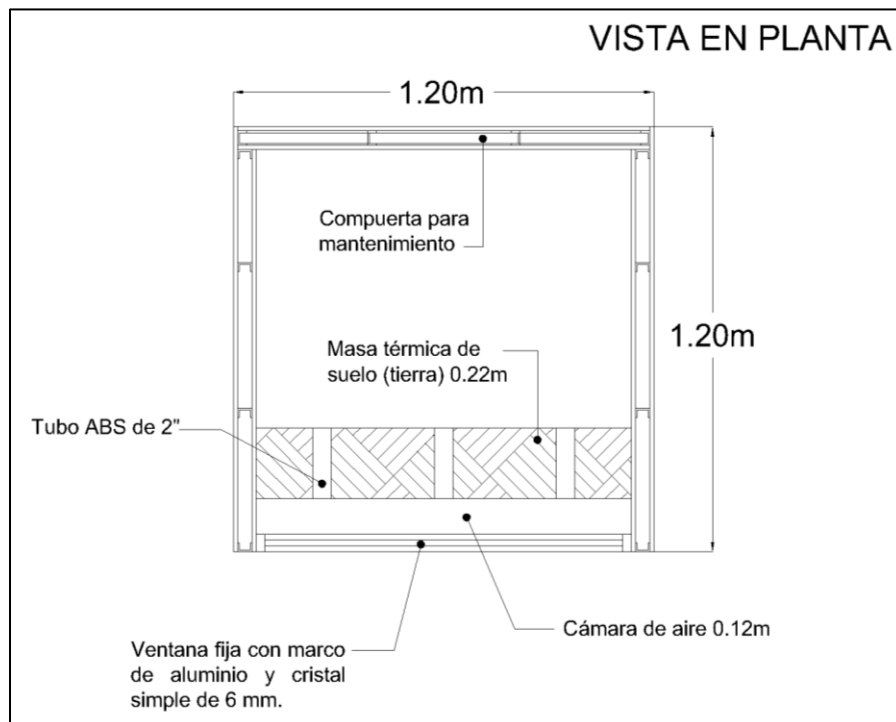


Figura 16. Vista en planta de módulo experimental.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Construcción


Para la construcción de los 3 módulos experimentales fue necesario dividir el proceso en diferentes etapas, ya que los prototipos debían ser herméticos y tener el mismo sistema constructivo en cada una de sus caras, salvo en la sur en la que se estaría implementando el sistema constructivo del muro Trombe, en el cual se integrarían los 3 sustratos de estudio.

3.4.2.1. Prefabricación del módulo experimental

Con base en el diseño propuesto para los módulos experimentales (*ver 3.4.1Diseño, pág. 38*), la prefabricación de los 3 prototipos se llevó a cabo a partir de la búsqueda y contratación de una empresa que realizó una cotización inicial por un monto próximo a \$24,000.00, no obstante a la conclusión de los trabajos, el gasto ascendió a \$34,000.00 aproximadamente, esto seguido de la prestación de los servicios para la elaboración de estos, en un periodo de 2 meses.

El primer paso de la prefabricación consistió en adquirir los distintos materiales para la conformación de la estructura metálica, los cuales se enlistan a continuación:

Tabla 6. Materiales empleados en la ejecución de los módulos experimentales.

MATERIAL	ESPECIFICACIONES	REPRESENTACIÓN GRÁFICA
Panel de Durock	9 hojas de tablamento con dimensiones de 4x8' y espesor de 1/2" marca Durock.	

Aislante térmico 2 rollos de aislante térmico R-11 a base de fibra de vidrio marca CertainTeed de 16"x96', con 11.89 m².



Panel de yeso 9 hojas de yeso con dimensiones de 4x8' y espesor de 1/2" marca Panel Rey.

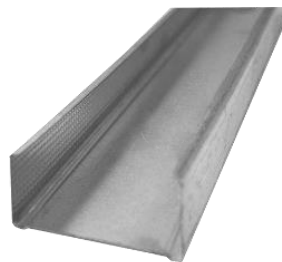


Poste metálico 18 postes de acero galvanizado de 1 5/8" x10' calibre 25.



1

Canal metálico 9 canales de acero galvanizado de 1 5/8" x10' calibre 25.



2

¹ <https://www.e-proconsa.com/product-page/poste-galvanizado-1-5-8-x-10-cal-25>
² <https://www.e-proconsa.com/product-page/canal-galvanizado-1-5-8-x-10-cal-20>

Chilillo mosquita 500 chilillos mosquita
½ cruz para poste y canal de acero galvanizado.



Chilillo punta de broca 500 chilillos punta de broca para hoja de tablamento o tablaroca.



3

Esquinero 12 esquineros vinílicos para tablaroca color blanco de 3.05 m aproximadamente.



Ready mix o unimax 1 caja de pasta resanadora marca Panel Rey especial para acabados finos en interiores con una cantidad de 21.3 kg.



³ <https://n9.cl/64tdn>

Cement Bond o 1 saco de cemento basecoat especial para acabados finos en hojas de tablacemento para exteriores, resistente al rayado y a la absorción del agua con una cantidad de 22.7 kg.



4

Barrotes 6 barrotes de pino con dimensiones de 2x4"x8'



5

Barrotes 6 barrotes de pino con dimensiones de 4x4"x8'



6

Triplay 2 triplay de madera cero caras con espesor de 3/4 y dimensiones de 4x8'



7

⁴ <https://distribuidorpanelrey.com/producto/base-coat-protekto-plus/>

⁵ <https://www.homedepot.com.mx/materiales-de-construccion/madera-dimensionada/polines-y-vigas/barrote-1-1-2-x-3-1-2-x-8-seco-al-aire-211898>

⁶ <https://www.homedepot.com.mx/materiales-de-construccion/madera-dimensionada/polines-y-vigas/polin-cimbra-3-x-3-x-8-seco-al-aire-103996>

⁷ <https://www.construrama.com/lomas/catalogo/materiales-de-construccion/cimbra/desmoldante/triplay-34-pieza/p/0303010007>

Alambre recocido 3 kilos de alambre recocido (con alta resistencia a la tensión) calibre 16, utilizado comúnmente para armados y amarres.

8



Chilillos 3 kilos de chilillos de 4" para madera.

9



Desmoldante base de agua a 1 cubeta de 19 litros de desmoldante para cimbra de madera a base de agua.



Tubo ABS 1.5 tramos de tubería ABS (Acrilonitrilo-butadieno-estireno) de 2" Ø por 3 metros de largo, cortado en 18 tramos de 19 cm.



⁸ <https://www.casadelacero.com/alambre-recocido-en-tijuana/>

⁹ <https://www.amazon.com/-/es/Tornillos-pulgadas-Tornillo-Phillips-tornillo/dp/B0846WXCB3>

Cemento	2 sacos de cemento marca Gallo (Cemex) de 50kg.		10
Arena	1 cubeta de arena para construcción, con un volumen de 19 litros.		11
Agua	Agua cruda.		12
Poliuretano expandible	2 latas de espuma expandible multiusos de 750 ml marca Truper.		13

¹⁰ <https://n9.cl/w5i0q>
¹¹ <https://www.centraldecompras.mx/producto/arena/>
¹² <https://n9.cl/myeve>
¹³ <https://n9.cl/6x8tg>

Cristal 3 cristales simples de 6 mm de espesor y dimensiones de 1.00x1.00 metros aproximadamente.

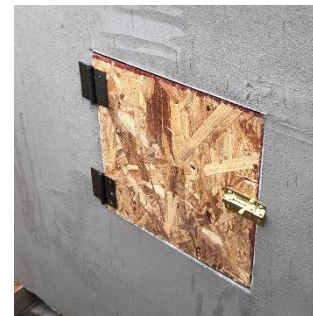


Marcos de aluminio 3 marcos de aluminio natural de 1 ¼" con dimensiones próximas a 1.06x1.06 m.



14

Triplay (puertas) 3 cortes de triplay de madera comprimida de ¾" con dimensiones de +/- 0.30x0.30 m aproximadamente.



Bisagras 6 bisagras cuadradas de 3" para puerta marca Hermex.



15

Pasador de latón 3 pasadores de latón color dorado para puerta marca Hermex de 51mm.



16

¹⁴ <https://n9.cl/1f6vc>

¹⁵ <https://mundotool.com/products/bisagra-cuadrada-2-antiguo-plana-hermex-43249>

¹⁶ <http://tiendaonline.ferrehogar.com.mx/varios/43724-pasador-de-latn-2-cod-43724-pieza-hermex.html>

Tres Tipos de sustratos 1 m³ por cada sustrato aproximadamente, sustratos: Regosol, cambisol y phaeozem.



Fuente: Elaboración propia.

Con lo anterior, la configuración del bastidor metálico quedó conformado por el machimbrado de los postes y canales metálicos de acero galvanizado los cuales fueron recortados y unidos (chilillos mosquita) de forma precisa según lo indicado en el diseño. En este sentido, para garantizar la apropiada bajada de cargas, los elementos verticales estuvieron conformados por los postes metálicos (dispuestos a cada 40cm de separación en cada cara), mientras que, para garantizar la rigidez de los marcos los elementos horizontales se constituyeron por los canales de acero (Figura 17).



Figura 17. Armado de estructura a base de postes y canales metálicos.
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se llevó a cabo el montaje de los paneles de yeso ubicados en los paños interiores de los módulos (Figura 19); seguido de la instalación de la fibra de vidrio como aislamiento térmico (Figura 18Figura 18. Instalación de fibra de vidrio.); y, por

último, el montaje de los paneles de cemento en los paños exteriores de los módulos (Figura 20).



Figura 19. Instalación de panel de yeso.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 18. Instalación de fibra de vidrio.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 20. Instalación de paneles de cemento.
Fuente: Elaboración propia.

Es importante precisar que, para favorecer la manipulación de los sensores de medición en la fachada norte de los módulos experimentales se habilitó una compuerta cuadrada de 0.30 x 0.30 m, la cual, para evitar la presencia de puentes o infiltraciones térmicas, se constituyó de madera por la parte exterior y poliestireno de 1" en el interior (Figura 22). Así mismo, con el fin de contribuir a su adecuado acoplamiento con los muros de tierra apisonada construidos simultáneamente en el sitio, en la cara inferior de cada módulo (piso) se acondicionó un vano de 0.23 x 1.06 m (Figura 21).



Figura 22. Compuerta cuadrada de madera y poliestireno.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 21. Vano en la parte inferior del módulo.
Fuente: Elaboración propia.

Para concluir este proceso de prefabricación previo al traslado de los módulos al sitio, se aplicó el acabado final interior a partir de una pasta que permitiera lograr un aplanado fino con resanador marca redimix (Figura 23).



Figura 23. Acabado final interior.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.2. Mapeo edafológico para identificar los sitios de extracción de los sustratos

Con apoyo del mapa digital¹⁷ disponible en la plataforma virtual del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2022), se identificaron probables puntos geográficos que formaban parte de cada uno de los estratos de estudio. Lo anterior, con el fin de estar en condiciones de extraer el volumen requerido de material para la construcción de los muros tapial. De esta manera, los sitios desde los cuales se obtuvo el material se encuentran representados en el mapa siguiente (ver Figura 24):

¹⁷ <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF00jMxLjgwNTE2LjY0NDh06OCxsOmM0MTY=>

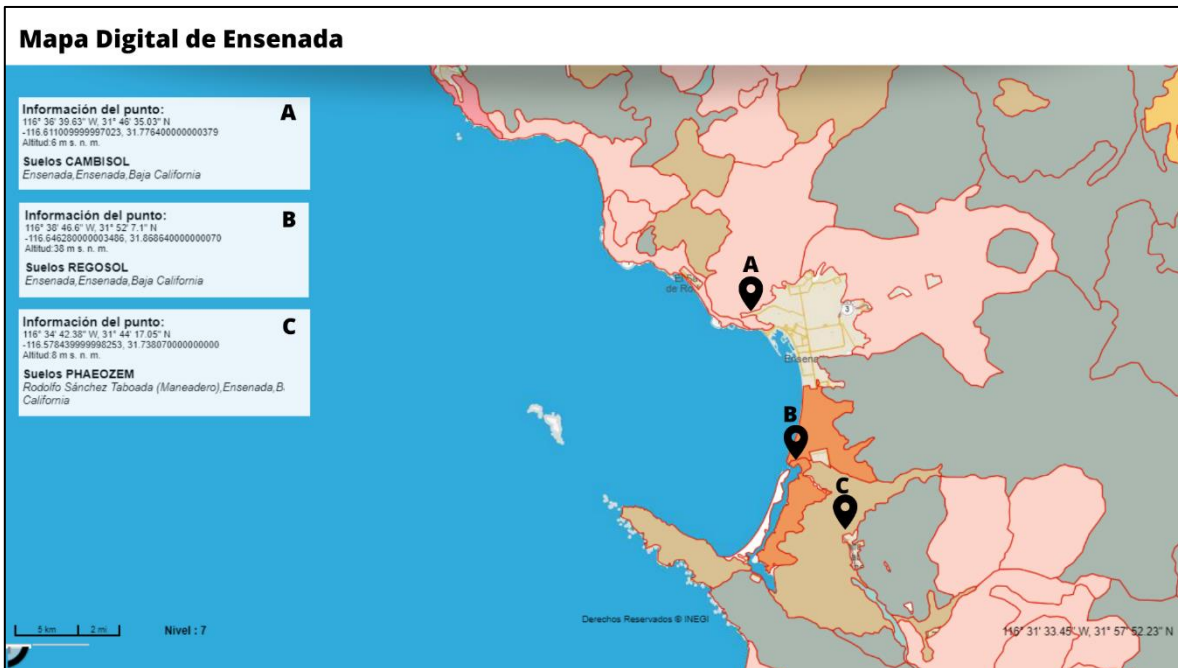





Figura 24. Mapeo edafológico en el que se ubica la posición geográfica de cada sustrato estudiado. Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.3. Extracción y traslado de los sustratos

La extracción y el traslado del muestreo de cada sustrato se llevó a cabo el mismo día para los tres sitios descritos en el apartado anterior, tomando como base las siguientes consideraciones (Tabla 7):

Tabla 7. Especificaciones de extracción y traslado de los sustratos.

TIPO DE SUELO	SITIO DE EXTRACCIÓN	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	PROF. DE EXTRACCIÓN	EVIDENCIA GRÁFICA
Cambisol	Col. Moderna	31° 52' 7.1" N, 116° 38' 46.6" W, 38 msnm	1.70m	

Regosol	Estero Beach	31° 46' 35.03" N, 116° 36' 39.63" W, 6 msnm	1.20m	
Phaeozem	Maneadero	31° 44' 17.05" N, 116° 34' 42.38" W, 8 msnm	1.00m	

Fuente: Elaboración propia.

Para lo anterior, en cada caso se siguió el procedimiento siguiente:

1. Se citó a las 7:00 h a la cuadrilla de apoyo para trasladarlos a cada sitio.
2. Una vez en el sitio, se procedió a buscar una superficie geográfica que contara con las características requeridas (capa vegetal delgada, y, nula o mínima erosión, por viento o rodamiento).
3. Con apoyo de herramienta manual (pico, pala y azadón), se llevaron a cabo pozos a cielo abierto con las profundidades ubicadas en la tabla anterior, según el sitio de extracción.
4. Después de llegar a la profundidad indicada, se extrajo aproximadamente 1 m³ de cada sustrato.
5. Posteriormente, se colocó y embolsó dentro de costales, sin modificar ninguna de sus propiedades físicas: Humedad, granulometría, color y textura, entre otros.
6. Para finalizar, los costales se llevaron al vehículo para ser trasladados al sitio donde se ejecutó el muro tapial.

3.4.2.4. Preparación preliminar de cada sustrato

Con el fin de uniformizar el procedimiento por medio del cual se les dio tratamiento a las condiciones vírgenes de cada sustrato se atendió el siguiente procedimiento:

1. Se llevó a cabo el vaciado de los costales en una superficie de 10 m² aproximadamente con el fin de estabilizar las condiciones de humedad que cada sustrato contuviera de origen. Para ello, en cada caso se dejó desecando el sustrato por un periodo de cuatro días, en promedio (Figura 25).



Figura 25. Secado del sustrato.
Fuente: Elaboración propia.

2. Posteriormente, se procedió con la desintegración de aquellos terrones cuya granulometría fuera superior a ¼" de diámetro, con el fin de favorecer el ejercicio del paso siguiente (Figura 26).



Figura 26. Desintegración de terrones.
Fuente: Elaboración propia.

3. Del material triturado generado con el paso anterior, se aplicó un procedimiento de cernido que permitiera separar todos aquellos grumos de tierra menores a un $\frac{1}{4}$ " del volumen total recabado (Figura 27).



Figura 27. Cernido de los sustratos.
Fuente: Elaboración propia.

4. A continuación, se depositó en cubetas de 19 litros el material resultante. La meta fue recabar 17 cubetas por cada sustrato, con el fin de garantizar el volumen de tierra requerido por el muro, según las dimensiones definidas. (0.22 m de espesor x 1.04 m de ancho x 1.20 m de alto) (ver Figura 28).



Figura 28. Cubetas con el sustrato obtenido.
Fuente: Elaboración propia.

5. Simultáneamente, con apoyo de personal calificado del laboratorio de ingeniería civil, se llevaron a cabo la conformación de especímenes comprimidos que permitieron definir las siguientes características para ejecutar el muro tapial: porcentaje de humedad, porcentaje de agregado y fuerza de compresión (Figura 29).



Figura 29. Espécimen de laboratorio desde el cual se definieron algunas características físicas.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.5. Construcción del muro tapial

El procedimiento atendido en esta etapa del proyecto de investigación, consistió sistemáticamente en los siguientes pasos:

1. Tomando en consideración la geometría solar y, por ende, la proyección de sombras que pudiera derivar de los cuerpos inmediatos al sitio en el que se estarían emplazando los módulos experimentales, se definió una ubicación precisa que estratégicamente estuviera libre de sombras (en la medida de lo posible), permitiera una fácil accesibilidad, contara con una base sólida y uniforme (de concreto), que estuviera en constante vigilancia y con pendiente mínima del 2% para evitar inundación (Figura 30).



Figura 30. Ubicación seleccionada para el emplazamiento de los módulos.

Fuente: Elaboración propia.

2. Una vez identificado el sitio, se procedió al armado del molde (con triplay y barrotes de madera) a partir del cual se definió la geometría del muro. Adicionalmente, a cada cara interior del molde se le aplicó dos capas de desmoldante que evitaran la adherencia de la tierra a estas superficies (Figura 31).



Figura 31. *Izquierda.* aplicación de desmoldante.

Derecha. Ensamble de cimbra.

Fuente: Elaboración propia.

3. Sucesivamente, con el fin de apisonar en capas delgadas la conformación del muro, este paso se llevó a cabo tomando como unidad de medida cada cubeta. De esta manera, de forma controlada, cada cubeta de tierra se mezclaba con el 5% de cemento y el 10% de agua, según lo indicado en los estudios de laboratorio, para posteriormente depositarse dentro de la cimbra y conformar una de las capas del muro. Este procedimiento se siguió repetidamente hasta lograr la altura señalada en párrafos anteriores (1.20 m) (Figura 32).



Figura 32. *Izquierda.* Aplicación de 5% del agregado de cemento. *Derecha.* Aplicación del 10% de agua.
Fuente: Elaboración propia.

4. Paralelamente al vaciado de la tierra por cubeta, dos personas se encargaban de apisonar la capa conformada. De esta forma, a fin de garantizar la misma compactación del sustrato, según las muestras analizadas, se aplicaron entre 72 y 85 compactaciones con un pisón de acero de 3.5 kg. Cuando se lograron las alturas de 0.40 y 0.80 m de altura, se introdujeron horizontalmente y de manera equidistante tres fragmentos de



Figura 33. *Izquierda.* Vaciado del contenido de la cubeta.

Derecha. Compactación del sustrato.

Fuente: Elaboración propia.

tubo ABS que se encargarían posteriormente de conectar la cámara de aire con el espacio habitable de los módulos experimentales (Figura 33).

5. Paso seguido, se dejó fraguar el muro por un periodo de tres días.
6. Transcurrido este tiempo, se llevó a cabo el procedimiento de descimbrado el cual consistió en desachillillar/desclavar cada elemento de la cimbra. Así mismo, se lavó la cimbra para posteriormente aplicar el desmoldante con el fin de utilizarla para la conformación del siguiente muro tapial (Figura 34).



Figura 34. *Ambos*. Descimbrado del muro tapial.
Fuente: Elaboración propia.

7. Por último, con el fin de garantizar la impermeabilidad del muro con relación a los escurrimientos que se pudiera generar durante el periodo de lluvias en la superficie de emplazamiento, se moldeó un chaflán de 5 cm de altura en el perímetro de la base de cada muro tapial (Figura 35).

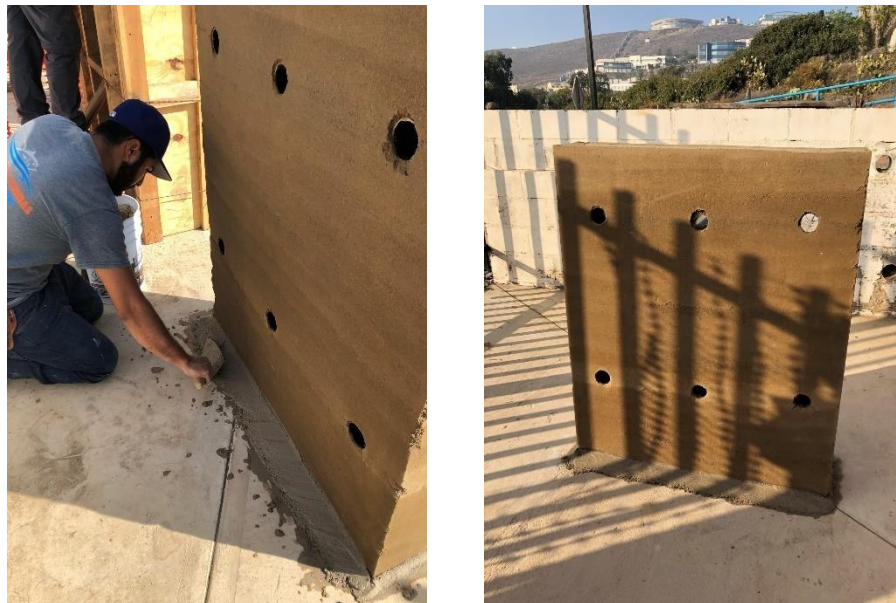


Figura 35. *Ambos*. Colocación de chaflán con mortero simple.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.6. Acoplamiento del módulo experimental en los muros tapiales.

Con los módulos experimentales prefabricados en taller y los muros de tierra desarrollados en sitio, se procedió con el acoplamiento de ambos elementos según los siguientes pasos:

1. Dado el peso volumétrico de cada módulo prefabricado (200 kg, en promedio), el traslado y la maniobra de ensamble, se realizaron mediante el uso de una grúa hidráulica (cap. 15 toneladas) (Figura 36).



Figura 36. *Izquierda.* Traslado y maniobra. *Derecha.* Acoplamiento de módulos con muros tapial.

Fuente: Elaboración propia.

2. Como parte de la previsión visualizada que evitara la absorción de humedad en la parte inferior de los módulos, se emplearon polines de madera de 4” como base para elevarlos respecto al piso terminado de la plataforma y, con ello, evitar el estancamiento de agua durante el periodo de lluvias (diciembre-febrero) (Figura 37).



Figura 37. Módulos experimentales sobre polines de madera.
Fuente: Elaboración propia.

3. Paso siguiente, a partir de una impecable coordinación entre el operador de la grúa y el personal de apoyo técnico (cuadrillas de trabajo conformadas por estudiantes de servicio social capacitados), se procedió a nivelar en el aire, en sentido horizontal, módulo por módulo, de tal forma que cada uno de ellos se ensamblara lentamente en cada muro, respectivamente. Lo anterior, a partir de movimientos bidimensionales atendidos manualmente por el personal de apoyo que permitieron contribuir con el apropiado ensamblaje de cada elemento (una persona situada en cada esquina y dos deteniendo el muro para evitar su erosión por rozamiento o desplome) (Figura 38).



Figura 38. *Ambos.* Acoplamiento de los módulos con muros tapial.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.7. Aplicación de acabados finales

Como etapa final a la conformación efectiva de los módulos experimentales, se llevó a cabo la aplicación de acabados (cementbond y esquineros de vinil en paños exteriores) y el afinado de detalles tales como: Hermeticidad con poliuretano expandible en las juntas generadas entre el muro y el módulo; instalación de sensores de humedad y temperatura en puntos estratégicos de cada módulo (pág.69) e instalación de ventana fija en la cara sur (Figura 39).



Figura 39. *Izquierda.* Aplicación de acabados finales. *Derecha.* Instalación de ventana fija.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. Puesta en marcha

Una vez concluida cada una de las fases descritas en el apartado anterior, se estuvo en condiciones de garantizar la correcta operación de los módulos para los propósitos perseguidos por esta investigación. En este sentido, la operación de los módulos y, por ende, el registro de las variables climáticas (temperatura del aire y humedad relativa) se llevó a cabo a partir de las 14:00 horas del jueves 2 de diciembre de 2021, con el fin de atender el periodo de estudio descrito en el planteamiento de la investigación (invierno) (Figura 40).



Figura 40. Módulos en condiciones de iniciar operación.
Fuente: Elaboración propia

Capítulo IV.

REGISTRO Y PROCESAMIENTO DE DATOS

En este apartado se describe el procedimiento metodológico adoptado para la fijación de los sensores dentro de cada uno de los módulos (altura, ubicación, periodo de registro, accesibilidad); así como, el monitoreo y registro de diferentes variables ambientales a lo largo del periodo de estudio, en este caso el de invierno.

4.1. Monitoreo y registro de datos

Para poder llevar a cabo el monitoreo de datos de los módulos experimentales fue necesario definir puntos estratégicos para la colocación de los tres sensores que llevarían a cabo el registro de la temperatura y humedad dentro de los mismos. Estos sensores fueron colocados de la siguiente manera (Figura 41):



Figura 41. Ubicación de sensores en cada módulo experimental.
Fuente: Elaboración propia.

Con lo anterior, fue posible instalar dos data logger (mca. Elitech, Mod.RC-51H) en cada uno de los módulos experimentales, así como un data logger (mca. AZ Instrument Corp; mod. 88395). En este sentido cada módulo contó con tres data logger que registraron temperatura del aire y humedad relativa simultáneamente en periodos de cada 10 minutos. Adicionalmente, con el fin de registrar las variables exteriores, se ubicó un data logger adicional a 3.00 m de los módulos a una altura de 2.50 m y a la sombra. Lo anterior, permitió monitorear simultáneamente: la cámara de aire, el núcleo del muro tapial, el espacio habitable, y las variables exteriores de cada uno de los módulos.

Cabe mencionar que, previo al inicio del periodo de registro, se llevó a cabo una calibración instrumental que permitió homogenizar la base desde la cual cada data logger llevó a cabo la lectura de las condiciones higrotérmicas; esta calibración se realizó por un periodo de 24 horas y permitió observar que las lecturas de cada instrumento se encontraban en un rango $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ para la temperatura ambiente y $\pm 2\%$ de humedad relativa.

4.2. Procesamiento y graficación de datos

Con base al registro de datos obtenidos, se llevó a cabo el vaciado de la información en hojas de cálculo que permitieron organizarlos en matriz, de esta manera cada columna correspondió a cada una de las variables analizadas, mientras que cada fila a cada una de las lecturas periódicas registradas.

Lo anterior permitió condensar en una hoja de cálculo el total de registros obtenidos por cada una de las variables y módulos estudiados; así como, del monitoreo externo que simultáneamente se llevaba a cabo.

Con la matriz generada por el total de sensores se trazó un gráfico para las temperaturas y un gráfico para las humedades, sobreponiendo en cada caso el rango de confort definido para la habitabilidad del espacio. Para el caso del confort térmico obtenido fue de 16.8 °C a 23.8 °C, y para el caso del confort higrúico fue del 33.3 % al 85.5 %. Estos gráficos permitieron identificar los periodos diarios en los cuales las condiciones higrotérmicas, ya sea de la cámara de aire, el núcleo del muro tapial o el espacio habitable, excedieron los límites del rango de confort en cada caso, (independientemente de la condiciones que se presentaron en el exterior), lo que permitió conocer la dinámica higrotérmica que presentó cada uno de los módulos, así como su efectividad frente a las condiciones requeridas respecto a las condiciones presentadas en el ambiente.

Capítulo V.

RESULTADOS

En este apartado se describen los resultados que se obtuvieron a partir del procesamiento de datos contenido en el capítulo anterior, específicamente, la relación existente entre el comportamiento higrotérmico del ambiente exterior y el desempeño higrotérmico que presentó cada uno de los módulos experimentales tanto en la cámara de aire, como en la masa térmica y el espacio interior.

5.1. Desempeño térmico de los sustratos

La relación existente entre el desempeño térmico identificado entre el ambiente exterior y cada uno de los módulos experimentales en sus diferentes puntos de monitoreo, se detallan en este apartado. Por lo anterior, éste se estructura en tres subapartados (correspondiente a cada sustrato) en los cuales se describen las siguientes relaciones térmicas: Exterior-Cámara de aire, Exterior-Masa térmica, y, Exterior-Espacio interior.

A modo de contextualizar las condiciones térmicas dadas en sitio durante el periodo de evaluación, con relación a las condiciones térmicas normalizadas de la ciudad en la que se llevó a cabo el experimento, se puede mencionar lo siguiente:

- El periodo de evaluación fue invierno (el periodo más frío de la ciudad), para lo cual se monitoreó del 2 de diciembre (de 2021) al 28 de febrero (de 2022). Lo anterior, debido a que, dada la naturaleza del presente estudio, se presumía que el desempeño del muro Trombe con los diferentes sustratos estaría siendo más efectivo (en cuanto a calentamiento se refiere) durante el periodo en que se presentan las temperaturas más bajas en la ciudad a lo largo del año.
- En este sentido, de acuerdo con Huerta (2018), las temperaturas máxima promedio, media y mínima promedio de la ciudad, corresponden a 20.1 °C, 15.2 °C, y 10.4 °C (Figura 42).
- En tanto, de acuerdo con el monitoreo recabado en sitio durante el periodo de evaluación, es posible identificar que las temperaturas máxima promedio, media y mínima promedio, corresponden a 19.1 °C, 14.7 °C, y 11.2 °C (Figura 42).
- Con lo anterior es posible visualizar que las diferencias encontradas entre las temperaturas dadas en el estudio de Huerta (2018) y las temperaturas actuales en este caso de diciembre 2021 a febrero 2022 tiene variaciones de ± 1.0 °C aproximadamente (Figura 42).

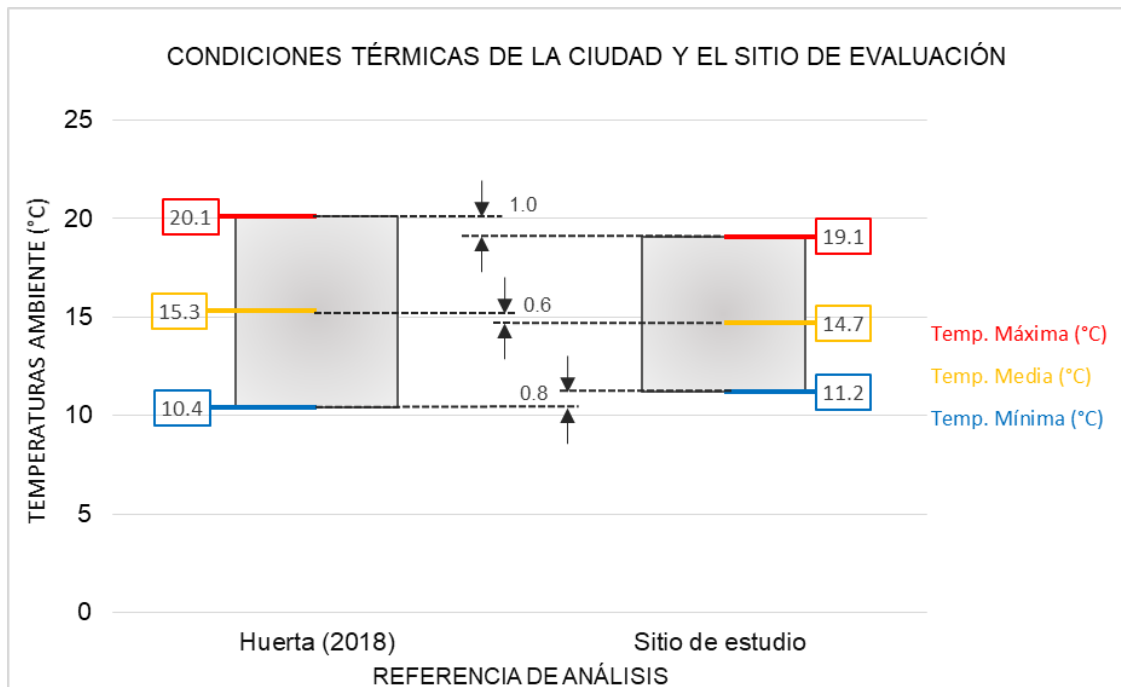


Figura 42. Comparativa entre las condiciones térmicas de la ciudad y las del sitio de evaluación.
Fuente: Elaboración propia.

5.1.1. Sustrato Cambisol

El comportamiento térmico que el sustrato cambisol presentó durante el periodo de evaluación con relación a las condiciones térmicas del ambiente exterior, se describe gráfica y textualmente en este apartado, en función de los diferentes puntos en los que se monitoreó el módulo experimental que lo contenía.

5.1.1.1. Comportamiento térmico: Exterior vs Cámara de aire

De acuerdo con el monitoreo de las condiciones térmicas que se mostraron tanto en el ambiente exterior como en la cámara de aire (Figura 43), se pudo determinar que, en un día representativo, las condiciones de bajo calentamiento en el ambiente exterior se presentan próximas a las 24 horas del día, existiendo la posibilidad de que a finales de enero se presente un breve periodo de confort y a mediados de febrero un periodo ligeramente más pronunciado. Por otra parte, en la cámara de aire, las condiciones mencionadas a lo largo del día representativo se presentan entre las 21:00 h y las 09:30 h del día siguiente (12 horas 30 minutos de bajo calentamiento, en promedio). Por lo anterior, en principio, se puede visualizar que

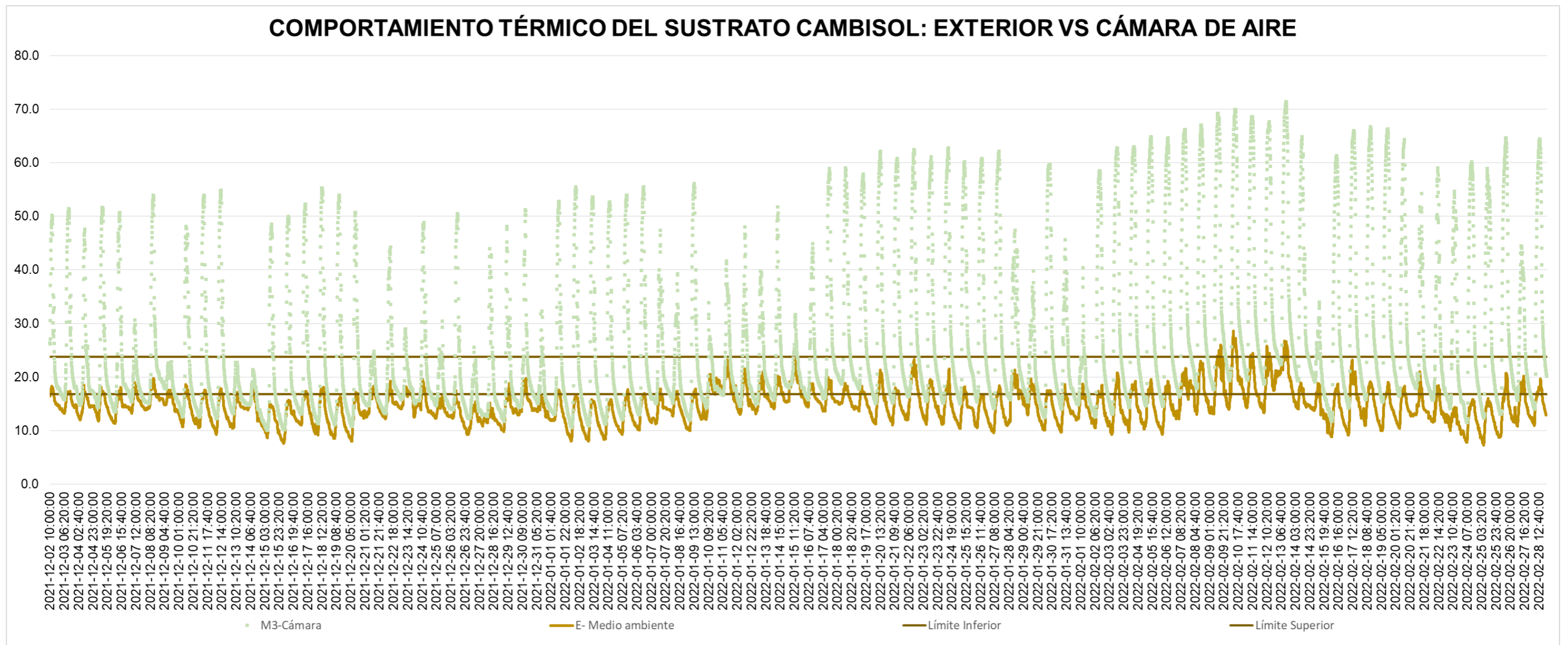


Figura 43. Comportamiento térmico del sustrato cambisol: Exterior vs cámara de aire.
Fuente: Elaboración propia.

en este último caso dichas condiciones solo se presentan durante la mitad del tiempo respecto a las que se presentan en el exterior debido al efecto de captación solar que el cristal muestra durante el horario diurno.

Por otro lado, las condiciones de confort térmico y de sobre calentamiento solo se presentan en la cámara de aire; en el primero de los casos, dichas condiciones dan lugar durante dos periodos: De las 09:30 h a las 09:50 h por la mañana, y, de las 16:50 h a las 21:00 h, por la tarde, debido a las propiedades físicas del sustrato que ofrece mayor masa térmica, lo cual resulta en un retardo térmico 4 horas 30 minutos; mientras que, en el segundo de los casos, las condiciones de sobre calentamiento se presentan, en promedio, de las 09:50 h a las 16:50 h (7 horas, aproximadamente).

Lo anterior permite advertir que la fase de calentamiento en el exterior, puede llegar a ser nula en un día representativo, mientras que, en la cámara de aire, gracias al Sol y a la superficie acristalada que forma parte del muro Trombe en los módulos experimentales, se logra agilizar el calentamiento. Por lo tanto, el periodo requerido para conseguir las condiciones térmicas de confort dentro de la cámara, durante la mañana, es de 2 horas 30 minutos a partir de que sale el Sol (en promedio, considerando que en invierno amanece a las 07:00 h), mientras que para conseguir condiciones de sobrecalentamiento se necesita un periodo de 20 minutos, (en promedio, a partir de la salida de la zona de confort).

Por consiguiente, es posible advertir que el 76.5 % del periodo estudiado presenta condiciones de bajo calentamiento en el ambiente exterior, consiguiendo temperaturas de hasta 7.3 °C, mientras que el 22.7 % del tiempo ofrece condiciones de confort térmico de entre 16.8 °C y 23.8 °C, y, el 0.8 % presenta condiciones de sobre calentamiento con temperaturas de hasta 28.6 °C. Por otra parte, en la cámara de aire las condiciones de bajo calentamiento corresponden al 30.7 % del periodo con temperaturas de hasta 10.0 °C; las de confort, al 35.1 %, con temperaturas de entre 16.8 °C y 23.8 °C; y, por último, las de sobre calentamiento, al 34.2 % con temperaturas de hasta 28.6 °C.

Lo anterior permite observar, de manera concisa, que mientras en el exterior solo el 22.7 % del día brinda condiciones de confort, en la cámara de aire se puede lograr hasta el 35.1 % del día en esas condiciones.

5.1.1.2. Comportamiento térmico: Exterior vs Masa térmica

De acuerdo con el monitoreo de las condiciones térmicas que se mostraron tanto en el ambiente exterior como en la masa térmica del muro Trombe (Figura 44), se puede definir que en promedio, las condiciones de bajo calentamiento en el ambiente exterior en un día representativo se presentan próximas a las 24 horas del día, existiendo la posibilidad de que a finales de enero se presente un breve periodo de confort y a mediados de febrero un periodo ligeramente más pronunciado. Mientras que, a su vez, la masa térmica presentó dichas condiciones entre las 07:50 h y las 11:20 h (tres horas 30 minutos, en promedio). Por su parte, a modo de contextualizar meramente las condiciones de la masa térmica con relación a la zona de confort habitable y, por ende, lograr un entendimiento respecto a su comportamiento, se tiene que las condiciones de confort en la masa térmica, se reflejaron dos periodos diferidos, de las 11:20 h a las 14:00 h por la mañana, y, de las 21:40 h a las 07:50 h, por la noche (12 horas 50 minutos, en promedio). Finalmente, las condiciones de sobre calentamiento en la masa térmica, las cuales se mostraron, en promedio, a partir de las 14:00 h concluyendo a las 21:40 h (7 horas 40 minutos, en promedio).

Con lo anterior, es posible estimar que, en el ambiente exterior, el 100 % del día representativo presenta condiciones de bajo calentamiento alcanzando temperaturas de hasta 7.3 °C. Por su parte, en la masa térmica las condiciones de bajo calentamiento equivalieron al 17.7 % del día con temperaturas de hasta 12.4 °C; las de confort, al 65.9 % del día con temperaturas de entre 16.8 °C y 23.8 °C; y las de sobre calentamiento, al 16.4 % del día con temperaturas de hasta 28.5 °C.

Lo anterior permite advertir, de manera condensada, que mientras en el exterior solo el 22.7 % del día ofrece condiciones de confort, en la masa térmica ese periodo corresponde a 65.9 % del día. No obstante, estos valores son meramente referenciales

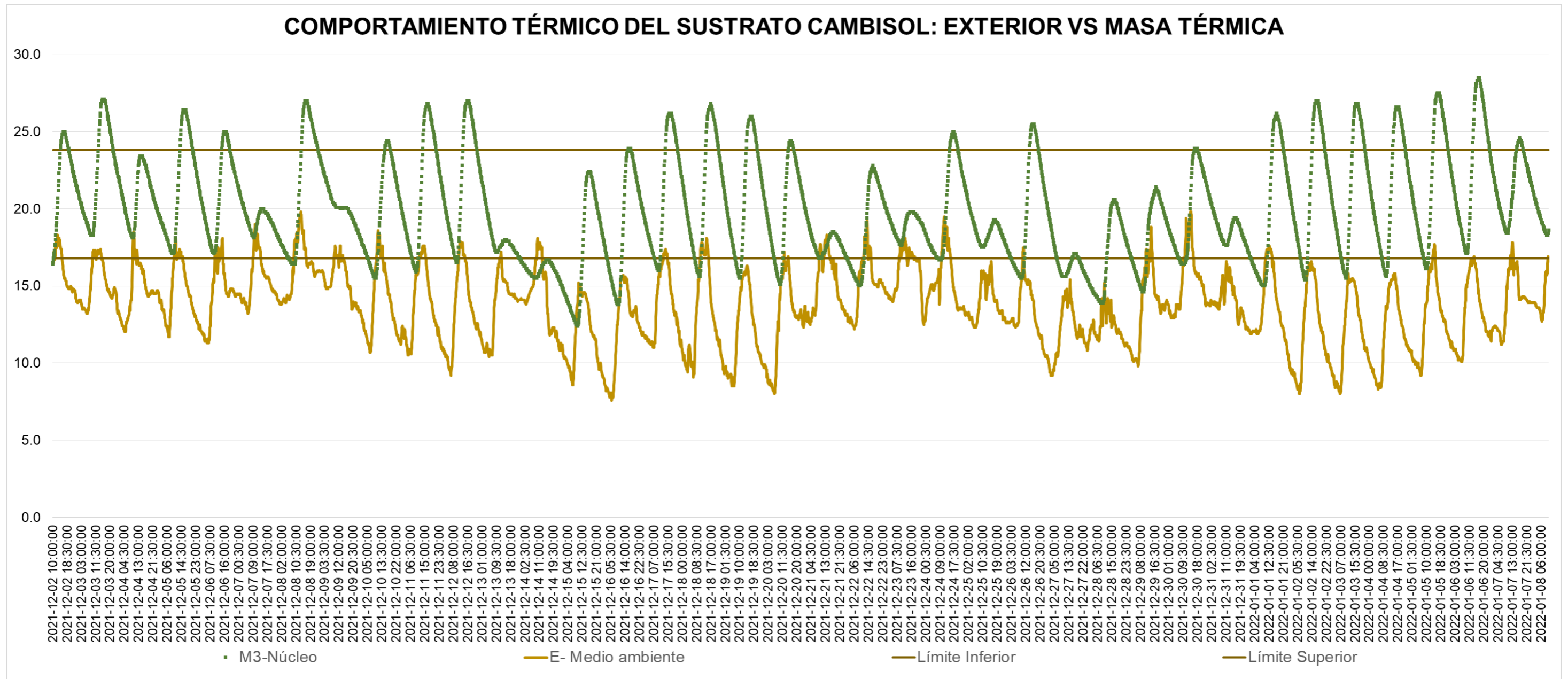


Figura 44. Comportamiento térmico del sustrato cambisol: Exterior vs Masa térmica.
Fuente: Elaboración propia.

ya que el muro absorbedor cuenta con una masa térmica alta que permite almacenar una cantidad considerable de energía que, posteriormente, se transfiere al espacio interior por medio de radiación y convección.

5.1.1.3. Comportamiento térmico Exterior vs Espacio interior

De acuerdo con la representación gráfica de las condiciones térmicas del ambiente exterior y las condiciones térmicas del espacio interior del módulo (Figura 45), se puede observar que, en promedio, el bajo calentamiento en el exterior está presente durante las 24 horas del día; mientras que, a su vez, dichas condiciones se manifiestan en el espacio interior entre las 20:00 h y las 10:20 h del día siguiente (14 horas 20 minutos, en promedio). Por su parte, las condiciones de confort en el espacio interior se presentan en dos periodos: De las 10:20 h a las 12:20 h por la mañana, y, de las 14:50 h a las 20:00 h por la tarde (siete horas 10 minutos, de forma acumulativa). Finalmente, las condiciones de sobre calentamiento se muestran de las 12:20 h a las 14:50 h (dos horas 30 minutos, en promedio).

Con lo anterior, es viable apreciar que en el ambiente exterior el 100 % de un día representativo puede presentar condiciones de bajo calentamiento obteniendo temperaturas de hasta 7.3 °C. Por otro lado, el espacio interior presenta condiciones de bajo calentamiento el 36.0 % del periodo, con temperaturas de hasta 9.7 °C; en confort, el 44.5 % del tiempo con temperaturas de entre 16.8 °C y 23.8 °C; y, por último, de sobre calentamiento, el 19.4 % con temperaturas de hasta 38.3 °C.

No obstante, es posible señalar que, en un día representativo del periodo, el confort térmico o el sobre calentamiento en el ambiente exterior puede llegar a ser nulo. Mientras que las condiciones de confort térmico en el espacio habitable se dan durante un periodo importante del día y, las de sobre calentamiento, durante un periodo breve (según los horarios descritos en el párrafo anterior), debido al calor que se almacena en el muro durante el día y su efecto de radiador durante la noche, los cuales en su conjunto representan cerca de 10 horas diarias en posibilidades de brindar confort térmico en el espacio si el sobre calentamiento es controlado a partir de ventilación natural y dispositivos de control solar, de ser el caso.

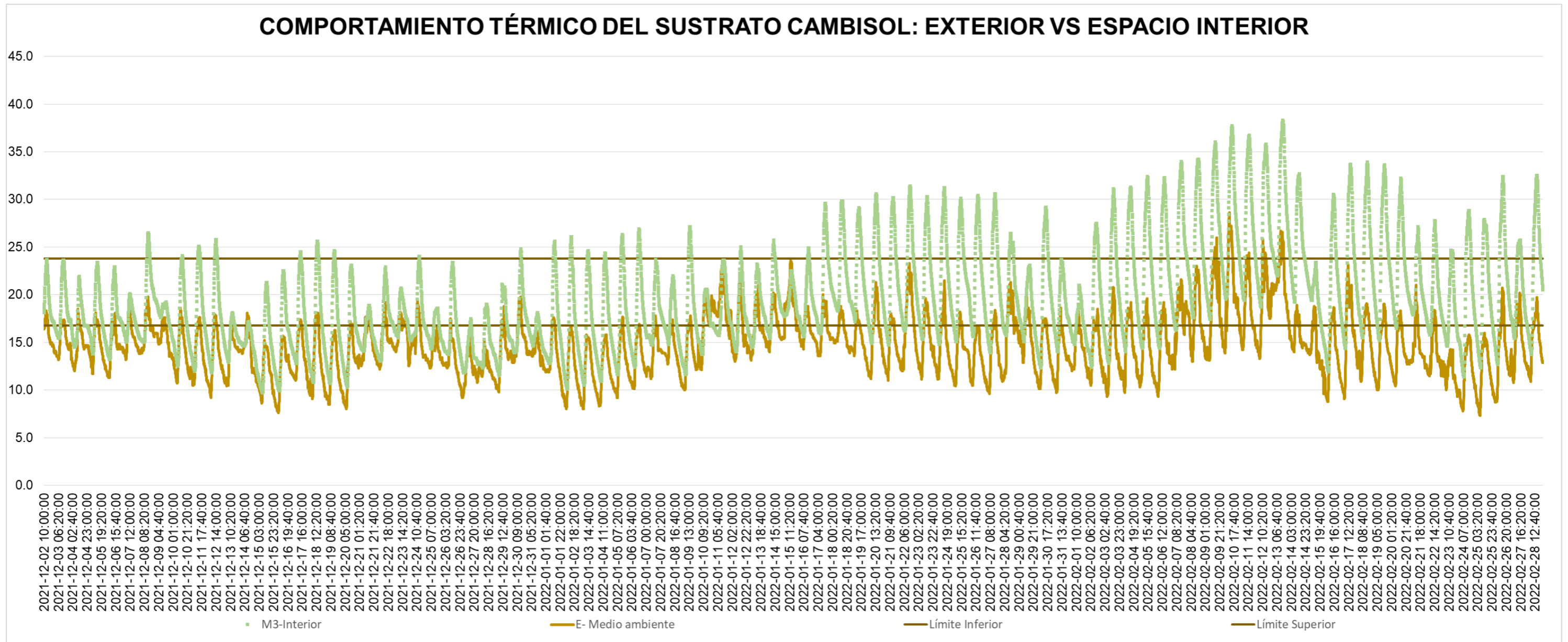


Figura 45. Comportamiento térmico del sustrato cambisol: Exterior vs Espacio interior.
 Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Sustrato Regosol

El comportamiento térmico que el sustrato regosol mostró durante el periodo de evaluación con relación a las condiciones térmicas del ambiente exterior, se describe gráfica y textualmente en este apartado, en función de los diferentes puntos en los que se monitoreó el módulo experimental que lo contenía.

5.1.2.1. Comportamiento térmico Exterior vs Cámara de aire

Con base en el monitoreo de las condiciones térmicas que se presentaron tanto en el ambiente exterior como en la cámara de aire (Figura 46), se pudo identificar que, en promedio, las condiciones de bajo calentamiento en el ambiente exterior se presentaron entre las 20:00 h y las 13:00 h del día siguiente (17 horas de bajo calentamiento); mientras que, en la cámara de aire, dichas condiciones se presentaron entre la 01:40 h y las 08:00 h (seis horas 20 minutos de bajo calentamiento, en promedio). Por su parte, las condiciones de confort en el ambiente exterior se presentaron en un periodo único diario de 13:00 h a 20:00 h (siete horas de confort), y, en la cámara de aire, en dos periodos diferidos, de las 08:00 h a las 09:40 h por la mañana, y, de las 17:00 h a la 01:40 h del otro día, por la noche (10 horas 20 minutos, en promedio). Por último, las condiciones de sobre calentamiento solo fue posible observarlas en la cámara de aire, las cuales se manifestaron, en promedio, a partir de las 09:40 h, concluyendo a las 17:00 h (siete horas 20 minutos). Lo anterior, permite advertir que la fase de calentamiento en el ambiente exterior es cíclica, comenzando en el momento en que amanece (07:00 h, en promedio) y concluyendo cuando se pone el Sol (17:00 h, en promedio); en otras palabras, el calentamiento se da durante el horario diurno. En tanto, la fase de calentamiento en la cámara de aire, si bien también depende en gran medida de la presencia del Sol, el fenómeno se logra acelerar a partir de la implementación de la superficie acristalada. En este sentido, es posible advertir que, durante la mañana, el periodo requerido para conseguir condiciones térmicas de confort, es muy reducido (una hora, en promedio, a partir de que sale el Sol), mientras que, el periodo para conseguir condiciones de sobre calentamiento corresponde a una hora 40 minutos,

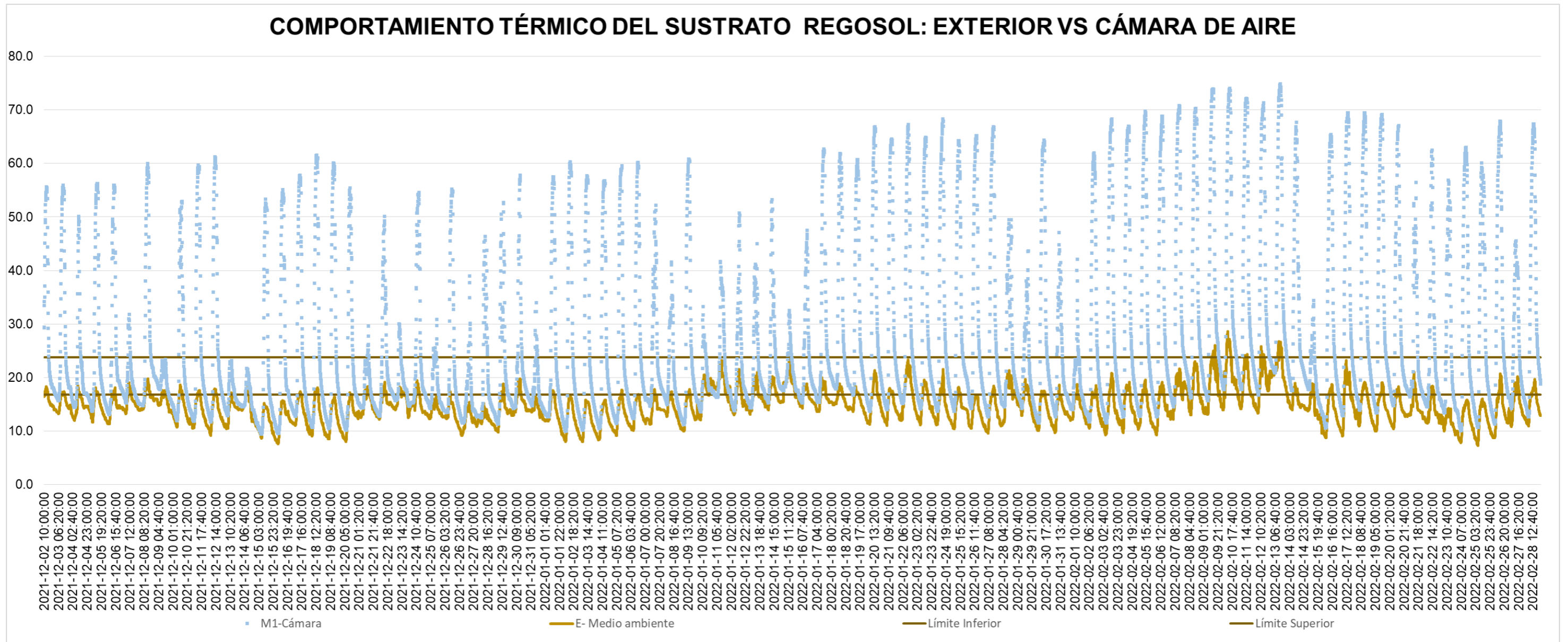


Figura 46. Comportamiento térmico del sustrato regosol: Exterior vs Cámara de aire.
Fuente: Elaboración propia.

en promedio, (a partir de que se sale de la zona de confort); por otro lado, durante la tarde, el periodo de confort es más extenso, y corresponde a ocho horas 40 minutos; lo anterior, debido a la influencia del retardo térmico que presenta la masividad del muro a partir de las propiedades físicas que el sustrato ofrece.

Con lo anterior, es posible estimar que, en el ambiente exterior, el 76.5 % del día presenta condiciones de bajo calentamiento alcanzando temperaturas de hasta 7.3 °C, mientras que el 22.7 % del día ofrece condiciones de confort térmico de entre 16.8 °C y 23.8 °C, y, el 0.8 % del día presenta condiciones de sobre calentamiento con temperaturas de hasta 28.6 °C. Por su parte, en la cámara de aire las condiciones de bajo calentamiento equivalieron al 34.2 % del día con temperaturas de hasta 9.4 °C; las de confort, al 32.0 % del día con temperaturas de entre 16.8 °C y 23.8 °C; y las de sobre calentamiento, al 33.8 % del día con temperaturas de hasta 74.9 °C.

Lo anterior permite advertir, de manera condensada, que mientras en el exterior solo el 22.7 % del día ofrece condiciones de confort, en la cámara de aire ese periodo corresponde a 32.0 % del día. No obstante, estos valores son meramente referenciales ya que la cámara de aire es el mecanismo por medio del cual la constitución del muro Trombe capta calor y lo transmite a la masa térmica, y no así, es un espacio habitable que requiera de dicha confortabilidad.

5.1.2.2. Comportamiento térmico Exterior vs Masa térmica

De acuerdo con el monitoreo de las condiciones térmicas que se mostraron tanto en el ambiente exterior como en la masa térmica del muro Trombe (Figura 47), se puede definir que en promedio, las condiciones de bajo calentamiento en el ambiente exterior en un día representativo se presentan entre las 20:00 h y las 13:00 h del día siguiente (17 horas de bajo calentamiento); mientras que, a su vez, la masa térmica presentó dichas condiciones entre las 06:00 h y las 11:00 h (5 horas, en promedio). Por su parte, las condiciones de confort en el ambiente exterior se presentaron en un periodo de 13:00 h a 20:00 h (7 horas en confort), y, en la masa térmica, se reflejaron dos periodos diferidos, de las 11:00 h a las 12:40 h por la

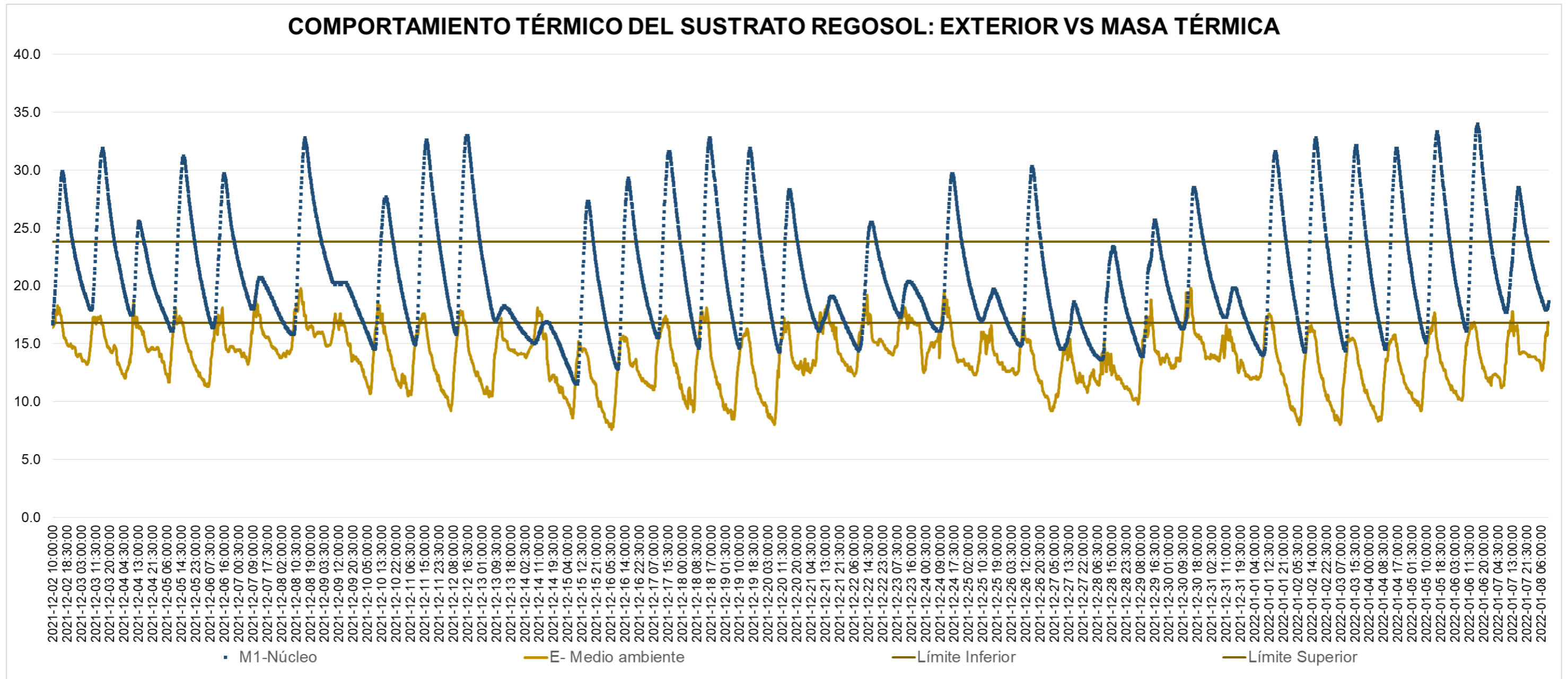


Figura 47. Comportamiento térmico del sustrato regosol: Exterior vs Masa térmica.
Fuente: Elaboración propia.

mañana, y, de las 22:00 h a las 06:00 h, por la noche (9 horas 40 minutos, en promedio). Finalmente, las condiciones de sobre calentamiento en el ambiente exterior solo fue posible observarlas en la masa térmica, las cuales se mostraron, en promedio, a partir de las 12:40 h concluyendo a las 22:00 h (9 horas 20 minutos, en promedio).

Con lo anterior, es posible estimar que, en el ambiente exterior, el 76.5 % del día presenta condiciones de bajo calentamiento alcanzando temperaturas de hasta 7.3 °C, mientras que el 22.7 % del día ofrece condiciones de confort térmico de entre 16.8 °C y 23.8 °C, y, el 0.8 % del día presenta condiciones de sobre calentamiento con temperaturas de hasta 28.6 °C. Por su parte, en la masa térmica las condiciones de bajo calentamiento equivalieron al 21.5 % del día con temperaturas de hasta 11.5 °C; las de confort, al 51.5 % del día con temperaturas de entre 16.8 °C y 23.8 °C; y las de sobre calentamiento, al 27.0 % del día con temperaturas de hasta 34.0 °C. Es importante no perder de vista que los datos de la masa térmica se citan únicamente de manera referencial dado que, como ya ha sido especificado, por sus características físicas no es posible su habitabilidad, no obstante, dichos valores permiten conocer el comportamiento físico que éste presenta respecto a las condiciones exteriores.

Lo anterior permite determinar, de manera condensada, que mientras en el exterior solo el 22.7 % del día ofrece condiciones de confort, en la masa térmica ese periodo corresponde a 51.5 % del día.

5.1.2.3. Comportamiento térmico Exterior vs Espacio interior

A partir del monitoreo de las condiciones térmicas del ambiente exterior, así como del espacio interior del módulo experimental (Figura 48), se puede identificar que las condiciones de bajo calentamiento en el exterior en un día representativo se presentaron entre las 20:00 h y las 13:00 h del día siguiente (17 horas de bajo calentamiento, en promedio); en el espacio interior, las condiciones mencionadas se presentaron en un periodo de las 21:30 h a las 10:00 h (12 horas 30 minutos de bajo calentamiento). Por otra parte, las condiciones de confort térmico en el ambiente exterior se mostraron en un único periodo de 13:00 h a 20:00 h (siete

horas de confort, en promedio), y, en el espacio interior, se presentaron dos periodos diferidos, de las 10:00 h a las 11:40 h por la mañana, y de las 16:40 h a las 21:30 h, por la tarde (6 horas 30 minutos, de forma acumulativa). Así mismo, las condiciones de sobre calentamiento en el ambiente exterior fueron nulas durante un día representativo en la ciudad, y solo fue posible llegar a dichas condiciones dentro del espacio interior, de las 11:40 h a las 16:40 h (cinco horas de sobre calentamiento, en promedio).

Basado en el comportamiento de las condiciones térmicas, es posible apreciar que en el ambiente exterior, el 76.5 % del día presenta condiciones de bajo calentamiento alcanzando temperaturas de hasta 7.3 °C, mientras que el 22.7 % se encuentra en confort, obteniendo temperaturas entre 16.8 °C y 23.8 °C, y, las condiciones de sobre calentamiento, pueden presentarse en un 0.8 % de un día representativo alcanzando temperaturas de hasta 28.6 °C. Por su parte, el espacio interior presenta un bajo calentamiento equivalente al 42.4 % del día con temperaturas de hasta 8.9 °C; el 38.9 % del día se mantiene en una zona de confort, con temperaturas de 16.8 °C hasta 23.8 °C; y, finalmente el sobre calentamiento está presente el 18.7 % del día con temperaturas promedio de 27.2 °C, alcanzando máximas de hasta 39.2 °C.

Con lo anterior, se asume que las condiciones de calentamiento en el ambiente exterior son durante el horario diurno, iniciando a partir de la salida del Sol y concluyendo cuando este se pone. No obstante, la fase de calentamiento en el espacio interior se da gracias a la implementación del muro Trombe como sistema de calentamiento pasivo, ya que este almacena el calor durante el día y lo libera por medio de radiación al interior durante la noche.

Lo anterior permite advertir, de manera condensada, que mientras en el exterior solo el 22.7 % del día ofrece condiciones de confort, en el espacio interior ese periodo se podría incrementar hasta un 57.6 % del día, si las condiciones de sobre calentamiento se controlan manualmente a partir de ventilación cruzada y sombreado, por mencionar algunas, lo que permite visualizar la importancia del desempeño que presenta la superficie acristalada en la implementación del muro Trombe, como elemento captor del calor obtenido de la radiación solar.

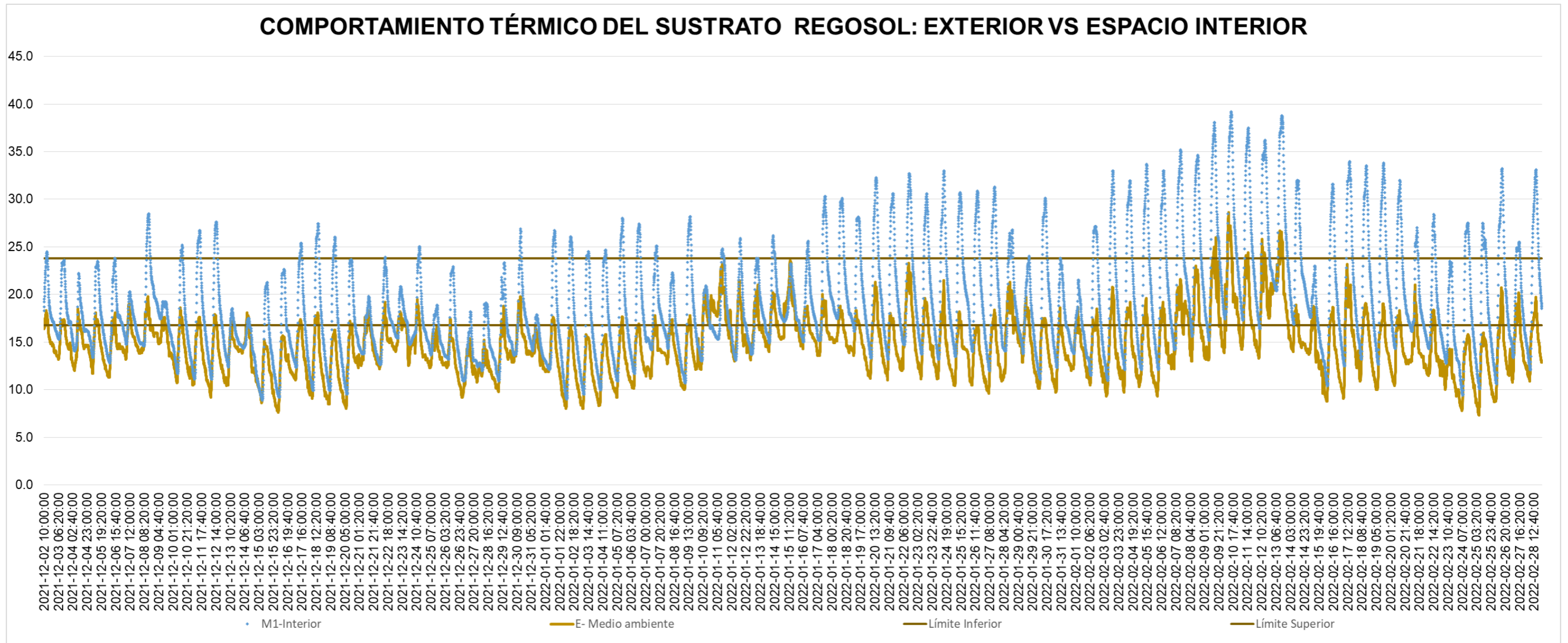


Figura 48. Comportamiento térmico del sustrato regosol: Exterior vs Espacio interior.
Fuente: Elaboración propia.

5.1.3. Sustrato Phaeozem

El comportamiento térmico que el sustrato phaeozem mostró durante el periodo de evaluación con relación a las condiciones térmicas del ambiente exterior, se describen gráfica y textualmente en este apartado, en función de los diferentes puntos en los que se monitoreó el módulo experimental que lo contenía.

5.1.3.1. Comportamiento térmico Exterior vs Cámara de aire

En función del monitoreo de las condiciones térmicas que se presentan tanto en el ambiente exterior como en la cámara de aire (Figura 49), se pudo estipular que, en un día representativo, las condiciones de bajo calentamiento en el ambiente exterior se presentaron entre las 15:00 h y las 10:30 h del día siguiente (18 horas 30 minutos de bajo calentamiento); mientras que, la cámara de aire presentó dichas condiciones entre las 20:30 h y las 09:00 h del día siguiente (12 horas 30 minutos, en promedio). Asimismo, las condiciones de confort en el ambiente exterior se presentaron en un periodo único de entre 10:30 h y 15:00 h (cuatro horas 30 minutos de confort, en promedio), y, en la cámara de aire, se presentaron dos periodos distintos, de las 09:00 h a las 09:40 por la mañana, y, de las 17:00 h a las 20:30 por la tarde (cuatro horas 10 minutos en confort de manera acumulativa). Finalmente, las condiciones de sobre calentamiento solo tuvieron lugar en la cámara de aire, las cuales se manifestaron entre las 9:40 h y las 17:00 h (7 horas 20 minutos, en promedio); ya que, en un día representativo el ambiente exterior puede no llegar a presentar temperaturas elevadas a las establecidas en la zona de confort térmico. Lo anterior muestra que la fase de calentamiento en el ambiente exterior es cíclica, iniciando cuando amanece (07:00 h, en promedio) y concluye cuando se pone el Sol (17:00 h, en promedio); es decir, el calentamiento se da durante el horario diurno, mientras que gracias al Sol y al área acristalada del muro Trombe, dentro de la cámara de aire se puede acelerar el proceso de calentamiento. De manera que, el periodo requerido para conseguir las condiciones térmicas de confort dentro de la cámara de aire durante el periodo diurno, es de 2 horas a partir de que sale el Sol en promedio (considerando que en invierno amanece a las 7:00 h). Por otro lado,

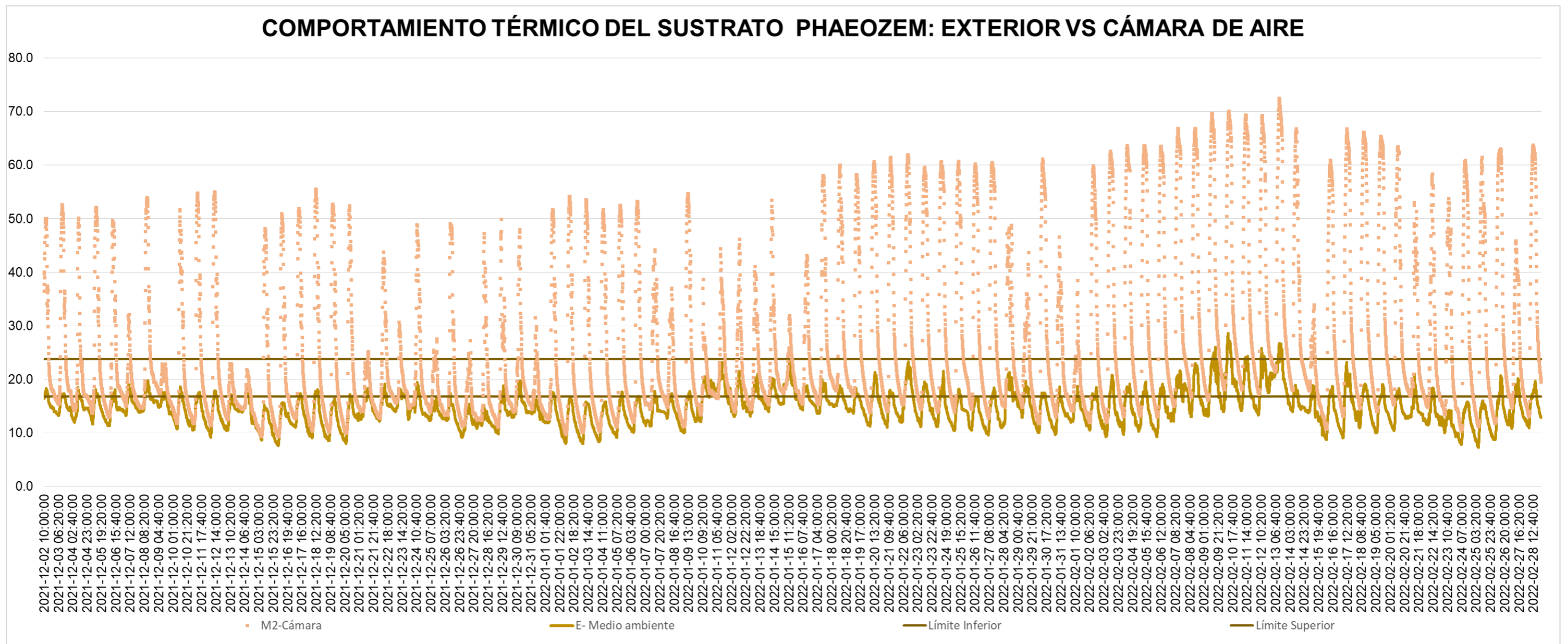


Figura 49. Comportamiento térmico del sustrato phaeozem: Exterior vs Cámara de aire.
Fuente: Elaboración propia.

para lograr conseguir condiciones de sobre calentamiento se necesita un periodo de 40 minutos (en promedio, a partir de la salida de la zona de confort).

Por lo tanto, es posible observar que el 76.5 % del periodo estudiado presenta condiciones de bajo calentamiento en el ambiente exterior, consiguiendo temperaturas de hasta 7.3 °C, mientras que el 22.7 % del tiempo se ofrecen condiciones de confort térmico de entre 16.8 °C y 23.8 °C, y, el 0.8 % restante ofrece condiciones de sobre calentamiento logrando temperaturas de hasta 28.6 °C. Mientras que, en la cámara de aire las condiciones de bajo calentamiento corresponden al 34.1 % del periodo con temperaturas de hasta 9.3 °C; las de confort, al 31.3 %, con temperaturas de entre 16.8 °C y 23.8 °C); y, por último, las de sobre calentamiento, al 34.6 % alcanzando temperaturas de hasta 72.5 °C.

Lo anterior permite advertir, de manera concisa, que cuando en el ambiente exterior solo el 22.7% del día permanecemos en confort, en la cámara de aire se puede alcanzar hasta un 31.3 % del día en esas condiciones.

5.1.3.2. Comportamiento térmico Exterior vs Masa térmica

De acuerdo con el monitoreo de las condiciones térmicas que se mostraron tanto en el ambiente exterior como en la masa térmica del muro Trombe (Figura 50), se puede definir que, en promedio, las condiciones de bajo calentamiento en el ambiente exterior en un día representativo se presentan entre las 15:00 h y las 10:30 h del día siguiente (18 horas 30 minutos de bajo calentamiento); mientras que a su vez, la masa térmica presentó dichas condiciones entre las 05:40 h y las 11:30 h (cinco horas 50 minutos, en promedio). Por su parte, las condiciones de confort en el ambiente exterior se presentaron en un periodo de 10:30 h a 15:00 h (cuatro horas 30 minutos en confort), y, en la masa térmica, se reflejaron dos periodos diferidos, de las 11:30 h a las 13:30 h por la mañana, y, de las 22:10 h a las 05:40 h, por la noche (7 horas 30 minutos, de forma acumulativa). Finalmente, las condiciones de sobre calentamiento en el ambiente exterior solo fue posible observarlas en la masa térmica, las cuales se mostraron, en promedio, a partir de las 13:30 h concluyendo a las 22:10 h (10 horas 40 minutos, en promedio).

Con lo anterior, es posible estimar que, en el ambiente exterior, el 76.5 % del día presenta condiciones de bajo calentamiento alcanzando temperaturas de hasta 7.3 °C, mientras que el 22.7 % del día ofrece condiciones de confort térmico de entre 16.8 °C y 23.8 °C, y, las condiciones de sobre calentamiento en un día representativo pueden no llegar a presentarse, sin embargo, el 0.8 % del periodo estudiado presenta condiciones de sobre calentamiento con temperaturas de hasta 28.6 °C. Por su parte, en la masa térmica las condiciones de bajo calentamiento equivalieron al 25.3 % del día con temperaturas de hasta 11.5 °C; las de confort, al 52.6 % del día con temperaturas de entre 16.8 °C y 23.8 °C; y las de sobre calentamiento, al 22.1 % del día con temperaturas de hasta 31.2 °C.

Lo anterior permite advertir, de manera condensada, que mientras en el exterior solo el 22.7 % del día ofrece condiciones de confort, en la masa térmica ese periodo corresponde a 25.3 % del día. No obstante, estos valores son meramente referenciales ya que la masa térmica es un mecanismo por medio del cual la constitución del muro Trombe resguarda el calor y lo transmite por medio de radiación al espacio interior.

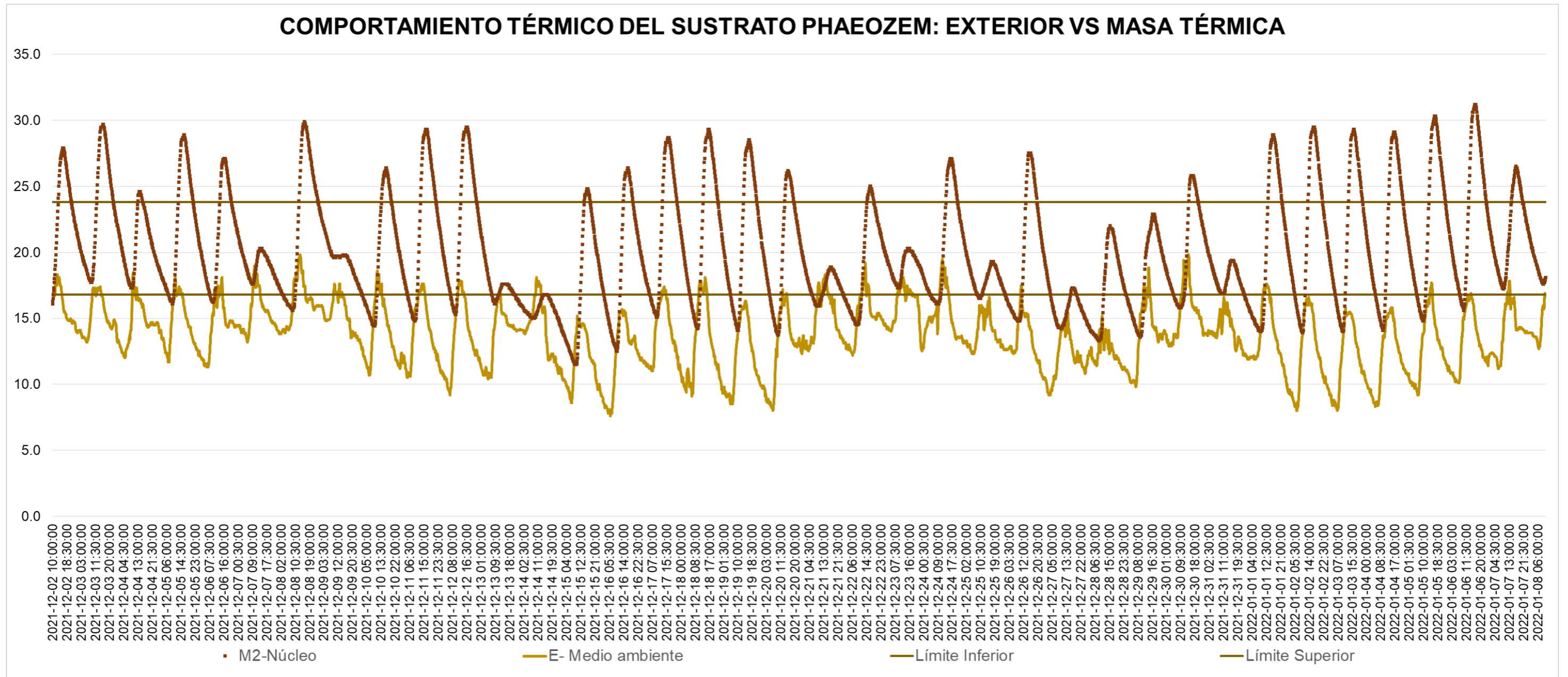


Figura 50. Comportamiento térmico del sustrato phaeozem: Exterior vs Masa térmica.
Fuente: Elaboración propia.

5.1.3.3. Comportamiento térmico Exterior vs Espacio interior

Con base en el monitoreo de las condiciones térmicas del ambiente exterior y las condiciones térmicas del espacio interior del módulo (Figura 51), se puede observar que las condiciones de bajo calentamiento en el ambiente exterior en un día representativo se presentaron en un periodo de las 15:00 h a las 10:30 h del día siguiente (18 horas 30 minutos, en promedio); en el espacio interior dichas condiciones se reflejaron de las 20:00 h a las 10:00 h del día siguiente (14 horas, en promedio). Mientras que, las condiciones de confort en el ambiente exterior se presentaron en un periodo único de las 10:30 h a las 15:00 h (cuatro horas 30 minutos, en confort); y, en el espacio interior, se presentaron dichas condiciones en dos periodos, por la mañana de las 10:00 h a las 11:40 h (una hora 40 minutos), y por la tarde de las 16:00 h a las 20:00 h (cuatro horas, aproximadamente). Finalmente, las condiciones de sobre calentamiento solo se presentaron en el espacio interior de las 11:40 h a las 16:00 h (cuatro horas 20 minutos, en promedio). Con lo anterior, es posible apreciar que, en el ambiente exterior, el 76.5 % del día presenta condiciones de bajo calentamiento alcanzando temperaturas de hasta 7.3 °C, mientras que el 22.7 % se encuentra en confort, obteniendo temperaturas entre 16.8 °C y 23.8 °C, y, las condiciones de sobre calentamiento, pueden no presentarse en un día representativo, mientras que un 0.8 % del periodo de estudio si logró alcanzar temperaturas de hasta 28.6 °C. A su vez, el espacio interior presenta un bajo calentamiento equivalente al 43.0 % del día con temperaturas de hasta 8.9 °C; el 38.4 % del día se mantiene en confort con temperaturas de 16.8 °C hasta 23.8 °C; y, finalmente las condiciones de sobre calentamiento se presentan un 18.5 % del día alcanzando temperaturas de hasta 39.7 °C.

Con lo anterior, es posible observar que las condiciones de calentamiento en el ambiente exterior son durante el periodo diurno, iniciando a partir de la salida del Sol y concluyendo cuando este se pone. Sin embargo, la fase de calentamiento en el espacio interior se da por la implementación del muro Trombe como sistema pasivo de calentamiento ya que este almacena el calor durante el día y lo libera por medio de radiación al interior.

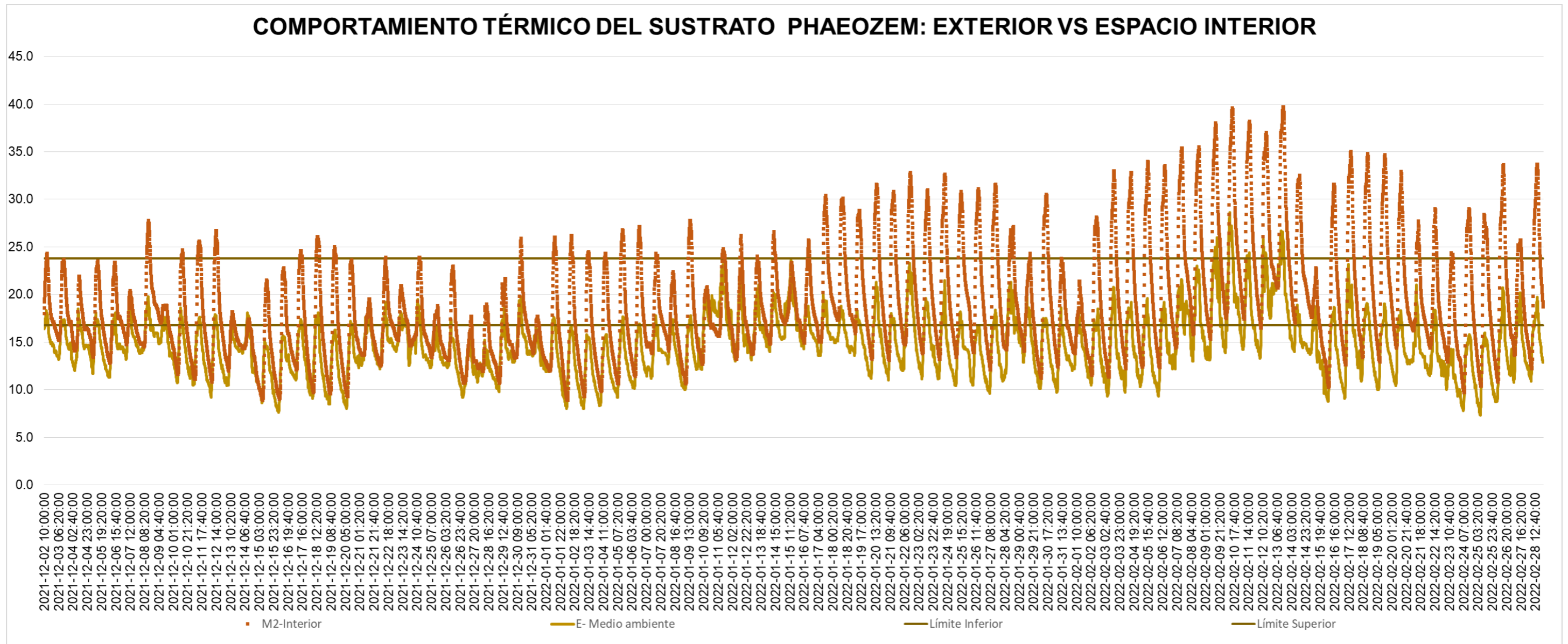


Figura 51. Comportamiento térmico del sustrato phaeozem: Exterior vs Espacio interior.
Fuente: Elaboración propia.

Con lo antes mencionado, se puede observar que mientras en el ambiente exterior solo el 22.7 % del día ofrece condiciones de confort, en el espacio interior ese periodo se podría incrementar hasta un 56.9 % del día, si las condiciones de sobre calentamiento se controlan a partir de la implementación de otras estrategias pasivas como la ventilación cruzada y el sombreado, por dar un ejemplo, lo que permite percibir la importancia del desempeño que presenta la implementación del muro Trombe como un elemento de captación de calor por medio de radiación solar.

5.2. Desempeño hídrico de los sustratos

La relación existente entre el desempeño hídrico identificado entre el ambiente exterior y cada uno de los módulos experimentales en sus diferentes puntos de monitoreo, se detallan en este apartado. Por lo anterior, éste se estructura en tres subapartados (correspondiente a cada sustrato) en los cuales se describe la relación hídrica: Exterior-cámara de aire-espacio interior.

A modo de contextualizar las condiciones hídricas dadas en sitio durante el periodo de evaluación, con relación a las condiciones hídricas normalizadas de la ciudad en la que se llevó a cabo el experimento, se puede mencionar lo siguiente:

- De acuerdo con Huerta (2018), las humedades relativas máxima promedio, media y mínima promedio de la ciudad, corresponden a 86.7 %, 68.0 % y 42.7 %, respectivamente (Figura 52).
- En tanto, de acuerdo con el monitoreo recabado en sitio durante el periodo de evaluación, es posible identificar que las humedades relativas máxima promedio, media y mínima promedio, corresponden a 81.9 %, 64.9 % y 45.7 %, respectivamente (Figura 52).
- Con lo anterior es posible visualizar que las diferencias encontradas entre las humedades relativas dadas en el estudio de Huerta (2018) y las humedades relativas presentadas en sitio, para el periodo de diciembre 2021 a febrero 2022, tiene variaciones de ± 4.0 %, aproximadamente (Figura 52). Lo que permite dejar entre ver que el comportamiento hídrico del sitio fue prácticamente el mismo caracterizado con datos históricos por Huerta (2018).

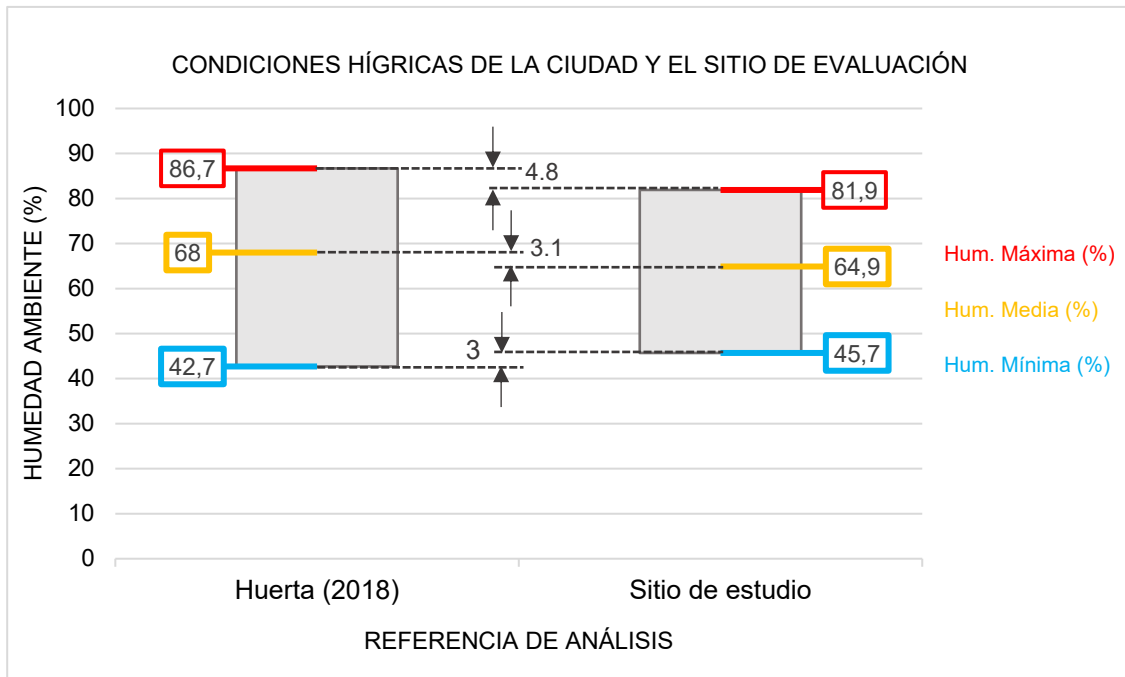


Figura 52. Comparativa entre las condiciones hígricas de la ciudad y las del sitio de evaluación.
Fuente: Elaboración propia.

5.2.1. Sustrato Cambisol

El comportamiento higró que el sustrato cambisol reflejó durante el periodo de evaluación con relación a las condiciones hígricas del ambiente exterior, se describe gráfica y textualmente en este apartado, en función de los diferentes puntos en los que se monitoreó el módulo experimental que lo contenía.

5.2.1.1. Comportamiento higró Exterior-Cámara de aire-Espacio interior

De acuerdo con el monitoreo higró representado gráficamente en la Figura 53, se puede determinar que, en un día representativo del periodo estudiado, las condiciones de humedad relativa tanto en el exterior como en la cámara de aire presentan magnitudes ubicadas dentro de la zona de confort durante un periodo prolongado del día, con la posibilidad de que la humedad aumente o disminuya

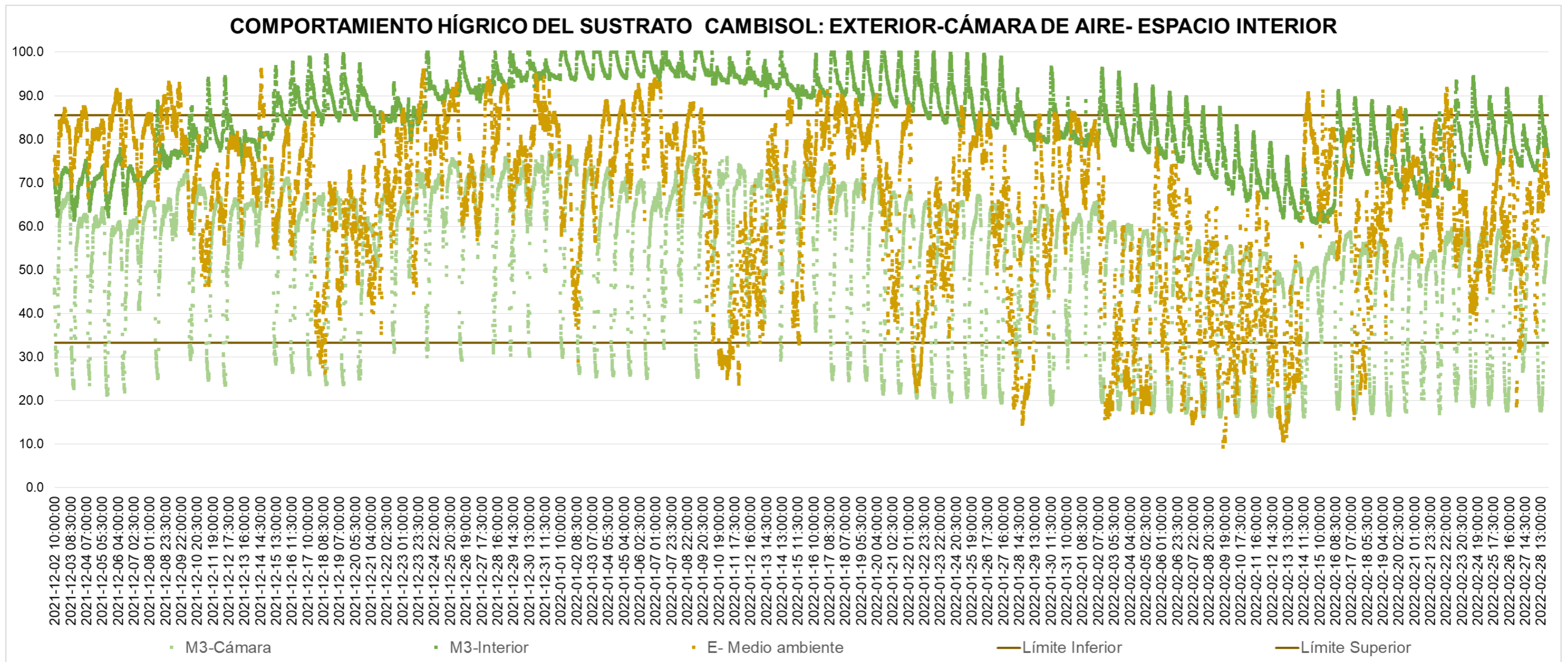


Figura 53. Comportamiento higró exterior-cámara de aire- espacio interior
Fuente: Elaboración propia.

según las condiciones térmicas que simultáneamente dan lugar, ya que éstas se encuentran directamente relacionadas: Si la temperatura aumenta, la humedad disminuye, y viceversa.

Con lo anterior, es posible observar que el ambiente exterior presenta el 9.3 % del tiempo condiciones de baja humedad (correspondientes a 45.7 % de HR en promedio y mínimas extremas de hasta 9.3 % de HR); el 80.0 %, condiciones en confort (entre el 33.3 % y el 85.5 % de HR); y, el 10.7 %, condiciones de sobre humedad (correspondientes a 81.9 % de HR en promedio y máximas extremas de hasta 96.0 %). Por otro lado, las condiciones de baja humedad en la cámara de aire corresponden al 16.8 % (correspondientes a 26.9 % de HR en promedio); y las de confort, al 83.2 % (entre el 33.3 % y el 85.5 % de HR); ya que, en este caso, la sobre humedad no se presentó en momento alguno del periodo estudiado. Por otra parte, en el espacio interior las condiciones no presentan baja humedad, pues el 51.1 % se encuentra en confort (entre el 33.3 % y el 85.5 % de HR); y, el 48.9 % en sobre humedad (correspondientes a 91.9 % de HR en promedio).

Esto permite advertir que el comportamiento higróico de la cámara de aire ésta claramente relacionado con el del ambiente exterior, pues conforme éste último presenta oscilación, el primero refleja una trayectoria similar. Si bien, la humedad relativa del exterior es mayor respecto a la de la cámara de aire, ambas presentan una dinámica en la que sus oscilaciones son equivalentes. No obstante, el comportamiento higróico del espacio interior es opuesto al dinamismo antes mencionado, dado que éste refleja una estabilidad a lo largo del tiempo con magnitudes por encima y por debajo del umbral superior del confort. Esto puede deberse a la hermeticidad y el encapsulamiento, ya que el muro Trombe emite calentamiento por medio de radiación infrarroja, lo anterior propone la utilización de vanos para lograr ventilación cruzada, y, así controlar la humedad en el interior, manteniéndose en la zona de confort higróico.

5.2.2. Sustrato Regosol

El comportamiento higróico que el sustrato regosol mostró durante el periodo de evaluación con relación a las condiciones higróicas del ambiente exterior, se describe

gráfica y textualmente en este apartado, en función de los diferentes puntos en los que se monitoreó el módulo experimental que lo contenía.

5.2.2.1. Comportamiento higrico Exterior-Cámara de aire-Espacio interior

Con base en el monitoreo higrico representado gráficamente en la Figura 54 se puede identificar que, en un día representativo del periodo estudiado, las condiciones de humedad relativa tanto en el exterior como en la cámara de aire presentan magnitudes ubicadas dentro de la zona de confort durante un periodo prolongado del día, con la posibilidad de que la humedad aumente o disminuya conforme las condiciones térmicas que a su vez dan lugar, ya que éstas se encuentran directamente relacionadas: Si la temperatura aumenta, la humedad disminuye, y viceversa.

En la Figura 54 se puede observar que el ambiente exterior presenta el 9.3 % del tiempo condiciones de baja humedad (correspondientes a 45.7 % de HR en promedio y mínimas extremas de hasta 9.3 %); el 80.0 %, condiciones en confort (entre el 33.3 % y el 85.5 % de HR); y, el 10.7 %, condiciones de sobre humedad (correspondientes a 81.9 % de HR en promedio y máximas extremas de hasta 96.0 %). Así mismo, las condiciones de baja humedad en la cámara de aire corresponden al 19.7 % (correspondientes a 19.3 % de HR en promedio); las de confort, al 80.1 %, (entre el 33.3 % y el 85.5 % de HR); y, el 0.2 % a las condiciones de sobre humedad (correspondientes a 61.0 % de HR en promedio y máximas extremas de hasta 79.1 %). No obstante, en espacio interior las condiciones no presentan baja humedad, pues el 44.5 % del tiempo (entre el 33.3 % y el 85.5 % de HR); se encuentra en confort; y el 55.5 % en sobre humedad (correspondientes a 82.8 % de HR en promedio y máximas extremas de hasta 100.0 %).

Lo anterior permite advertir que el comportamiento higrico de la cámara de aire ésta notoriamente relacionado con el del ambiente exterior, pues de acuerdo con este último presenta oscilación, el primero refleja una trayectoria similar. Si bien, la humedad relativa del exterior es mayor respecto a la de la cámara de aire, ambas presentan una dinámica en la que sus oscilaciones son equivalentes. A su vez, el

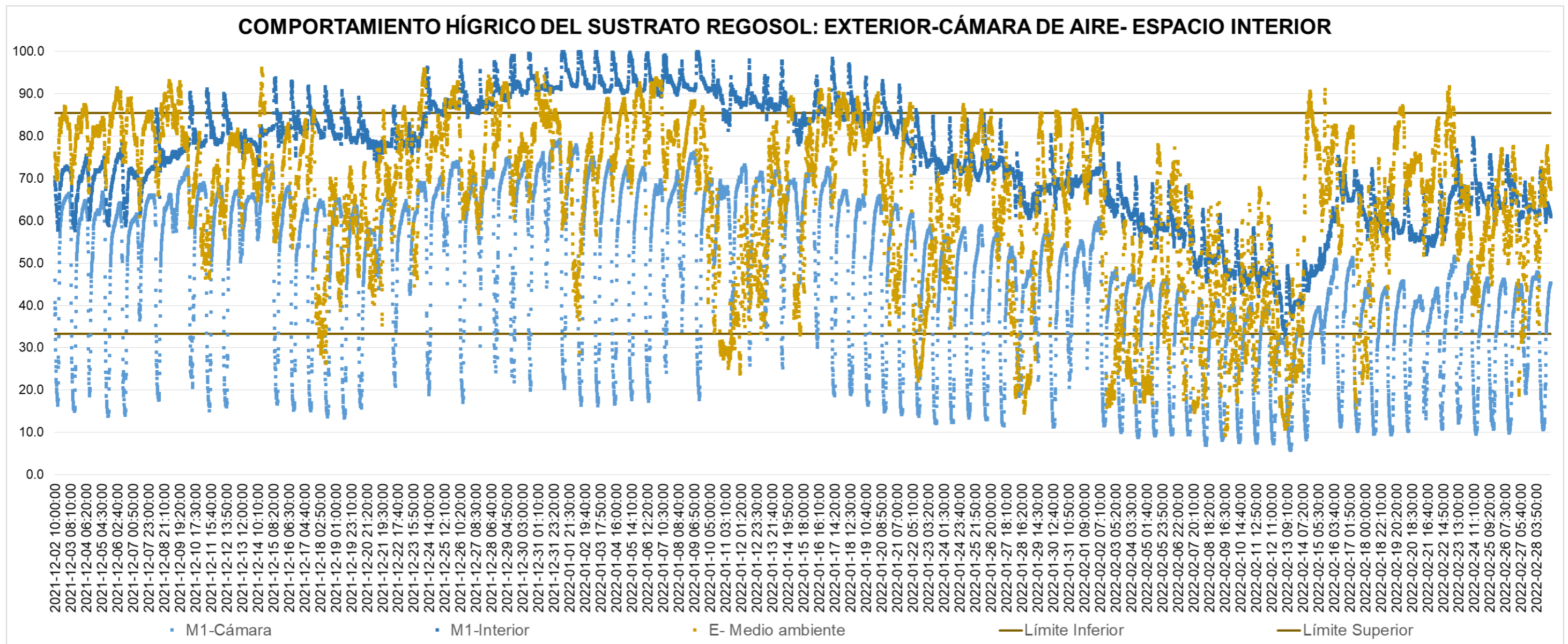


Figura 54. Comportamiento higrco del sustrato regosol: Exterior-cámara de aire- espacio interior.

Fuente: Elaboración propia.

comportamiento higrico del espacio interior es opuesto al dinamismo antes mencionado, dado que éste refleja una estabilidad a lo largo del tiempo con magnitudes por encima y por debajo del umbral superior del confort. Esto puede deberse a la hermeticidad y el encapsulamiento, ya que el muro Trombe emite calentamiento por medio de radiación y convección, lo anterior propone la utilización de vanos para lograr ventilación cruzada, y, así controlar la humedad en el interior, manteniéndose en la zona de confort higrico.

5.2.3. Sustrato Phaeozem

El comportamiento higrico que el sustrato phaeozem reflejó durante el periodo de evaluación con relación a las condiciones hígricas del ambiente exterior, se describe gráfica y textualmente en este apartado, en función de los diferentes puntos en los que se monitoreó el módulo experimental que lo contenía.

5.2.3.1. Comportamiento higrico Exterior-Cámara de aire-Espacio interior

En función del monitoreo higrico presentado gráficamente en la Figura 55 se puede identificar que, en un día representativo del periodo estudiado, las condiciones de humedad relativa tanto en el exterior como en la cámara de aire muestran magnitudes ubicadas dentro de la zona de confort durante un periodo prolongado del día, con la posibilidad de que la humedad aumente o disminuya conforme las condiciones térmicas que a su vez dan lugar, ya que éstas se encuentran directamente relacionadas: Si la temperatura aumenta, la humedad disminuye, y viceversa.

En la Figura 55 se puede observar que el ambiente exterior presenta el 9.3 % del tiempo condiciones de baja humedad (correspondientes a 45.7 % de HR en promedio y mínimas extremas de hasta 9.3 %); el 80.0 %, condiciones en confort (entre el 33.3 % y el 85.5 % de HR); y, el 10.7 %, condiciones de sobre humedad (correspondientes a 81.9 % de HR en promedio y máximas extremas de hasta 96.0 %). Así mismo, las condiciones de baja humedad en la cámara de aire corresponden al 24.0 % (correspondientes a 24.8 % de HR en promedio); las de

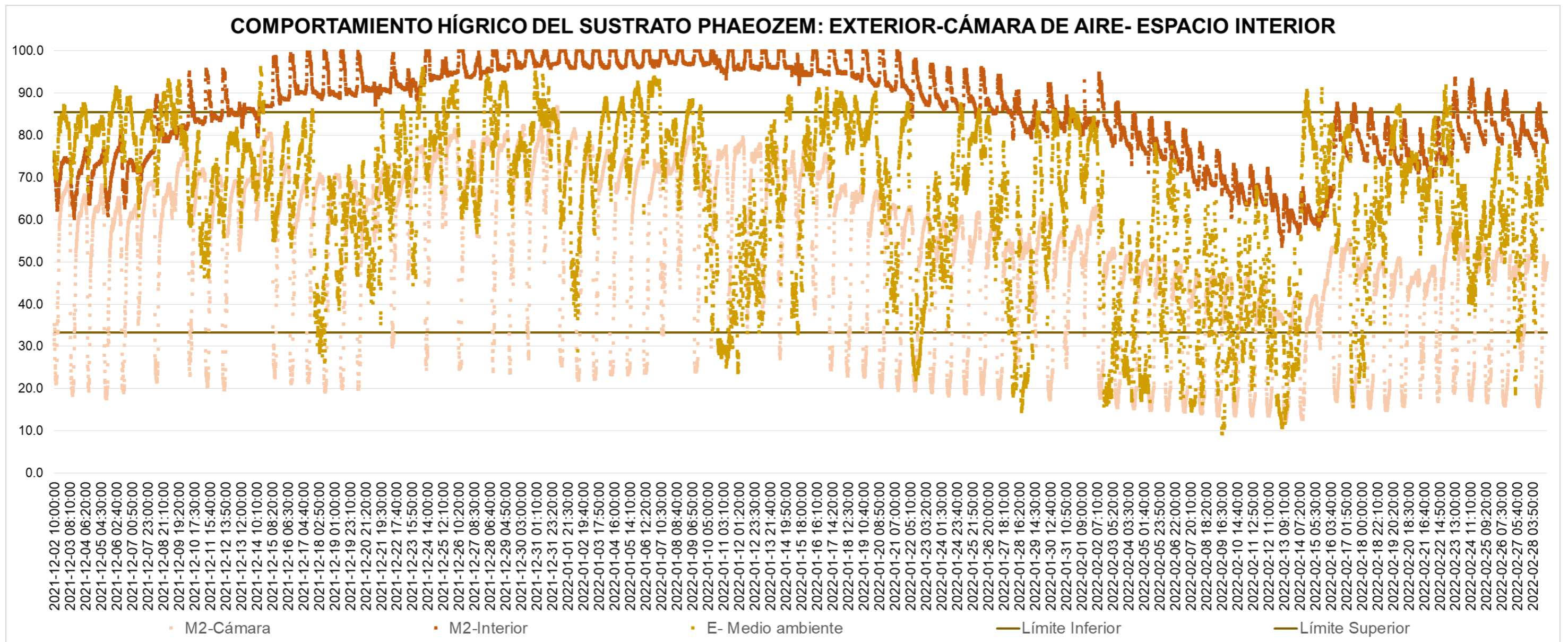


Figura 55. Comportamiento higrco del sustrato phaeozem: Exterior-Cámara de aire-Espacio interior

Fuente: Elaboración propia.

confort, al 76.0 %, (entre el 33.3 % y el 85.5 % de HR); ya que, en este caso, la sobre humedad no se presentó en momento alguno del periodo estudiado. Ahora bien, en el espacio interior las condiciones no presentan baja humedad, pues el 71.5 % del tiempo (entre el 33.3 % y el 85.5 % de HR) se encuentra en confort; y el 28.4 % en sobre humedad (correspondientes a 65.6 % de HR en promedio y máximas extremas de 86.7 %).

Por último, los datos anteriores permiten advertir, que el exterior y la cámara de aire presentan poca oscilación higríca entre sí, al permanecer durante periodos de tiempo de similar duración dentro de la zona de confort; mientras que, en el espacio interior las condiciones higrícas se mantienen estables pero con magnitudes predominantemente superiores al límite de la zona de confort; por lo anterior se sugiere el uso de vanos para generar ventilación cruzada y así controlar la humedad en el interior, manteniéndose en zona de confort higríco.

CONCLUSIONES

La falta de implementación de sistemas pasivos de calentamiento en el diseño arquitectónico es una problemática que viene afectando a los usuarios tanto de manera económica, como en su bienestar, debido, en parte, a la falta de conocimiento de los arquitectos locales, ya que en su lugar acuden al uso de sistemas mecánicos o automatizados que demandan un consumo excesivo de energía.

No obstante, en esta investigación se puso en práctica la utilización de una técnica o sistema de calentamiento pasivo que es el muro Trombe, el cual, estabiliza las condiciones higrotérmicas que contribuyen a una climatización adecuada en los espacios interiores a través de la captación y almacenamiento de la radiación solar directa y la circulación del aire que se produce por la transferencia de calor convectiva entre interior y exterior.

De acuerdo con la investigación documental previa, se identificaron cuatro periodos térmicos en Ensenada: Periodo frío (diciembre a febrero), periodo de transición térmica de frío a cálido (marzo a junio), periodo cálido (julio a septiembre) y periodo de transición térmica de cálido a frío (octubre a noviembre), los cuales presentan temperaturas medias de 14.13 °C, 16.57 °C, 21.16 °C y 17.65 °C, respectivamente. No obstante, dados los alcances de esta investigación y los requerimientos preferentes de calentamiento en dos terceras partes del año, solo se presentan los resultados del desempeño térmico, durante el periodo frío, de los tres sustratos que por extensión territorial son los más representativos de la ciudad de Ensenada: Cambisol, regosol y phaeozem.

Algunas de las bondades identificadas con el sistema constructivo denominado *sistema ligero*, son: La rapidez de ejecución, el precio por m², la limpieza en obra y la mano de obra no especializada que requiere, entre otras. Estas características han permitido que este sistema se coloque en los más utilizados en el diseño y la construcción de las edificaciones contemporáneas en esta ciudad. Adicional a lo anterior, la modulación dimensional con la que comercialmente se ofrecen los productos que conforman el sistema antes mencionado, dieron pauta al diseño morfológico, geométrico y constructivo de cada uno de los módulos experimentales

utilizados en la presente investigación. A esto, se le suma a posibilidad de hacer replicable cada uno de ellos, dada la modulación con la que el diseño resultó y, en lo sucesivo, la ejecución demostró. Al respecto, se puede presumir que dichas decisiones favorecieron el análisis térmico de cada uno de los sustratos analizados puesto que se presentaron en condiciones físicas similares a modo de encontrar imparcialidad del contexto experimental.

Con lo anterior, se puede concluir que la dinámica térmica presentada en cada uno de los módulos experimentales, tanto en la cámara del aire, como la masa térmica y el espacio interior, es la siguiente:

Con relación al **sustrato cambisol**, se determinó que, del total del periodo analizado, las condiciones de bajo calentamiento en la cámara de aire se presentan el 30.7 % del tiempo con temperaturas de hasta 10.0 °C; las de confort térmico, el 35.1 %, con temperaturas de entre 16.8 °C y 23.8 °C; y, las de sobre calentamiento, el 34.2 %, con temperaturas de hasta 71.4 °C, por lo que empleando estrategias de diseño bioclimático para neutralizar este último periodo, es posible garantizar hasta un **69.3 %** del tiempo en condiciones de confort, muy por encima del 22.7 % del tiempo que se presentan dichas condiciones en el exterior. Por otra parte, en la masa térmica, el 17.7 % del tiempo se presentan condiciones de bajo calentamiento con temperaturas de hasta 12.4 °C; el 65.9 %, de confort con temperaturas de entre 16.8 °C y 23.8 °C; y, el 16.4 %, las de sobre calentamiento con temperaturas de hasta 28.5 °C, condiciones que por ser el núcleo del muro Trombe y, por ende, ser inhabitable se mantienen constantes en todo momento. Por último, en el espacio de interés para el diseño arquitectónico (espacio interior), se presentan condiciones de bajo calentamiento el 36.0 % del tiempo con temperaturas de hasta 9.7 °C; de confort, el 44.5 %, con temperaturas de entre 16.8 °C y 23.8 °C; y, de sobre calentamiento, el 19.4 %, con temperaturas de hasta 38.3 °C, por lo que con la implementación efectiva de ventilación natural controlada es posible paliar el sobre calentamiento hasta conseguir condiciones de confort térmico, logrando así un periodo total de hasta el **63.9 %** del tiempo respecto al 22.7 % que ofrece el ambiente exterior.

Por su parte, la dinámica térmica que caracterizó al **sustrato regosol**, dejó entre ver que, del total de tiempo de análisis, las condiciones de bajo calentamiento en la cámara de aire se presentan el 34.2 % del tiempo con temperaturas de hasta 9.4 °C; las de confort térmico, el 32.0 %, con temperaturas de entre 16.8 °C y 23.8 °C; y, las de sobre calentamiento, el 33.8 %, con temperaturas de hasta 74.9 °C, por lo que, al igual que en el caso anterior, el empleo sensato y consiente de algunas estrategias de diseño bioclimático, son la clave para garantizar hasta un **65.8 %** del tiempo en condiciones de confort, obteniéndose así esta condición hasta tres veces más del tiempo que se presenta en el exterior (22.7 %). Por otra parte, en la masa térmica, el 21.5 % del tiempo se presentan condiciones de bajo calentamiento con temperaturas de hasta 11.5 °C; el 51.5 %, de confort con temperaturas de entre 16.8 °C y 23.8 °C; y, el 27.0 %, las de sobre calentamiento con temperaturas de hasta 34.0 °C, magnitudes térmicas que no requieren modificarse dado que forman parte del núcleo del muro Trombe, el cual no podría habitarse. Por último, en el espacio de interés para el diseño arquitectónico (espacio interior), se presentan condiciones de bajo calentamiento el 42.4 % del tiempo con temperaturas de hasta 8.9 °C; de confort, el 38.9 %, con temperaturas de entre 16.8 °C y 23.8 °C; y, de sobre calentamiento, el 18.7 %, con temperaturas de hasta 27.2 °C, por lo que con la eventual apertura y cierre de puertas y/o ventanas es posible mermar el sobre calentamiento a fin de lograr hasta el **57.6 %** del tiempo en condiciones de confort respecto al 22.7 % que ofrece el ambiente exterior, equivalente a 2.5 veces más de tiempo.

Por último, el estudio relacionado al **sustrato phaeozem**, determinó que, del total del periodo analizado, las condiciones de bajo calentamiento en la cámara de aire se presentan el 34.1 % del tiempo con temperaturas de hasta 9.3 °C; las de confort térmico, el 31.3 %, con temperaturas de entre 16.8 °C y 23.8 °C; y, las de sobre calentamiento, el 34.6 %, con temperaturas de hasta 72.5 °C, por lo que empleando estrategias de diseño bioclimático para neutralizar este último periodo, es posible garantizar hasta un **65.9 %** del tiempo en condiciones de confort, muy por encima del 22.7 % del tiempo que se presentan dichas condiciones en el exterior. Por otra parte, en la masa térmica, el 25.3 % del tiempo se presentan condiciones de bajo

calentamiento con temperaturas de hasta 11.5 °C; el 52.6 %, de confort con temperaturas de entre 16.8 °C y 23.8 °C; y, el 22.1 %, las de sobre calentamiento con temperaturas de hasta 31.2 °C, condiciones que por ser el núcleo del muro Trombe y, por ende, ser inhabitable se mantienen constantes en todo momento. Por último, en el espacio de interés para el diseño arquitectónico (espacio interior), se presentan condiciones de bajo calentamiento el 43.0 % del tiempo con temperaturas de hasta 8.9 °C; de confort, el 38.4 %, con temperaturas de entre 16.8 °C y 23.8 °C; y, de sobre calentamiento, el 18.5 %, con temperaturas de hasta 39.7 °C, por lo que con la implementación efectiva de ventilación natural controlada es posible paliar el sobre calentamiento hasta conseguir condiciones de confort térmico, logrando así un periodo total de hasta el **56.9 %** del tiempo respecto al 22.7 % que ofrece el ambiente exterior, equivalente al 2.5 veces más del tiempo.

De manera condensada, la mayor efectividad de los tres sustratos analizados la presentó el suelo **cambisol**, ubicado a los alrededores de la colonia Moderna, de acuerdo con el mapa digital¹⁸ del INEGI (2022), pues la oscilación térmica conseguida correspondió de 14.3 °C a 26.6 °C, en promedio, valores que contribuyen con la habitabilidad ambiental del espacio interior a partir de una oscilación no mayor a 12.3 °C entre el día y la noche a lo largo del periodo de estudio, a diferencia de la oscilación térmica presentada con el sustrato regosol (14.0 °C) y el sustrato phaeozem (14.1 °C). Además, la estabilidad térmica lograda a lo largo del periodo de estudio es la que podría ofrecer hasta 63.9 % del tiempo en condiciones de confort, respecto al 22.7 % del tiempo que de forma natural se ofrece en el exterior con condiciones de entre 11.2 °C y 19.1 °C.

Para finalizar, es importante reconocer que algunos de los factores que probablemente influenciaron en el comportamiento del desempeño térmico del muro Trombe en cada uno de los módulos experimentales, fueron: El espesor limitado de la masa térmica (entre 0.20 m y 0.22 m) y la junta en el interior generada entre la parte inferior del muro y el módulo (ya que ésta presentó infiltraciones en los diferentes prototipos). Además, como recomendación, sería importante construir un cuarto módulo con las mismas características físicas, geométricas y de operatividad

¹⁸ <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF00jMxLjgwNTE2LjY0NDA2LHo6OCxsOmM0MTY=>

que las presentadas con los módulos experimentales descritos a lo largo del documento, con el fin de contar con un referente que no integre elemento de calentamiento pasivo alguno en aras de referenciar los resultados obtenidos en esta investigación con la Arquitectura contemporánea que se estaría simulando con dicho módulo convencional.

REFERENCIAS

- ANSI/ASHRAE 41.1. (26 de October de 1986). Standard method for temperature measurement. Atlanta.
- Arzoz, M. (23 de Diciembre de 2014). *Arquine*. Recuperado el 20 de Febrero de 2020, de Arquine: <https://www.arquine.com/habitabilidad-y-arquitectura/>
- Ayuntamiento de Ensenada. (2010). *Enciclopedia de los municipios de Baja California*. Recuperado el 5 de Marzo de 2020, de Enciclopedia de los municipios de Baja California: <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM02bajacalifornia/municipios/02001a.html>
- AZ Instrument Corp. (2022). *AZ Instrument Corp*. Recuperado el 19 de Abril de 2022, de AZ Instrument Corp.: <https://www.az-instrument.com.tw/es/2-1905-156267/product/Registrador-de-datos-con-term%C3%B3metro-y-sonda-de-temperatura-externa-id616357.html>
- Baño Nieva, A. (s.f.). Recuperado el 18 de Diciembre de 2019, de https://portal.uah.es/portal/page/portal/epd2_asignaturas/asig32954/informacion_academica/Introducci%C3%B3n%20a%20la%20construcci%C3%B3n%20sostenible%20I.pdf
- Cengel, Y., & Boles, M. (2011). *Termodinámica* (Vol. 7ma edición). McGraw-hill.
- ELITECH. (2022). *ELITECH*. Recuperado el 19 de Abril de 2022, de ELITECH: <https://www.elitechlog.com/wp-content/manuals/rc-51h-instructions.pdf>
- Fernández-Gonzalez, A. (2007). Analysis of the thermal performance and comfort conditions produced. *Solar Energy*, 81, 581-593.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. México, México: McGRAW-HILL/ INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- HTI. (2020). *HT-02 Manual*. Recuperado el 22 de Mayo de 2020, de HTI Instruments: <https://tidio-files.s3.amazonaws.com/13d9dfc43adbe14458ba20c096d8b121.pdf>
- Huerta Tapia, B. Y. (2018). *Manual de diseño pasivo para el arquitecto: Un reflejo del análisis climático y bioclimático de Ensenada, Baja California*. Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Ensenada. Recuperado el Diciembre de 2019
- INEGI. (2022). Obtenido de <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF00jMxLjgwNTEtXGxvbjotMTE2LjYONDA2LHo6OCxsOmMOMTY=>
- INLIFE. (2020). *Instruction manual Infrared Thermometer CW364*. Recuperado el 22 de Mayo de 2020, de Gearbest: https://mx.gearbest.com/temperature-instruments/pp_009969111324.html
- ISO 7726. (1998). *Ergonomics of the thermal environment — Instruments for measuring physical*. Genève.

- Luna León , A., Bojórquez Morales, G., Romero Moreno, R., Gallegos Ortega, R., & Corral Martínez, M. (Enero de 2014). *ResearchGate*. Recuperado el 15 de Febrero de 2020, de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/267544467_Desempeno_termico_en_variaciones_de_muro_Trombe_en_clima_calido_seco_extremoso
- Molina, N. (Diciembre de 2005). *ResearchGate*. Recuperado el 20 de Febrero de 2020, de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/317162163_Que_es_el_estado_del_arte
- Pereira, M. (14 de Febrero de 2018). *Archdaily*. Recuperado el 6 de Enero de 2020, de Archdaily:
<https://www.archdaily.mx/mx/889075/ventilacion-cruzada-efecto-chimenea-y-otros-conceptos-de-ventilacion-natural>
- Real Academia Española. (20 de Febrero de 2020). *Real Academia Española*. Recuperado el 20 de Febrero de 2020, de <https://dle.rae.es/habitabilidad>
- Rincón Martínez, J. C. (Junio de 2015). *Academia.edu*. Recuperado el 20 de Mayo de 2020, de https://www.academia.edu/14663991/Cap%C3%ADtulo_3_-_Confort_T%C3%A9rmico_en_Bioclima_Semi-Fr%C3%ADo_Estimaci%C3%B3n_a_partir_de_los_Enfoques_de_Estudio_Adaptativo_y_Predictivo
- Rueda Mateos, A. (Julio de 2014). *Universidad Autónoma Metropolitana*. Recuperado el Febrero de 2020, de file:///C:/Users/yulii/Documents/TESIS/Estado%20del%20Arte/Diseno_y_evaluacion_de_soluciones_Rueda_Mateos_A_2015.pdf
- Sagastume González, W. (Marzo de 2006). Recuperado el 18 de Diciembre de 2019, de <http://recursosbiblio.url.edu.gt/publi/ppm/2014/Tesis/2006/03/06/Sagastume-Wendy.pdf>
- Soler Palau. (09 de Abril de 2018). *Soler Palau*. Recuperado el Febrero de 2020, de <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/humedad-relativa-especifica-absoluta/>
- Tasdemiroglu, E., Ramos Berjano, F., & Tinaut, D. (2 de Enero de 1982). *Elsevier*. Recuperado el 16 de Febrero de 2020, de Elsevier:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038092X83902104>
- Tomás Franco, J. (05 de Enero de 2011). *Archdaily*. Recuperado el 18 de Diciembre de 2019, de Archdaily: <https://www.archdaily.mx/mx/02-68622/en-detalle-muro-trombe>
- Wilson, A. (1979). *Thermal Storage Wall Design Manual*. Albuquerque, New Mexico: MEXICO SOLAR ENERGY ASSOCIATION.