



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA
SISTEMAS DE NATURACIÓN EN ENVOLVENTES VERTICALES

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE MUROS VEGETALES
MODULARES CON FIBRA DE COCO

TESIS:

Que para optar por el grado de:

MAESTRA EN ARQUITECTURA

Campo de conocimiento: Tecnologías

Presenta:

MARIA CAMILA RESTREPO BARRERA

Tutor Principal:

Dra. Dolores Ana Flores Sandoval

Facultad de Arquitectura, UNAM

Comité tutor:

Mtro. Arturo Valeriano Flores

Facultad de Arquitectura, UNAM

Dra. Isabel Rocío López de Juambelz

Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM

Dra. Ilse García Villalobos

Facultad de Arquitectura, UNAM

Dr. José Diego Morales Ramírez

Facultad de Arquitectura, UNAM

Ciudad Universitaria, Cd. Mx.,

Diciembre de 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Estoy enormemente agradecida con la **Universidad Nacional Autónoma de México** y con el **Posgrado en Arquitectura**, por acogerme y darme la increíble oportunidad de crecer profesional y personalmente, haciendo parte de esta magnífica comunidad. Le doy gracias a también a **CONACYT** por apoyarme económicamente durante este proceso para que este resultado fuera posible.

Le agradezco a mi tutora la **Dra. Dolores Ana Flores Sandoval** por su apoyo, paciencia y dedicación para la gestión, estructuración y finalización de este trabajo. A mis **cotutores, sinodales y maestros**, por sus enseñanzas, su tiempo y dedicación. Agradezco de manera muy especial a la Dra. Ilse García Villalobos por su apoyo, amabilidad y disposición para compartir experiencias y conocimientos que fueron muy importantes como base de este trabajo de investigación.

Dedico este trabajo a **mi papá, mi mamá y mi hermana**. A pesar de las dificultades y la lejanía, ustedes siempre tuvieron una palabra de apoyo y motivación, impulsándome siempre a crecer y seguir adelante. Les agradezco profundamente su comprensión y amor incondicional. **¡Este logro es de los cuatro!**

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	i
1. VEGETACIÓN EN LA ENVOLVENTE	1
1.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA VEGETACIÓN EN LA ENVOLVENTE.	1
1.2. BENEFICIOS DE LA VEGETACIÓN EN LA ARQUITECTURA.....	3
1.3. INTEGRACIÓN DE LA VEGETACIÓN EN LA ARQUITECTURA CONTEMPORÁNEA.....	9
2. NATURACIÓN VERTICAL.....	20
2.1. TIPOS Y CONFIGURACIÓN.....	20
2.2. DISEÑO DE MUROS VERDES	28
3. MUROS VERDES MODULARES CONTENEDORES DE SUSTRATO.....	40
3.1. PRINCIPALES MATERIALES EMPLEADOS EN SUSTRATOS PARA NATURACIÓN	41
3.2. PROPIEDADES DE LOS SUSTRATOS	42
3.3. LA FIBRA DE COCO EN SISTEMAS DE NATURACIÓN VERTICAL DE ENVOLVENTES	49
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	51
4.1. EXPERIMENTACIÓN EN CAMPO	52
4.2. CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO.	70
5. RESULTADOS.....	76
5.1. PARÁMETROS FÍSICOS	76
5.2. PARÁMETROS QUÍMICOS.....	80
5.3. COBERTURA VEGETAL	82
5.4. DESEMPEÑO TÉRMICO	89
6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	123
CONCLUSIONES	133
ANEXOS	131
GLOSARIO.....	136
REFERENCIAS.....	0

INTRODUCCIÓN

La crisis vivida durante la pandemia por COVID-19, ha puesto en evidencia la vulnerabilidad de la raza humana y nos demuestra la importancia del vínculo que existe entre nuestra salud y el medio ambiente. La densificación y el crecimiento exponencial de la urbanización, amenaza en calidad y proporción la infraestructura verde de las ciudades, causando un grave desequilibrio ambiental y condiciones nocivas para los habitantes. El mantenimiento, protección y desarrollo de las áreas verdes urbanas es indispensable para conservar y mejorar la calidad de vida al interior de las ciudades. Las áreas verdes permiten la preservación de la biodiversidad, regulan las temperaturas y, por ende, los efectos de la isla de calor¹, amortiguan los niveles de ruido, reducen partículas y contribuyen a la limpieza y generación de oxígeno. Además, ayudan a reducir la ansiedad, el estrés e impacta positivamente en las respuestas sociales frente al espacio urbano.

Uno de los problemas más evidentes por esta pérdida del espacio vegetado es el incremento de las temperaturas al interior de las ciudades o las llamadas Islas de Calor Urbanas, en donde se llegan a tener hasta 3°C más a comparación de las áreas menos densificadas (Arup GmbH, 2016), entre otras razones, causadas por la predominancia de materiales duros, impermeables, que irradian calor al exterior en lugar de absorberlo. Como consecuencia, se obtienen temperaturas fuera del rango de confort térmico, tanto al exterior como al interior de las edificaciones, dando paso al uso excesivo de sistemas de climatización artificial.

Por el contrario, las plantas absorben la energía del sol, proporcionan sombra y realizan el proceso de evapotranspiración, siendo elementos naturales reguladores

¹ Fenómeno que se produce al interior de las ciudades que consiste en el aumento de la temperatura debido a comportamiento térmico de los materiales que predominan en las zonas urbanas

de la temperatura. Por tal motivo, la búsqueda de espacios verdes alternativos se vuelve esencial, encontrando en las envolventes de los edificios grandes oportunidades de aprovechamiento para la reposición de la superficie del suelo ocupada, y aún más, como complemento y medida de desarrollo de la infraestructura vegetal de los centros urbanos. De esta forma, han surgido conceptos como naturación, cubiertas verdes, muros verdes, o jardines verticales, que buscan integrar la vegetación por medio de diversos sistemas constructivos a la arquitectura, aprovechando superficies subutilizadas como cubiertas, colindancias o fachadas.

Existen diversos tipos de sistemas de naturación vertical, los cuales, se pueden clasificar de diferentes maneras. Para términos de esta investigación, se clasificarán según su medio de crecimiento: Sistemas Hidropónicos o de medio de crecimiento inerte y Contenedores de sustrato o de medio de crecimiento químicamente activo. Los sistemas hidropónicos tienen grandes ventajas; con adecuados cuidados, logran una muy alta cobertura vegetal, son ligeros, económicos y de fácil instalación. Sin embargo, requieren de constantes ciclos de riego a diario, ya que, el medio en el que se desarrollan es inerte y los nutrientes son suministrados a las plantas mediante fertirrigación, resultando en un alto consumo energético y una alta necesidad de mantenimiento, limitando la sostenibilidad de estos sistemas. Por otro lado, en los sistemas de naturación vertical con Contenedores de sustrato, es el mismo sistema el que le proporciona los nutrientes a la vegetación, además de tener la capacidad de absorber y retener el agua. Sin embargo, por efectos de la gravedad, dada su posición en vertical, el sustrato se compacta, perdiendo las propiedades que posibilitan un buen desarrollo vegetal. Por tal motivo, presentan una gran oportunidad para el estudio de nuevos materiales que puedan proporcionarle al sustrato una estabilidad física, alta capacidad de retención hídrica, alta porosidad y que, además, sean ligeros. Estudios anteriores han demostrado que la fibra de coco, además de ser un material muy ligero, tiene una porosidad muy elevada, mantiene

su estructura con el tiempo y tiene una alta capacidad de retención hídrica, por lo que, cumple con las características anteriormente mencionadas y es un material con un alto potencial para mejorar y transformar los sistemas de naturación en vertical. Así entonces, se puede lograr un sistema de naturación para aprovechar las superficies verticales de las edificaciones, integrándose como sistema constructivo a la edificación de manera eficiente, y junto a otros beneficios, se logre disminuir la fluctuación térmica sobre las fachadas de las edificaciones.

OBJETIVO

Evaluar el efecto que tiene en el desarrollo vegetal y en el desempeño térmico de la envolvente arquitectónica el uso de la fibra de coco como componente estructurante del sustrato de un muro verde modular, mediante un modelo experimental factorial.

HIPÓTESIS

Si la fibra de coco posee características que posibilitan un buen desarrollo vegetal en muros verdes, entonces, otorgará beneficios de regulación térmica sobre las fachadas de las edificaciones.

- Si la fibra de coco posee características deseables para el sustrato en sistemas de naturación en vertical como: alta porosidad, baja densidad, y alta retención hídrica, entonces, al agregar fibra de coco de manera proporcional a una mezcla de sustrato con igual contenido de materia orgánica, mineral y drenante, se podrá mantener la vegetación en excelente estado.

- Si el sustrato es el componente que brinda mayor regulación térmica y la fibra de coco tiene propiedades aislantes, entonces, entre más fibra de coco haya, mejor será la regulación térmica sobre la superficie de la envolvente, dadas sus propiedades de conductividad térmica.
- A mayor desarrollo vegetal, mejor será la capacidad de regular térmicamente la envolvente de la edificación, y de esta forma, se podrá limitar las fluctuación térmica sobre la envolvente de la edificación.

Para efectos de comprobación de la hipótesis, se realizó un modelo experimental factorial, en el que se evaluó un sistema de naturación vertical con contenedores de sustrato, incorporando fibra de coco en una mezcla de sustrato evaluada y probada anteriormente en diversas investigaciones. De este modo, se evaluó el efecto del tamaño de la fibra de coco y la proporción incorporada al sustrato, sobre el desarrollo vegetal, y, en consecuencia, el desempeño térmico de los diferentes módulos. Se obtuvo un registro quincenal de la cobertura vegetal y se tomaron mediciones de temperatura en diferentes planos de cada contenedor o módulo. De esta forma, y apoyado con una caracterización física y química de cada mezcla en laboratorio, se pudo identificar las mezclas de sustrato más y menos favorecedoras para posibilitar una cobertura vegetal mayor a 60%, y si aquella con mayor cobertura vegetal logra disminuir en un 50% los picos altos y bajos de temperaturas, sobre la superficie de la edificación.

		TAMAÑO		
		A Fina	B Grande	
PROPORCIÓN	1	70 % Fibra de Coco 30% Mexcla de Referencia	1A	1B
	2	30% Fibra de Coco 70% Mexcla de Referencia	2A	2B

1. VEGETACIÓN EN LA ENVOLVENTE

1.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA VEGETACIÓN EN LA ENVOLVENTE ARQUITECTÓNICA.

El uso de vegetación en la envolvente de los asentamientos ha sido una técnica constructiva implementada desde tiempos antiguos, en donde la necesidad de protección, cobijo y adaptación al medio, han llevado al hombre a buscar nuevas formas de transformación del espacio habitado con materiales disponibles proporcionados por el entorno.

Los métodos empleados varían y se ajustan de acuerdo con los diferentes climas, regiones y temporalidades. Las primeras evidencias del uso de la vegetación, como césped o turba, están ubicados en zonas nórdicas, donde las excelentes cualidades termoreguladoras, resultantes de la capa de tierra más el elemento vegetal, mantenían el calor en el espacio interior durante el invierno, y durante el verano, tenían la capacidad de aislarlo, manteniendo un confort permanente (Acosta, 2011). (Ver imagen.1 y .2) Alrededor del año 600 A.C fueron construidos los llamativos Jardines Colgantes de Babilonia, lo cuales estaban formados por terrazas escalonadas, ahuecadas, donde se plantaban los árboles formando un conjunto de murales verdes, que, además de proporcionar un gran sentido estético, ofrecían sombra y grandes beneficios térmicos tanto al interior como al exterior (Acosta, 2011) (Hernández, 2015). (Ver Imagen.3)

Los romanos incluyeron también en sus palacios y mausoleos zonas extensas de vegetación, jardines colgantes y arbolado para adornar tanto espacios interiores como exteriores. Durante el periodo gótico, el uso de enredaderas, guirnaldas y ramos florales minimizaba el impacto de la solidez de la mampostería en la arquitectura. (Ver imagen.4)



Imagen 1. Casa de turba Islandia. Fuente: <https://lacomunidaddelroble.wordpress.com/2015/08/01/casas-islandesas-de-cesped-o-turba/>



Imagen 2 Necrópolis de Banditaccia. Fuente: <https://whc.unesco.org/es/list/1158>



Imagen 3. Jardines de Babilonia. Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=kInwMwZFjjY>



Imagen 4. Jardines de Babilonia. Fuente: <http://antareshistoria.com/el-mausoleo-de-augusto/>

Ya a finales del siglo XIX, el desarrollo de la industria química que suministra láminas impermeables y la simplificación del proceso constructivo de la cubierta por factores económicos dio paso al uso generalizado de la cubierta plana (Hernández, 2015). Se inician movimientos socialistas liderados por Charles Fourier y Robert Owen que muestran su preocupación por el impacto de la revolución industrial en el ambiente. De esta forma se inicia una línea urbanística que incorpora la cubierta dentro de los espacios habitables, dando pie a jardines vegetados en las cubiertas de las edificaciones (García, La vegetación como sistema térmico en la naturación extensiva de cubiertas, 2011). A partir del siglo XX, surgió un interés por crear la ciudad idónea, por lo que surgen modelos urbanísticos utópicos y Ebenezer Howard instaure el modelo de Ciudad Jardín, a partir del cual, nace el concepto de ciudad

autosostenible e integra la naturaleza y la vegetación como parte esencial de los sistemas urbanos del momento. (Alvarez, 2015)

Arquitectos como Frank Lloyd Wright y Le Corbusier, instauraron un respeto por la forma del diseño y la integración con los alrededores naturales. En la mayoría de sus proyectos hacían uso de la vegetación, bien sea proyectando zonas urbanas vegetadas, incluyendo vegetación en sus cubiertas o simplemente integrando la vegetación con el diseño de la edificación. En los ensayos escritos por Le Corbusier, el arquitecto habla de “la quinta fachada”, un espacio que debía utilizarse como área de recreación y como modo de compensación del área verde consumida por el edificio (Hernández, 2015). Estos modelos presentados por arquitectos de tal renombre instauraron un punto de partida para la noción actual en cuanto a la integración de la vegetación en la arquitectura.



Imagen 5. La Villa Savoye – Le Corbusier. Fuente: <http://elplanz-arquitectura.blogspot.com/2012/06/le-corbusiervilla-savoye.html>

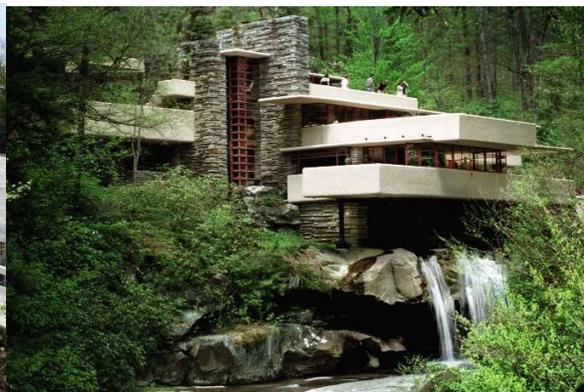


Imagen 6. Falling Water House – Frank Lloyd Wright. Fuente: <http://www.wesa.fm/post/flood-topples-statue-iconic-fallingwater-house#stream/0>

1.2. BENEFICIOS DE LA VEGETACIÓN EN LA ARQUITECTURA.

- REDUCCIÓN DEL CALENTAMIENTO URBANO.

El incremento en la temperatura promedio de las ciudades con respecto a las periferias y a las zonas rurales es lo que se llama efecto *Isla de calor*. Está ocasionado principalmente por las superficies sólidas e impermeables que cubren todo el manto

de la ciudad, tales como: aceras de concreto, calzadas de asfalto, vidrio, metal, etc. Estas superficies irradian calor en lugar de absorberlo, lo que aumenta significativamente la temperatura de la ciudad y, en consecuencia, se genera un mayor consumo de energía y escasa circulación del aire. Los espacios naturales y las superficies permeables, así como algunos colores, absorben la radiación significativamente (Arup GmbH, 2016). **La transformación de las envolventes tanto en cubierta, como en fachada permitiría reemplazar superficies duras generadoras de calor, por superficies vegetadas que, además de absorber la radiación, permiten la generación de microclimas, evitando el incremento exponencial de la temperatura de la ciudad y reduciendo el consumo de energía.** Únicamente entre el 5% y el 30% de la radiación solar atraviesa las hojas, absorbiendo un 70% de la radiación solar, esto sin tener en cuenta los otros componentes de la envolvente vegetal. La evapotranspiración² y el sombreado también influyen en la disminución de la temperatura tanto al exterior como al interior de la edificación. (Flores, 2017)

Los beneficios de una red distribuida de infraestructura verde pueden alcanzarse con facilidad y a precios económicos implementando políticas públicas favorables. Las fachadas y muros vegetados son más efectivos para reducir la isla de calor urbana **en ciudades con proporción alto-ancho del perfil urbano superior a 2, en los que se logró demostrar una reducción de los picos de temperatura hasta de 10°C. En ciudades con un clima más cálido, fachadas vegetadas con una relación alto-ancho menor a 1, resultó una reducción del 8%** (Arup GmbH, 2016).

² Cantidad de agua devuelta a la atmósfera resultado del proceso de transpiración de las plantas más la evaporación directa de la superficie.

- REGULACIÓN TÉRMICA.

La regulación térmica en las edificaciones es fundamental en zonas climáticas donde se crean diferencias drásticas de temperaturas a lo largo del día y la noche, lo que dificulta alcanzar una temperatura de confort térmico al interior de las edificaciones, resultando en el uso de sistemas de ventilación y calefacción para mantener temperaturas de confort al interior de los espacios. Existen diversas formas pasivas de darle solución a esta problemática, una de ellas: la implementación de la naturación como sistema constructivo en las edificaciones. La sombra directa es uno de los beneficios más evidentes de la vegetación, su composición y las características del sistema aportan a la reducción de la fluctuación térmica³. El colchón de aire encerrado hace de aislante térmico, su efecto depende necesariamente de su densidad y espesor. Adicionalmente, una densa vegetación impide que el viento llegue a la superficie del sustrato, por lo que la pérdida de calor disminuye (García, 2011). La evaporación del agua genera un fenómeno llamado enfriamiento evaporativo, el cual, consiste en que las moléculas de agua consumen energía en forma de calor para evaporarse, lo que provoca la disminución de temperatura.

Se ha comprobado mediante el análisis del desempeño térmico de las diferentes capas que componen los sistemas de naturación, **que el sustrato es el agente con mayor incidencia en la reducción térmica y que existen especies vegetales que mejoran el desempeño térmico, reduciendo hasta 10°C la fluctuación térmica de áreas naturadas respecto áreas sin naturación** (García, 2011).

³ Amplitud en la diferencia de temperaturas mínima y máxima

- AISLAMIENTO ACÚSTICO.

La organización mundial de la salud cita al ruido como una de las principales molestias ambientales, reducen la productividad laboral, interrumpen el sueño, y contribuyen a la aparición de enfermedades cardiovasculares y mentales. Las fachadas verdes pueden reducir los niveles de ruido de tráfico hasta en 10 dB. Su desempeño acústico es más eficiente a media que aumenta la distancia respecto al origen del ruido (Arup GmbH, 2016). La eficiencia va a depender del tipo de planta, la densidad y composición del medio de crecimiento o sustrato, ubicación y frecuencia de sonido (Flores, 2017). La reducción del ruido consiste en la transformación de la energía sonora en energía de movimiento y energía calórica (García, 2011). El sonido que llega al follaje es amortiguado mediante reflexión, refracción y absorción de la energía acústica (Acosta, 2011).

- CALIDAD DEL AIRE.

Existen diversos factores que afectan la calidad del aire, contaminantes gaseosos como el dióxido de carbono y el monóxido de carbono, o material particulado que consiste en partículas líquidas y sólidas de sustancias orgánicas e inorgánicas que se encuentran en suspensión en el aire. La calidad del aire es un indicador clave para la salud pública, dado que respirar aire contaminado genera o empeora enfermedades como asma y cáncer de pulmón (Arup GmbH, 2016). La vegetación urbana tiene el potencial de filtrar partículas menores a 10 micrones de diámetro (Arup GmbH, 2016), actuando como filtros con respecto a estos contaminantes, los cuales se depositan en la superficie de las plantas por medio de: sedimentación por gravedad, impactación por remolinos de aire y deposición por precipitación (García, 2011). La Naturación de envolventes verticales, puede reducir localmente la concentración de partículas en suspensión en el aire entre un 10% y un 20%, sin embargo, el grado de

reducción depende en gran medida de la altura de los edificios respecto al ancho de las calles (Arup GmbH, 2016).

- *RETENCIÓN HÍDRICA.*

Una de las mayores preocupantes causadas por la densificación y el uso predominado de superficies impermeables, es la intensificación de las aguas lluvias de escorrentía⁴ por el uso predominante de superficies duras e impermeables, sobre superficies vegetales blandas permeables. Esta condición afecta el ciclo natural del agua⁵, impidiendo el adecuado traspaso del agua lluvia al subsuelo. El crecimiento del espacio urbano genera afectaciones que se ven reflejadas en las fuertes lluvias. El espacio urbano crece y agota los espacios en los cuales el agua se infiltra en el subsuelo (González, 2017). El caudal aumenta y aumenta la presión sobre los sistemas de drenaje, incrementando el riesgo a inundaciones, lo que lleva a una gran inversión en el mantenimiento y actualización de los sistemas de alcantarillado.

Por su ubicación y sus características físico-geográficas y climáticas, dado que está delimitada por montañas, la Ciudad de México es muy propensa a inundaciones. Desde tiempo de los Mexicas, quienes construyeron una de las ciudades más habitadas de su época, también se vieron enfrentados al agua, desarrollando infraestructura como depósitos de agua, diques y taludes para controlar los lagos que constituían la zona (Nuñez, 2018). Allí mismo fue edificada la ciudad, obstruyendo y desviando los cauces naturales del agua e impermeabilizando el suelo con el uso del concreto. Así mismo, la ciudad obtiene el agua potable de su propio subsuelo, provocando un hundimiento promedio de 10 cm al año (Rodea, 2016),

⁴ La cantidad de agua que no se infiltra en el suelo fluyendo sobre la superficie y llevando todo tipo de contaminantes en su paso hacia los afluentes hídricos.

⁵ Es el proceso de circulación del agua entre la hidrósfera, la atmósfera y el suelo. Esta se evapora por incidencia del sol, se condensa y al contenerse en las nubes cae de nuevo al suelo en forma líquida, allí corre o se infiltra al suelo y vuelve a iniciar el ciclo.

resultando en un hundimiento diferencial que, bien sea, daña las tuberías, o, se invierte el drenaje haciendo que el agua regrese en vez de salir (Guzman, 2017). En consecuencia, y sumado a un sistema de drenaje insuficiente para estas condiciones, ya que, además, el sistema de aguas negras es el mismo que recolecta aguas lluvias (González, 2017), se producen inundaciones y encharcamientos superiores a 30 milímetros en un promedio de 3 veces al mes. Las superficies, en su mayoría las envolventes de los edificios son el primer punto de contacto del agua con la tierra, por lo que tienen un papel muy importante en el transcurso del agua hacia el subsuelo. Las envolventes vegetales tienen gran potencial de absorción y reducción de agua. Estas actúan como amortiguador, permitiendo retener y almacenar el agua, con el fin de reducir el volumen de agua y el tiempo entre la precipitación y la evacuación. (Arup GmbH, 2016). La cantidad de retención de aguas pluviales depende directamente de las características del sustrato, la capacidad de campo⁶, porosidad, textura, espesor y el sistema de drenaje. Para un sustrato de espesor de 6 cm, la retención promedio es de 67%. (García, 2011).

- *BIODIVERSIDAD.*

A medida que las ciudades crecen y demandan cada vez más recursos, el modo en el que construimos tiene un impacto cada vez mayor sobre la biodiversidad (Arup GmbH, 2016). El sistema ecológico a escala urbana se vería muy beneficiado con el reemplazo de superficies duras por superficies vegetadas. El aumento de la biodiversidad en los ecosistemas urbanos tiene un impacto positivo en la calidad de vida y llama a preservar la biodiversidad en los ecosistemas naturales (Arup GmbH, 2016). Las fachadas y cubiertas vegetadas deben diseñarse como parte de un ecosistema funcional, lo cual abarca desde permitir conscientemente la colonización

⁶ Es la capacidad máxima de absorción hídrica que tiene el suelo antes de que haya un escurrimiento.

espontánea, hasta recrear ecosistemas (Arup GmbH, 2016). Esto permitiría la restauración tanto de la flora, como de la fauna silvestre dentro de los ambientes urbanos como pájaros, abejas, mariposas.

Psicológico.

La importancia de la naturaleza en el bienestar humano es intrínseca a él, la cual, puede ser una fuente de inspiración, regeneración mental y reducción del estrés (Arup GmbH, 2016). Las personas suelen sentirse mejor en un ambiente verde debido a nuestro sentido de conexión con la naturaleza y con otras formas de vida. En general, el ser humano se siente mejor con algo que está vivo, este fenómeno es llamado Biofilia (Flores, 2017).

La vegetación a nivel estético representa una gran oportunidad para la mejora de la visual y el perfil urbano, repercutiendo en la mejora de la calidad de vida de los habitantes. Debido a su regeneración, los espacios verdes proporcionan una estética permanente y cambiante. Esto proporciona una variedad de colores y efectos paisajísticos que le otorgan una mejor calidad al ambiente urbano. Este aporte de sentido estético que impacta en la percepción de espacios, en la apropiación de estos y tiene efectos sobre el hombre que mejoran sus actitudes, su productividad y su concentración (García, 2011).

1.3. INTEGRACIÓN DE LA VEGETACIÓN EN LA ARQUITECTURA CONTEMPORÁNEA.

1.3.1. EL MERCADO DE LA VEGETACIÓN EN LA ARQUITECTURA

La naturación de envolventes es una medida que mitiga los impactos de esta desmesurada densificación y permite la recuperación de espacios verdes, multiplicando los beneficios que estos presentan para el equilibrio y la vida. Recientemente a nivel mundial se ha incrementado el interés por la protección de medio ambiente y la construcción sostenible. Se espera que, a nivel mundial, el

mercado de los jardines verticales tenga un crecimiento del 11.1% anual entre el 2017 y el 20217. En el 2012 se estimaba que el mercado de azoteas verdes crecería de \$5.3 billones a \$7.7 billones de dólares entre el 2011 y 2017 a nivel mundial, mientras que el de los muros verdes sería de 680 millones de dólares.

Países como Alemania y Francia son pioneros en la naturación de envolventes. Desde 1971 surge la iniciativa de naturar barrios enteros mediante el uso de cubiertas ecológicas, cubriendo 11% de la superficie total de las cubiertas en Alemania (Hernández, 2015). Actualmente se llegan a naturar aproximadamente 4 millones de m² anuales, tendencia que también ocurre en Islandia, Escandinavia y Estados Unidos donde esta técnica es cada día más frecuente (García, 2011).

México y Colombia son precursores en América Latina y han tenido un crecimiento exponencial en el tema. En el 2018 el 44% de las firmas de arquitectura tienen en más del 60% de sus proyectos elementos de naturación vertical de envolventes, con un aumento del 20% entre el 2015 y el 2018 para los dos países.⁸

En México se ha visto una intención, cada vez mayor de la implementación de superficies naturadas, tanto en cubiertas, como en muros. El gobierno de Ciudad de México tiene descuentos de hasta el 10% en el pago del predial a inmuebles que tengan cubiertas verdes⁹. Según el inventario de áreas verdes de SEDEMA, al 2017 se habían naturado 44,883m² de azoteas en Ciudad de México. A esta cifra se le suma la instalación 60.000m² de muros verdes en las columnas del eje vial principal de la ciudad en el 2018. (Hernández, 2015) Se han creado asociaciones para la naturación de azoteas como la Naturación de Azoteas MENA, la fundación Hombre Naturaleza, el Centro de Información y comunicación Ambiental de Norteamérica CICEANA, que encuentran en la naturación de edificios una respuesta a las

⁷ Report linker, Global Vertical Construction Market – Global Addressable Market

⁸ Smart Market Report, World Green Building Trends 2016.

⁹ Boletín 202/2015 Implementa Gobierno De La Cdmx Incentivo Fiscal Por Creación De Azoteas Verdes

problemáticas de contaminación del aire y el sobrecalentamiento de las zonas urbanas (García, 2011).

Existe un crecimiento exponencial de la construcción y la implementación de sistemas de naturación de azoteas y de muros verdes, tanto en México como a nivel mundial. Sin embargo, sigue latente la incertidumbre referida a la “moda” de la construcción verde y la construcción sustentable. Así como muchas fuentes lo citan, este mercado hace parte netamente del mercado de construcción sustentable y depende en gran medida de las tendencias que se generen a raíz de este. Por lo que es crucial el momento en el que estamos para convertir los sistemas de naturación en sistemas intrínsecos de la arquitectura, ya que existe una noción global de los sistemas de naturación, una intención y tendencia hacia la construcción verde y el mercado está en crecimiento. Es el momento de mejorar los sistemas y aplicarlos como parte esencial de la edificación.

Los costos de los muros verdes varían según el diseño, el tipo y la complejidad del proyecto. Se pueden encontrar precios desde \$2.000m² a \$3.500 el m², o proyectos más especializados podrían llegar a los \$5.300 el m². Mientras que, las azoteas verdes, se pueden encontrar desde 1.500 a 3.000 pesos el m². (M.C. Restrepo, comunicación personal, 2021)

Actualmente el mantenimiento de un muro verde en buenas condiciones es recomendable realizarlo al menos una vez al mes. El costo varía entre \$100 y \$300 el m² dependiendo del estado del muro verde (M.C. Restrepo, comunicación personal, 2021). Según estudios, por año, el mantenimiento puede llegar a ser la tercera parte del costo de instalación. (Riley, 2016)

Un mantenimiento básico incluye:

- Poda general de todo el muro verde.
- Deshierbe de la vegetación ajena a la original.
- Suministro de minerales nutrientes hidropónicos.

- Calibración de agua de riego del contenedor principal
- Suministro de insecticidas preventivos y/o correctivos en caso de ser necesario.
- Limpieza de ductos, goteros, filtros y demás piezas del sistema de riego.
- Revisión y programación de los tiempos y frecuencia de riego
- Limpieza de filtros y piedras decorativas.

1.3.2. NORMATIVIDAD, GUIAS Y MANUALES

En la actualidad, existen normativas a nivel internacional que regulan y estimulan la creación de superficies vegetadas tanto en cubiertas como en muros o fachadas mediante beneficios tributarios, subsidios y hasta m² construidos adicionales para proyectos que integren y generen zonas verdes en la edificación. Alemania, uno de los países más avanzados y pioneros en temas de naturación de envolventes, ofrece beneficios financieros y posibilidad de subsidios hasta del 60% del costo de la instalación a proyectos que integren este tipo de sistemas (European Climate Adaptation Platform, 2016), con esto, por ejemplo, únicamente para la ciudad de Hamburgo, se planea lograr más de 100 hectáreas de cubiertas verdes hasta el 2026. En Estados Unidos la normatividad difiere en cada uno de los estados, sin embargo, a nivel general está muy ligada con los procesos de certificación LEED, en los que se ofrecen ciertos beneficios y puntajes para la evaluación LEED de cada proyecto. En Tokio toda edificación mayor a 1.000m² por normativa, debe contar con una azotea verde, logrando instalar 1.200 cubiertas verdes al año 2011, mientras que, en Copenhague, Dinamarca, ya es obligatoria la inclusión de cubiertas verdes en todos los proyectos (Comisión Del Cambio Climático, 2016). En México existen algunas acciones cuyo objetivo es incrementar la superficie actual de áreas verdes urbanas de la Ciudad de México, mediante un incentivo fiscal, que consta de la reducción del 10% del impuesto predial para quienes habiliten azoteas verdes en las edificaciones

(Secretaría Del Medio Ambiente), creando así, nuevas posibilidades para la promoción y aumento de áreas verdes en las edificaciones. A pesar de ello, la normativa actual que dirige y controla la implementación de superficies vegetadas en las edificaciones, es aún muy incipiente y genérica. En el 2013, se dio a conocer la norma ambiental NMX-AA-164-SCFI-2013, una norma de aplicación voluntaria para las edificaciones ubicadas en el territorio nacional de uso mixto, habitacional, comercial y de servicios, en la que se determinan criterios y requerimientos ambientales mínimos de una edificación sustentable. Respecto al tema que nos interesa, determina que "el manejo del paisaje y del área verde, debe buscar una integración con el entorno, generar identidad, y contribuir con la calidad estética y la articulación de los sistemas de espacios verdes de la ciudad" En función de lograr lo anterior, según esta, "es posible incluir elementos de naturación, adicionales a los existentes, tales como terrazas, techos y muros verdes, los cuales deben cumplir con: Un consumo de agua eficiente, evitar que las raíces dañen la estructura, considerar la carga extra en la capacidad de soporte de la estructura y el riego adecuado para el correcto crecimiento de las plantas". La norma NADF-013-RNAT-2007 es la norma ambiental para el Distrito Federal, que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación. En ella, se ofrece información acerca de los requerimientos mínimos a satisfacer en proyectos de naturación de cubiertas, tales como, materiales y características de cada uno de los componentes, criterios y condiciones para tener en cuenta en el diseño, medidas de seguridad durante la ejecución del proyecto y especificaciones de operación y mantenimiento. Sin embargo, esta norma es únicamente directriz para la elaboración de cubiertas naturadas.

En la actualidad, a nivel internacional, existen diversos documentos o guías que ofrecen información y orientación en el diseño y ejecución de sistemas de naturación de envolventes, en su mayoría para cubiertas vegetadas. Estas, se han creado de

forma que complementan políticas ambientales en diversos lugares del mundo y sirven como elementos promotores de la construcción verde.

Alemania, como pionero en el tema, en el año 2002, fue precursor de normativas y guías para el establecimiento de cubiertas verdes, mediante la publicación de la guía FLL-Guideline for the Planning, Execution, creando los principios y métodos fundamentales para las cubiertas verdes. (Green Roof Technology, s.f.) Green Roofs For Healthy Cities es una organización que fundamenta su desarrollo en el crecimiento de la industria de muros y cubiertas verdes, por medio de la educación, desarrollo profesional y concientización de los beneficios generados por estos sistemas. La guía propuesta por esta organización Introduction to Green walls Technology, Benefits & Design (2008), entre otras cosas, determina los factores y las consideraciones para tener en cuenta durante el proceso de diseño, instalación y mantenimiento, con el fin de lograr muros verdes y fachadas vegetadas exitosas. A nivel general, algunas consideraciones que se recomienda tener en cuenta en esta guía son: selección de plantas que soporten condiciones climáticas adversas, considerar forzosamente el cálculo de las cargas estructurales adicionales al sistema¹¹. También se mencionan algunos factores para el florecimiento de las especies, donde la irrigación, los microclimas, el medio de crecimiento y el establecimiento de los niveles apropiados de los nutrientes son esenciales. **El medio de crecimiento debe estar diseñado para servir de sustento de las plantas y proveer las necesidades nutricionales.** Otras recomendaciones que determina esta guía son en relación con los microclimas. Tener en consideración aquellos que pueden afectar y e impactar en zonas específicas del sistema, como variaciones de luz, calor y condiciones de humedad (Green Roof Technology, s.f.). Adicionalmente, se menciona que, el mantenimiento que el cliente está dispuesto a proveer es un

¹¹ Como el crecimiento de las plantas, el viento y absorción de aguas lluvias. (Green Roof Technology, s.f.)

factor importante para determinar el tipo de sistema y la selección de plantas (Green Roof Technology, s.f.)

En este mismo documento se habla de la falta de estándares en cuanto a la instalación y diseño de fachadas verdes y muros vegetales y de la falta de políticas para incentivar la construcción de los muros verdes. Sin embargo, como incentivo, se ofrece cierto puntaje en los estándares de valoración LEED, de aplicar sistemas de naturación vertical (Green Roof Technology, s.f.).

Growing Green Guide, es una guía creada en Melbourne Australia, que acompaña un movimiento de construcción verde. Esta guía proporciona información completa y necesaria para el entendimiento de la naturación de envolventes, definiciones y beneficios, tanto de muros como de cubiertas. Incluye una guía técnica que provee factores necesarios para tener en cuenta durante las etapas de diseño, construcción y mantenimiento de estos sistemas. Antes de iniciar a diseñar un muro verde, es realmente importante entender en su totalidad las características del sitio. Dentro de los factores climáticos para tener en cuenta son: la ubicación y altura del muro verde, velocidad del viento¹², el agua lluvia generalmente no es suficiente para satisfacer las necesidades de un muro verde durante todo el año, por lo que es importante establecer fuentes de riego adicionales ¹³, radiación solar, que depende de la orientación y temperatura y microclimas dentro del mismo sistema.

Las decisiones más importantes sobre estos sistemas están tomadas en la etapa de diseño, se deben considerar las condiciones de los diferentes niveles del muro verde, incluir una variedad de especies con diferente temporalidad de florecimiento, considerar plantar en patrones, diversas texturas, follaje y colores a lo largo del área

¹² El viento es mayor en altura que a nivel de piso. Estos también pueden ser fuertes sobre los bordes de los edificios. Es necesario entender la posible carga del viento a la que el muro verde estaría sujeto para que la vegetación pueda soportar las fuerzas. El viento afecta la vegetación deshidratándola. (Growing Green, 2014)

¹³ Tales como anques de almacenamiento de aguas lluvias y de recirculación de agua, siempre y cuando se mantenga el uso de agua potable en el mínimo. Es importante tener un plan de riego y realizar un análisis del agua estimada necesaria

de plantación. Asegurarse de tener una luz adecuada y de la calidad y la durabilidad de los materiales que lo componen (Growing Green, 2014)

El establecimiento de las plantas es un factor crítico para el desarrollo a largo plazo de las plantas, esto hace referencia a la calidad de las plantas a implementar: estar libres de hierbas, plagas y enfermedades, la calidad del medio de crecimiento es vital para el desarrollo de la planta, se debe controlar el crecimiento de hierbas durante la etapa de crecimiento para no afectar negativamente la cobertura vegetal del sistema. (Growing Green, 2014).

Muchas empresas realizan sus propias guías como parte de la estrategia de mercadeo. En gran medida, estas empresas exponen sus conocimientos basados en la experiencia que les ofrece cada uno de los proyectos realizados, en términos de variedad, estrategias de diseño y soluciones para cada caso.

Dada la escasa información acerca del funcionamiento de cada uno de los sistemas y la falta de difusión de estrategias de diseño, la limitación a difundir las propiedades técnicas de los muros verdes únicamente refuerza el riesgo a una apropiación inadecuada, ya que, existen diversos factores que impiden la réplica idéntica de estos elementos. Cada proyecto es diferente debido a que cada locación es diferente, hasta las distintas zonas al interior del muro pueden tener variaciones a las que se le debe dar respuesta de forma particular, analizando y teniendo en cuenta todos los factores asociados que puedan tener repercusión en el desarrollo exitoso del muro vegetal. (Riley, 2016) Sin embargo, estas guías son realmente apropiadas para la aproximación a un buen diseño y los inicios de difusión de estrategias de diseño apropiadas. Actualmente no existe una fórmula para llegar a un muro verde exitoso, probablemente no sea lo ideal llegar a una fórmula, debido a que el material principal de este sistema son seres vivos, por lo que, el comportamiento de cada uno es diferente dependiendo de las condiciones en que se encuentre. Lo que, si es cierto, es que es necesario crear una metodología de

diseño que comprenda los diversos factores para tener en cuenta y la posible solución a diversas situaciones, para lograr incrementar el porcentaje de éxito en la instalación de los muros verdes, eliminando en gran medida la necesidad de su mantenimiento y así, propiciando métodos de diseño adecuados.

1.3.3. OTRAS INVESTIGACIONES RELACIONADAS

The state of the art of living walls: Lessons learned de Benjamin Riley, es un estudio que, partiendo de una metodología de evaluación y observación de proyectos realizados, presenta diversas soluciones a la preocupación por los altos costos de los muros verdes, la falta de sostenibilidad y la percepción de ser muy decorativos. En el primer caso, las soluciones presentadas están relacionadas con vincular la inversión a corto plazo con el largo plazo. Una alta inversión a corto plazo optimizaría y amortizaría la inversión a largo plazo. (Riley, 2016), además, plantea cuantificar los ahorros energéticos generados por los muros verdes. Esta estrategia de cuantificar los beneficios reduciría en gran medida **la percepción de altos costos de instalación y mantenimiento. La relación costo beneficio suele ser a favor de los muros verdes** (Riley, 2016). **En segundo caso, expone la incipiente industria que actualmente necesita seguirse acomodando y generando nuevo conocimiento hacia nuevos factores de diseño.** Para lograr un muro sostenible, según Riley, **son necesarias nuevas ideas y la evolución de los sistemas, que logren llegar a sistemas optimizados menos propensos a fallos.** En último caso, acerca de la sensación de ser muy decorativos y superficiales, hace referencia a que los muros verdes pueden ser tanto decorativos como lograr definir un concepto arquitectónico expuesto en el proyectos Demeulemeester Shop and Casa CorManca, donde la vegetación, en un caso al exterior, en el otro al interior, hacen parte de la composición arquitectónica de la edificación, sobrepasando los niveles de "objetos decorativos" a ser conceptos que definen una propuesta arquitectónica.



Imagen 7.



Imagen 8.

Imagen 7. Demeulemeester Shop. Tomado de https://www.mimoo.eu/images/28100_l.jpg

Imagen 8. Casa CorManca Tomado de <https://www.archdaily.mx/mx/02-261053/casa-cormanca-paul-cremoux-studio>

“Le solicitamos a los muros vivos ser sostenibles, limpiar el aire, reducir el ruido, la contaminación, absorber aguas lluvias, reducir la isla de calor urbana, proveer beneficios psicológicos y psicológicos y, simultáneamente, permanentes infalibles y visualmente placenteros” (Riley, 2016) “Los muros verdes son muy sencillos, es el cumplir con todos estos criterios lo que los vuelve complejos” Estas frases nos hacen reflexionar cómo concebimos nosotros los muros verdes. Es probable que estemos solicitando mucho de un mismo sistema, sin embargo, esto no le quita que pueda lograrse. **Con estudios y nuevas propuestas se puede llegar a un sistema de naturación de envoltentes que cumpla con todas las expectativas.**

En otros estudios se ha contemplado la posibilidad de integrar la vegetación como parte de la edificación, siendo el mismo elemento con el que se construye la envoltente. (Hernández, 2015) Se ha desarrollado un sistema de naturación vertical, que está integrado desde un principio a la arquitectura, como recurso principal de la materialidad de la edificación. “sí un material prefabricado con propiedades térmicas y elementos vegetales se utiliza en la construcción de fachadas, se podrán mejorar las condiciones climáticas interiores y exteriores del espacio” (Hernández, 2015). Se

comprobó que es posible cerrar el espacio, aislar térmicamente y contener vegetación con un mismo sistema, mediante la implementación de un panel compuesto por dos placas de concreto reforzado. Con esta propuesta se abre un nuevo campo de estudio en el que se integra la vegetación como parte esencial de la edificación, no como un sistema adicional anclado a la fachada del edificio. De este modo, se reduce la inversión por doble envolvente, se aísla el espacio interior térmicamente y se regula el sistema de naturación de envolventes.

En cuanto a estudios térmicos realizados sobre sistemas de naturación en vertical, se ha comprobado también, **que los sistemas modulares contenedores de sustrato logran reducir hasta 7°C la temperatura máxima sobre la cara interior del muro y aumentar hasta 7°C la temperatura mínima, reduciendo hasta en un 75% el flujo de calor de ingreso y hasta 60% el flujo de calor de salida.** (Manso & João P. , 2016) Vale la pena aclarar, que la composición del muro tiene un efecto determinante en este resultado. Adicionalmente, es necesario tener en cuenta que fue un estudio realizado en el mediterráneo, con condiciones ambientales muy diferentes a las de Ciudad de México.

También se pudo comprobar, mediante un modelo matemático que las superficies vegetadas reducen hasta un 50% la transferencia de calor, con respecto a la superficie sin vegetación en el día más caluroso del verano. (Dr. Sam C. M. HUI & Zhao).

2. NATURACIÓN VERTICAL

2.1. TIPOS Y CONFIGURACIÓN

Los sistemas de naturación vertical hacen referencia a la incorporación de la vegetación en muros y fachadas como un sistema constructivo. Se han desarrollado diferentes sistemas como respuesta a los diferentes casos y características de cada uno de los proyectos. Estos temas se clasifican de modos diversos, sin embargo, para objeto de esta investigación, se clasificarán según su medio de crecimiento¹⁴. En ese sentido, la naturación vertical se puede dividir en dos tipos: (a). Fachadas vegetales¹⁵, (b) Muros vegetales¹⁶. Estos, a su vez, tienen diferentes variantes, según la técnica implementada y las necesidades a cubrir.

2.1.1. FACHADAS VEGETALES

Las fachadas vegetales se refieren a aquellos sistemas en el que las plantas crecen desde el suelo donde tienen sus raíces (bien sea suelo natural o en contenedor) y la envolvente de la edificación sirve como medio de soporte y crecimiento de la vegetación. Estas a su vez se clasifican en dos tipos:

TREPADORAS DIRECTAS: Deben ser capaces de cubrir la superficie por sí mismas. Las trepadoras cubren la fachada mediante raíces o tallos que usan para sujetarse directamente a la superficie vertical. Estas especies requieren de su entorno para desarrollarse y buscar la luz (Acosta, 2011) (Ver imagen.9).

¹⁴ Elemento en el que vive y se desarrolla un ser vivo, en este caso una planta.

¹⁵ Hacen referencia al uso de plantas trepadoras, nacen del suelo y se adhieren a la superficie o escalan con la ayuda de mallas o cables

¹⁶ Que corresponden a un sistema en el que la misma fachada o superficie aporta agua y nutrientes a la vegetación

TREPADORAS INDIRECTAS: Incluyen la instalación de sistemas de enrejados o cables tensados, acero galvanizado, mallas estructurales, que se adhieren a la fachada para darle soporte a las plantas y puedan cubrir mayor cantidad de superficie. (Hernández, 2015) (Ver imagen.10).

En general tienen grandes beneficios, bajo costo de transporte e instalación, pueden adherirse a casi cualquier tipo de superficie, y de no ser así, se instalan estructuras adicionales que ayuden al crecimiento de las plantas. Además, el mantenimiento no es costoso comparado con otros sistemas, se requiere únicamente de una poda de conformación de 3 a 6 meses. Las limitaciones de estos sistemas están relacionadas con algunas afectaciones sobre la superficie a la que se adhieren, ya que algunas especies se apoyan en grietas o juntas acelerando el proceso de deterioro (Acosta, 2011) y es necesario prever que para que la planta llegue a un estado de madurez y logre cubrir la superficie deseada, tomara un tiempo prudente, por lo que el componente estético se ve afectado.



Imagen 9. Fachada vegetal directa. Fuente: <http://www.eljardinonline.es/los-10-ejemplares-trepadores-mas-decorativos/>



Imagen 10. Fachada vegetal indirecta. Fuente: <https://www.archdaily.mx/mx/02-349031/en-detalle-jardines-verticales/533c3a91c07a80ce30000011>

2.1.2. MUROS VERDES

El muro verde¹⁷ o muro vegetado es una estructura adosada a un muro interior o fachada, que sirve como medio de crecimiento y sustento para las plantas. A diferencia de las fachadas vegetales, incorpora múltiples especies vegetales, con el fin de crear una superficie cubierta de vegetación, en un tiempo más inmediato. La incorporación de mayor número de especies vegetales permite la recreación de ecosistemas naturales. (López Benítez, 2016). Todos los muros verdes requieren irrigación, en muchos casos debe incluir nutrientes para abastecer y reforzar el sustento proporcionado por el medio de crecimiento.



Imagen 10. Muros vegetales Fuente: <https://www.bdonline.co.uk/cpd/cpd-1-2017-living-walls/5087727.article>

¹⁷ La expresión "Muro Verde" hace referencia al uso de vegetación como sistema constructivo en la edificación, no esencialmente al color resultante del sistema; Los muros verdes pueden ser de múltiples colores, según la especie vegetal a implementar.

2.1.2.1. Sistemas hidropónicos

La hidroponía es un método de cultivo sin tierra, "que consiste en proveer a las plantas de los alimentos de que tienen necesidad para su crecimiento ... por medio de una solución sintética de agua y sales minerales diversas"¹⁸. En estos sistemas se usa como medio de crecimiento un elemento inerte¹⁹ como fieltro o geotextil (polietileno o similar), lana de roca o espumas técnicas, que son fijados a una estructura metálica. Generalmente se usa la técnica patentada por el botánico Patrick Blanc que consiste en dos capas de fieltro, sobre unas placas de PVC expandido que se fijan a la estructura metálica. Sobre este fieltro se desarrollan las raíces de la planta y en su interior circula el agua, en muchos casos, enriquecida con nutrientes reemplazando así la tierra o el sustrato. Tanto los sistemas para exterior como interior tienen una cámara de aire entre la lámina impermeable y la fachada. (Hernández, 2015) (Acosta, 2011) La capa frontal del fieltro dispone de unas bolsas que sirven de soporte físico de las plantas y el sustrato de cultivo, el cual está compuesto en gran medida por perlita o vermiculita que retienen el agua durante más tiempo que un sustrato biológico (Acosta, 2011). Pueden ser tanto modulares como extensivos²⁰. (ver composición del sistema Imagen 11.) Estos sistemas requieren de fertilizantes y una constante circulación de agua para mantener las plantas irrigadas, lo que puede llegar a generar un alto consumo de energía eléctrica.

¹⁸ G.O. Huterwal. Hidroponía.

¹⁹ No contiene elementos nutritivos, es estéril, no son químicamente activos y poseen características asépticas.

²⁰ Se refiere a cuando abarca grandes superficies.



Imagen 11 y 12. Muros Vegetales Hidropónicos Fuente: Florafelt Vertical Garden Guide

2.1.2.2. Sistemas con sustrato

A diferencia de los sistemas hidropónicos, los sistemas con sustrato proveen a las plantas de los alimentos que estas necesitan, mediante el uso de una mezcla de sustrato con materiales orgánicos y minerales. En este caso el sustrato es el que le provee de estructura, soporte, agua, aire y nutrientes a la planta. (Growing Green, 2014) Se hace uso de contenedores de plástico, aluminio o acero, que contienen directamente el sustrato que servirá como medio de crecimiento y sustento para la planta. Generalmente, los contenedores están conectados internamente con el fin de que las raíces puedan extenderse a lo largo del sistema y pueda fluir más extensamente tanto el agua como las partículas de aire contenidas en el sustrato. Es importante resaltar, que, en este caso, el riego puede ser periódico en lapsos de varios días o semanas y el uso de fertilizantes puede ser necesario en lapsos de 3 a 6 meses, por lo que el consumo de energía eléctrica resultante del sistema de riego será menor. Existen diferentes sistemas que incluyen el sustrato como medio de crecimiento:

PANELES CONTENEDORES DE SUSTRATO

Estos son sistemas de módulos de 60 x 40 cm de polipropileno, con 10 o 15 cm de espesor. generalmente se suministran previamente plantados. Estos permiten ensamblar las piezas para crear formas complejas y permite reemplazar una única pieza, facilitando el mantenimiento. El sustrato es retenido por un fieltro y una geomalla que permite mantenerlo en su lugar. se puede reemplazar unidad a unidad, sin necesidad de quitar el panel completo o reemplazar por completo la superficie. (Green, Urban Arbolsimo, s.f.)



Imagen 13. Paneles contenedores de sustrato: Elaboración propia

CELDAS CONTENEDORAS DE SUSTRATO



Imagen 14. Celdas contenedoras de sustrato Fuente: <http://www.hildebrandt.cl/caracteristicas-y-beneficios-de-los-muros-verdes/>

Imagen 15. Celdas contenedoras de sustrato Fuente: <https://www.urbanarbolismo.es/blog/comparativa-entre-sistemas-constructivos-de-jardines-verticales/#sustrato>

Sus características son muy similares a las de contenedores de sustrato, consiste en módulos más amplios de aluminio o acero inoxidable, de 61x61x7.6 cm, subdivididos en celdas de 30,5 x 30.5 x 7.6 cm. El sistema de plantación es sencillo, el sustrato se compacta en las celdas de los paneles y las especies vegetales se plantan mientras el panel permanece en posición horizontal. El sistema de riego por goteo²¹ se sitúa entre los paneles, el agua dreña a través de toda la fachada y se recoge en la parte inferior²² (Green, Urban Arbolismo, s.f.)

SISTEMAS PLUG-IN

Son los sistemas de jardinería compuestos por recipientes tipo maceta que se inflan sobre una estructura tridimensional en la pared. Pueden ser desde los más sencillo utilizando macetas convencionales, hasta el uso de elementos modulares industrializados. (Green, Urban Arbolismo, s.f.) Este sistema tiene una alta facilidad de

²¹ Método de irrigación que suministra durante periodos largos de tiempo pocas cantidades de agua, permitiendo la utilización óptima y eficiente del agua.

²² <https://www.urbanarbolismo.es/blog/fachada-vegetal-sistemas-constructivos/#a>

mantenimiento, debido a que puede reemplazarse las plantas de manera individual, sin afectar el resto de los elementos vegetales. Sin embargo, tienen el inconveniente de compactación del suelo²³, estrés climático²⁴ y dado el reducido espacio para la expansión de las raíces, se puede limitar el desarrollo de las plantas. (Green, Urban Arbolismo, s.f.)



Imagen 16 y 17. Sistema Plug - in Fuente: <https://www.urbanarbolismo.es/blog/comparativa-entre-sistemas-constructivos-de-jardines-verticales/#plugin>

2.1.2.3. Para interiores.

Estos pueden ser paneles adheridos a superficies o paneles móviles de doble cara. Generalmente se usa el sistema hidropónico mencionado en el capítulo 2.1.2.1. para dar sustento a la vegetación. Estos son capaces de regular el clima al interior, se les puede integrar un dispositivo electromecánico de bombas recirculadoras para potencializar sus beneficios. Requieren de condiciones especiales de microclima al interior, iluminación y riego.

²³ Es el proceso por el cual el suelo se densifica gracias al paso del tiempo o unas fuerzas aplicadas sobre él.

²⁴ Las condiciones adversas pueden causar estrés climático sobre las plantas, impidiéndoles alcanzar un desarrollo óptimo.



Imagen 18. Muros vegetados para interiores empleados como divisores de espacios. Fuente <http://greenworks.eu/project/testlivingfurniture>



Imagen 19. Muros vegetados para interiores empleados como divisores de espacios. Fuente <http://greenworks.eu/project/testlivingfurniture>

2.2. DISEÑO DE MUROS VERDES

2.2.1. CONDICIONES EXTERIORES PARA CONSIDERAR

Los factores climáticos cambian según la localización geográfica y a su vez, el entorno que rodea al muro verde²⁵ puede afectar considerablemente las condiciones en las que este se desarrolla. Es realmente importante entender los microclimas²⁶. “No hay reglas que definan qué constituye mucho viento o mucha sombra” ... “A menudo el mejor acercamiento es estimar el peor escenario de para el crecimiento

²⁵ La expresión “Muro Verde” hace referencia al uso de vegetación como sistema constructivo en la edificación, no esencialmente al color resultante del sistema; Los muros verdes pueden ser de múltiples colores, según la especie vegetal a implementar.

²⁶ Son las condiciones climáticas de una zona en particular que cambian ligeramente respecto al clima global según las condiciones

de las plantas y diseñar con eso en mente” (Growing Green, 2014) . Antes de diseñar, es indispensable saber lo siguiente acerca del proyecto arquitectónico como tal²⁷:

- Ubicación geográfica.
- Altura en la que se realizará el muro verde y elementos del contexto que puedan afectar (ej. Edificios colindantes que le den sombra en algún momento del día)
- Dimensiones de la superficie a naturalar.
- Capacidad de carga de la superficie.
- Materialidad de la superficie
- Vientos dominantes y velocidad.

TEMPERATURA Y HUMEDAD.

Este es un factor determinante para la selección de las especies y los periodos y volumen de irrigación²⁸. Tener en cuenta la temperatura promedio del sitio en las diferentes épocas del año es crucial para el buen desempeño de las especies, en especial en temperaturas altas.

ORIENTACIÓN Y ASOLEAMIENTO.

La orientación y el asoleamiento determinaran el crecimiento y el desempeño de las plantas en el largo plazo. Evaluar la posición en la que estará ubicado el muro respecto a la asolación, ofrecerá gran cantidad de información para la toma de decisiones. De esta, depende ampliamente la paleta vegetal a implementar; alta exposición al sol requerirá plantas que tengan un buen desarrollo en estas condiciones, y se tendrá que considerar la necesidad de mayores periodos de

²⁷ Información suministrada por la Dra. Ilse García Villalobos en la asignatura de Naturación de Envolvertes en el Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura para azoteas naturaladas y adaptada para NVE.

²⁸ Altas temperaturas en el muro implicarán periodos más largos de irrigación y con mayor volumen.

irrigación entre otros. Es importante tener en cuenta los elementos del contexto que puedan afectar o darle sombra durante periodos muy largos a zonas en específicas al muro, ya que, estas zonas tendrán un desempeño diferente al resto. Lo ideal sería que el muro tenga las mismas condiciones de asoleamiento para toda la superficie, de no ser así, sería importante tomar consideraciones en cuanto a la selección de especies para esa zona de sombra. Esto mismo sucede en altura, entre más alto esté ubicado el sistema, hay una mayor probabilidad de exposición solar durante periodos más largos, dado que, a mayor altura, hay menor cantidad de elementos que pueden dar sombra. En grandes proyectos, es importante tener esto en cuenta ya que la vegetación que se encuentre en la parte inferior del muro tendrá diferentes condiciones de temperatura, humedad y asoleamiento a la parte superior, por lo que, de nuevo, la selección de especies podría ser diferente a la parte superior, para evitar zonas deterioradas. En Ciudad de México, la fachada sur tiene una exposición solar constante a lo largo del día y en mayor medida durante los meses de septiembre a abril, mientras que, la fachada norte estaría expuesta, en menor medida, durante los meses de mayo a agosto. Las fachadas este y oeste tendrían una exposición directa al sol en horas de la mañana y en horas de la tarde respectivamente, sin embargo, durante invierno, es común que llueva en las tardes, por lo que la radiación solar puede llegar a disminuir sobre la fachada oeste. Tener en cuenta estas condicionantes al momento de seleccionar la paleta vegetal, es fundamental para el éxito del sistema de naturación.

PRECIPITACIONES.

A pesar de que en Ciudad de México hay largos periodos del año en los que llueve monumentalmente, dada la verticalidad del sistema, en general no es suficiente para satisfacer las necesidades del muro verde, en especial de los muros hidropónicos, ya que, estos sin medio de crecimiento que aporte nutrientes, solo con el agua lluvia,

no tendrían los elementos necesarios para sobrevivir. En muchos casos, al sistema de riego se anexa un sistema de captación de agua²⁹, que contribuye a disminuir la necesidad de uso de agua potable.

VIENTOS.

Los vientos tienen gran influencia en el microclima de cada sistema de naturación. A mayor altura, la velocidad y fuerza del viento es mayor, así como sobre las esquinas de los edificios. Es necesario conocer la carga generada por el viento sobre el sistema de naturación para que este pueda resistirlas. Adicionalmente, el viento tiene un alto efecto en el microclima, este afectará las temperaturas y también tendrá un alto efecto en la deshidratación, por lo que es necesario responder a estas condiciones mediante la selección del sistema a implementar, la vegetación y un programa de riego adecuados (Growing Green, 2014).

²⁹ De igual manera, esta agua debe pasar por un proceso de limpieza y de introducción de nutrientes.

2.2.2. COMPONENTES ESENCIALES

2.2.2.1. Vegetación

Es la capa más externa del sistema (ver capa 7 Imagen 20.). A diferencia de los otros elementos, esta capa se trata de un elemento vivo. Todo el sistema debe trabajar de forma que la capa vegetal pueda desarrollarse sin problema. La vegetación responde a condiciones de asolación, viento, humedad, irrigación, temperatura entre otros. Conocer todas las condiciones del lugar donde será instalado, diseñar el proyecto y la correcta elección de la vegetación, será indispensable para un óptimo desarrollo de la vegetación a largo plazo.

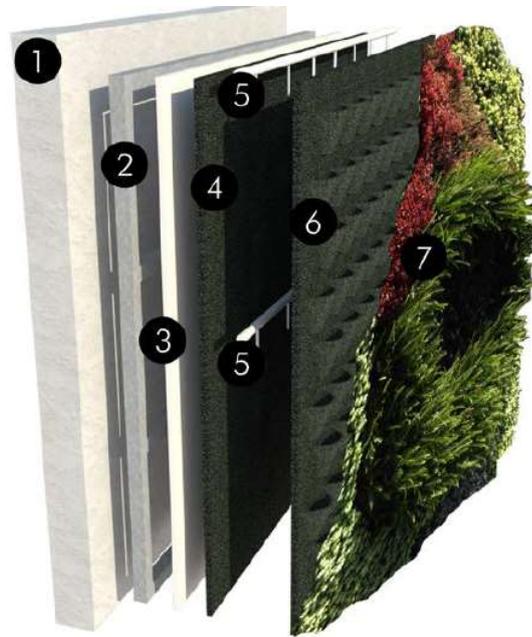


Imagen 20. Capas de un muro hidropónico Fuente: (Hernández, 2015)

La etapa inicial de un muro verde es crítica dado que es el momento en que la planta debe iniciar un proceso de adaptación al nuevo entorno. Se debe mantener irrigado el medio de crecimiento, buscando que las plantas enraícen y se establezcan. El sustrato debe estar completamente libre de maleza, plagas y enfermedades al momento de la instalación. La selección de especies depende de los objetivos del diseño y el tipo de muro verde a implementar. Adicionalmente, se deberá tener en cuenta las condiciones ambientales de la zona, junto con las características y necesidades de las plantas como: la necesidad de agua, resistencia a la sequía y al viento, la profundidad y forma de expansión de la raíz y su dimensión en etapa adulta (Acosta, 2011). El uso de la vegetación en la naturación de envolventes verticales debe ser estudiada adecuadamente, ya que se debe hacer un análisis correcto para

escoger qué especies son las más aptas para sobrevivir en el ambiente destinado. En Ciudad de México, estas deben cumplir con³⁰:

- Vivir con escaso volumen de suelo
- Resistentes a alta radiación solar
- Resistentes a temperaturas extremas
- Resistentes a grandes periodos de sequías
- Resistencia a plagas y enfermedades
- Capacidad de extenderse horizontalmente
- Requerir de cuidados escasos o nulos
- Resistencia a niveles altos de contaminación

Algunas especies de la familia de las crasuláceas viven en medios con una alta radiación solar, temperaturas extremas, escaso volumen de suelo y con largos periodos de sequía, condiciones que permiten que sean vegetación ideal para la implementación en muros verdes en la Ciudad de México.



Nombre científico:

Sedum dendroideum

Nombre común:

Lágrima de María.

Familia:

Crassulaceae

Origen:

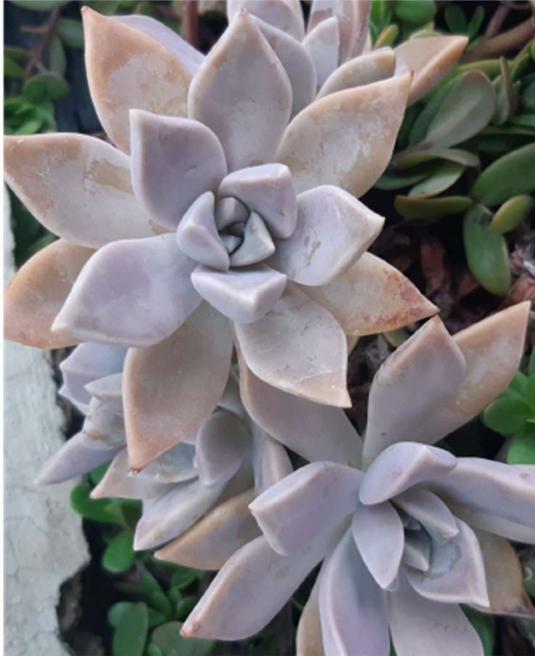
Centro de México

Tamaño:

Hasta 90 cm de largo, semiarbustiva. Se cultiva como planta de jardín. En invierno sus hojas se tornan de color rojo. tiene algunos usos medicinales para tratamientos de trastornos gástricos.

Tomado de: Conabio

³⁰ Información resultante de la evaluación de las condiciones ambientales generales dentro de ciudad de México.



Nombre científico:

Graptopetalum paraguayense.

Nombre común:

Madreperla

Familia:

Crassulaceae

Origen:

Centro de México

Tamaño:

Hasta 20 cm de altura.

De hojas gruesas dispuestas en forma de rosetas de color gris o verde grisáceo.

Produce flores blancas en forma de estrella.

Requiere exposición constante a sol y temperaturas entre 15°C y 25°C.

Tomado de: Conabio



Nombre científico:

Sedum nussbaumerianum.

Nombre común:

Coppertone Stonerprop.

Familia:

Crassulaceae

Origen:

Centro de México

Tamaño:

Hasta 20 cm de altura.

Planta subarborescente, perenne, con tallo color rojizo y hoja de color amarilloverdoso a rojizo cobrizo en forma elíptica en espiral y puntiagudas. Tolerante a la sequía.

Tomado de: Conabio



Nombre científico:

Sedum rubrotinctum.

Nombre común:

Dedos

Familia:

Crassulaceae

Origen:

Centro de México

Tamaño:

Hasta 20 cm de altura.

Forma tallos ramificados y delgados, las hojas están dispuestas en rosetas poco compactas. Las hojas tienen forma cilíndrica y de color verde. Se tornan de coloración rojiza cuando están expuestas a largas horas de asoleación.

Tomado de: Conabio



Nombre científico:

Sedum moranense.

Nombre común:

Cardoncillo, jaspalache.

Familia:

Crassulaceae

Origen:

Centro de México

Tamaño:

Hasta 20 cm de largo.

Hierba perenne, extendida sobre el suelo o colgante. Con tallo ramificado, hojas abundantes y carnosas de 3 mm.

Se cultiva como ornamental, es una planta útil para nauración, resiste sequía y heladas. Habita en sitios rocosos, eñas y pedregales.

Tomado de: Conabio

2.2.2.2. Medio de crecimiento

El medio de crecimiento en los muros verdes puede ser muy variado, depende del tipo de sistema que se vaya a implementar (ver capa 6 y 4 Imagen.20). Este será un recurso artificial y debe estar diseñado con los elementos necesarios para el correcto crecimiento y desarrollo de la planta.

MEDIOS INERTES En los sistemas hidropónicos, el medio de crecimiento es el fieltro o el material elegido para soporte. En este caso, a la planta se le debe proporcionar los mismos elementos que en el caso anterior, sin embargo, en este caso, al fieltro ser un material inerte, otros elementos como la irrigación, deben suministrar los componentes necesarios para el adecuado de desarrollo.



Geotextil muro verde hidropónico Fuente: <http://www.hildebrandt.cl/caracteristicas-y-beneficios-de-los-muros-verdes>

CONTENEDORES DE SUSTRATO: Son elementos como paneles modulares o celdas que contienen sustrato en su interior y están dispuestos de manera vertical. El sustrato es un medio material sólido distinto del suelo in situ, natural o de síntesis, mineral u orgánico, que, colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radicular, desempeñando un papel de soporte para la planta e interviniendo activamente o no en el proceso de la naturación. (Ansorena, 1994) En los sistemas con sustrato³² integrado, este mismo aporta las condiciones necesarias sin necesidad del uso de fertilizantes continuamente, mediante la mezcla de componentes orgánicos, minerales y drenantes.

³² Se refiere al suelo modificado por el hombre y contenido en un recipiente (Palomino, 2012)

2.2.2.3. Riego

La irrigación es parte fundamental para el sostenimiento del muro vegetal. (ver capa 6 y 5 Imagen.20). El agua lluvia no es suficiente para el abastecimiento de agua, dado que debe darse de forma uniforme y en cantidades determinadas (Growing Green, 2014). En la mayoría de los casos, se hace uso de riego por goteo³³ con sistemas automatizados, controlados a través de un equipo diseñado especialmente para este objetivo: abastecer adecuadamente de agua a las plantas (Hernández, 2015) Los sistemas más sofisticados permiten al profesional hacerle seguimiento (a sustratos y a sistemas hidropónicos³⁴) al volumen, la frecuencia, la humedad del sustrato, el pH y los niveles de nutrientes.

Un sistema convencional de riego para muro verde está compuesto de:

ALIMENTACIÓN: Corresponde al almacén de agua y el medio de impulsión de esta, puede ser interno al sistema con el uso de un contenedor en la parte inferior del muro y una bomba hidráulica sumergible, o puede ser externo haciendo uso de un tinaco y bomba hidráulica para exteriores. Es importante que el medio de alimentación para un sistema de riego de muro verde sea independiente a cualquier otro sistema hídrico del lugar, con el fin de evitar problemas o interrupciones del sistema. Adicionalmente, al ser el agua exclusiva para el muro verde, es viable verter fertilizantes o productos para el control de plagas, actividades

³³ El riego por goteo es una forma de riego localizado que se aplica mediante el uso de mangueras con goteros incrustados regando el sistema con un muy bajo flujo de agua durante largos periodos de tiempo (Hernández, 2015)

³⁴ Para los sistemas hidropónicos la inyección de fertilizante se denomina "Fertiirrigación", la cual debe ser aplicada entre 0.5 y 20 litros de solución por m², es posible que sean necesarios varios ciclos al día, sin embargo, el agua sobrante puede ser reciclada y circulada de vuelta al sistema (Growing Green, 2014)

que no se podrían realizar si se hace uso de una alimentación en común con otros usos como la alimentación de una batería de baños.

AUTOMATIZACIÓN: La automatización tiene que ver con la programación de riego en cuanto a tiempos y periodicidad. Adicionalmente, está relacionado con el control y activación del sistema y de la bomba. Regularmente se compone de un controlador que activa la bomba y le da la señal a una o varias electroválvulas para que permitan el paso regulado del agua.

DIFUSIÓN PRIMARIA: Hace referencia a la línea principal de riego generalmente en tubería PVC, que conduce el agua a cada ramificación.

DIFUSIÓN SECUNDARIA: Está compuesta de una red de tuberías presurizadas, generalmente, tubería PEBD, la cual, finaliza en los emisores, en este caso, goteros que emiten el agua puntualmente al interior del medio de crecimiento.

2.2.2.4. Impermeabilización

La impermeabilización no es siempre necesaria, depende en gran medida del diseño del muro verde. (ver capa 3 Imagen.20). En algunos casos el espacio entre la parte posterior del sistema y el muro de anclaje es lo suficiente, haciendo que la implementación de impermeabilización no sea necesaria. Este espacio entre el sistema y el muro de anclaje es clave para prevenir el traspaso de agua a la edificación o reducir el riesgo de afectación por las raíces de las plantas. En caso de que sea necesario un sistema de impermeabilización, se protegerá el muro de humedad y de la salinidad causada por los fertilizantes. Estas consideraciones deben ser tomadas dependiendo de las características del muro de anclaje; hay materiales

que de por sí son impermeables u otros que tienen gran afectación con la humedad. (Growing Green, 2014)

2.2.2.5. Estructura

El sistema estructural es lo que le da soporte al muro vegetal y el medio de anclaje a la envolvente de la edificación (ver capa 2 Imagen.20). Este debe tener en consideración tanto el peso de la vegetación, como del medio de crecimiento en sus niveles máximos de saturación. La estructura puede ser tan variada como tipos de muros vegetales hay, de hecho, esta determina la configuración del muro vegetal, como se vio en el capítulo 2.1.2, donde la estructura va desde el sistema que soporta al medio de crecimiento como los paneles contenedores del sustrato o el geotextil implementado en el caso de los muros hidropónicos, hasta la estructura metálica que se adhiere a la envolvente de la edificación. Esta debe ser resistente, duradera, inoxidable y capaz de soportar la salinidad provocada por el uso fertilizantes en el caso de los muros hidropónicos

La estructura de un muro vegetal depende esencialmente de 1) El tipo de muro que se desee implementar y lo que se quiere lograr con este y 2) de las condiciones y características de la superficie en la que irá instalado. La capacidad de carga del material de la envolvente definirá si es posible implementar un sistema robusto como los contenedores de sustrato y su forma de anclaje. Para efectos de esta investigación se determinó hacer uso de una estructura autoportante. Esto significa que cada módulo estará soportado en una estructura metálica, la cual cargará el peso de todo el sistema. Esto se determinó, ya que, la superficie en la que irá instalado el sistema no puede ser perforada, por lo que no se podría anclar a esta.

3. MUROS VERDES MODULARES CONTENEDORES DE SUSTRATO

Los muros verdes contenedores de sustrato consisten en un sistema modular compuesto por paneles, regularmente de polipropileno de 60cm x 40 cm y 10cm de espesor con una mezcla de sustrato en su interior. Este está contenido por las paredes del panel y un geotextil que cubre los laterales y la parte frontal del módulo, a la cual se le hacen unos orificios para introducir la vegetación. Gracias a que son modulares, permiten el reemplazo de una única pieza facilitando el mantenimiento. El riego debe hacerse por goteo, y a diferencia de los sistemas hidropónicos, los cuales pueden necesitar entre 0.5 y 20 litros de solución por m² y es posible que requieran varios ciclos de riego al día (Growing Green, 2014), en los paneles contenedores de sustrato, los ciclos pueden hacerse semanales y no requiere el uso de fertilizantes, ya que, el agua drenada arrastra nutrientes que pueden ser devueltos al sistema. Gracias a que el sustrato mismo absorbe agua, se pueden lograr amplios periodos sin necesidad de riego, lo que representa una ventaja respecto al consumo energético. A esto se le suma que, como se ha demostrado en estudios previos, **el grosor de la capa de sustrato tiene gran impacto en la regulación térmica de una superficie. De esta forma, se esperaría que dado el espesor de la capa del medio de crecimiento o sustrato, con un buen desarrollo vegetal, se tenga entonces, una gran capacidad de regular térmicamente la envolvente vertical de la edificación, y de esta forma, se pueda limitar las altas temperaturas incidentes sobre la envolvente de la edificación, tanto en climas cálidos como en climas fríos.**

No obstante, esto solo se logra mediante el adecuado crecimiento y desarrollo de la vegetación, "el principal factor del que depende el éxito de un cultivo en contenedor es la calidad del sustrato elegido" (Ansorena, 1994). Esta

calidad está determinada por las características de los materiales seleccionados para la mezcla. En conjunto, estas deben cumplir con cuatro funciones principales según G.L. Rodríguez (2016): a) asegurar el anclaje de la vegetación, b) servir de reserva hídrica, c) proporcionar oxígeno para las raíces y d) asegurar su nutrición.

3.1. PRINCIPALES MATERIALES EMPLEADOS EN SUSTRATOS PARA NATURACIÓN

La variedad de materiales utilizados en sustratos es muy amplia. Es frecuente que se recurra a las mezclas de distintos materiales para obtener características apropiadas según sea el cultivo. Muchos residuos o subproductos derivados de explotaciones agrícolas o industriales están actualmente sustituyendo a los materiales más tradicionales (Burés, 1997). Para efectos de esta investigación, los materiales empleados son:

Fibra de Coco	
Fibra de Coco Fina	Es un material vegetal residuo de la industria agroalimentaria, extraído de la cáscara del coco. Es un material ligero y con porosidad elevada. Compuesto 50% por polvo de fibra de coco y 50% de chip y fibras de coco.
Fibra de Coco Gruesa	Es un material vegetal residuo de la industria agroalimentaria, extraído de la cáscara del coco. Es un material ligero y con porosidad elevada. Compuesto 20% por polvo de fibra de coco y 80% de chip y fibras de coco.
Mezcla de Referencia	
Tierra Negra	Es un tipo de suelo de color oscuro y partículas muy pequeñas resultante de la descomposición materia orgánica
Agrolita o Perlita	Es un mineral de origen volcánico de origen sílico. Su aporte nutrimental es nulo. Su alta porosidad permite buena aireación y buen drenaje.
Abono de Borrego	Es el fertilizante orgánico por excelencia debido a su alto contenido en nitrógeno y en materia orgánica

3.2. PROPIEDADES DE LOS SUSTRATOS

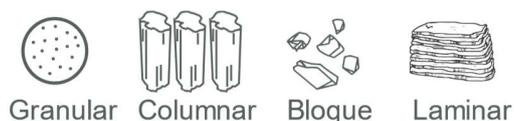
Las propiedades varían según sea el origen del material y los factores que hayan contribuido a su formación: a) Factores físicos: cambios de temperatura y humedad b) Químicos: reacciones entre oxígeno, agua y ácidos c) Geológicos: movimientos tectónicos o d) biológico: descomposición de materia orgánica. De estas dependen las propiedades que permiten que sea un medio adecuado para el crecimiento de la vegetación.

3.2.1. PROPIEDADES FÍSICAS

Son aquellos que podemos ver y sentir (Ansorena, 1994, pág. 35). Se refieren a la organización estructural y morfológica que propician la relación aire - agua (García, 2018, pág. 8). Estas propiedades son de gran importancia, ya que dependen en gran medida de la composición del sustrato y difícilmente pueden ser alteradas durante la operación. (Ansorena, 1994, pág. 35).

TEXTURA: Es la proporción de los tamaños de partículas: arena, limo y arcilla (Ansorena, 1994). De esta dependen principalmente: el espacio poroso, la aireación, el drenaje, estabilidad, entre otros (Ansorena, 1994). El tamaño y la distribución de los gránulos o fibras, condiciona el comportamiento del sustrato afectando esencialmente el balance entre agua y aire (Rodríguez, 2016). Sustratos de cultivo con un alto porcentaje de partículas entre 0.25mm y 2.00mm son óptimos para el crecimiento de plantas en macetas (Rodríguez, 2016)

ESTRUCTURA: Se refiere a la disposición de las partículas del suelo e impactan en la capacidad de infiltración hídrica, compactibilidad, desarrollo



radical8. Las diferentes estructuras se forman por la presencia de materia orgánica que enlazan las partículas y puede ser de tipo (Rodríguez, 2016):

POROSIDAD: Es el volumen total del medio no ocupado por las partículas sólidas, siendo entonces, ocupado por aire o agua (Rodríguez, 2016) . Determina el drenaje, la aireación del suelo, la penetración y el arraigamiento radicular. Es recomendable que este no sea inferior al 80%-85% (Rodríguez, 2016). Un suelo suelto y poroso permite una buena circulación de las raíces de la planta, lo cual es fundamental para su crecimiento.

HUMEDAD: Es la capacidad que tiene el suelo de retener agua de forma: 1) Higroscópica, que hace referencia al agua que se encuentra dentro del suelo, 2). Capilar ubicado en los intersticios 3). Gravitacional, la cual satura el suelo. También se pueden clasificar por: agua difícilmente disponible, fácilmente disponible, y en agua de reserva (Rodríguez, 2016) (Ansorena, 1994).

DRENAJE: La capacidad del suelo de eliminar el exceso del agua. Está determinado por algunos componentes del suelo que permiten el paso del agua hacia el nivel freático (López *et al.*, La vegetación en el diseño de los espacios exteriores., 1998).

CAPACIDAD DE CAMPO: Es la capacidad del suelo de conservar el agua para el suministro de esta a las plantas (López *et al.*, 1998). Se ha empleado el término para determinar el límite máximo de almacenamiento de agua para el crecimiento de las plantas (García, 2018).

PERMEABILIDAD Y ESCURRIMIENTOS: La permeabilidad es su capacidad de permitir el paso del agua evitando su estancamiento en la superficie y sin que altere su estructura interna (García, 2018). Los escurrimientos son el agua que corre superficialmente y está determinado por

los últimos parámetros: permeabilidad, capacidad de campo, drenaje y por la cobertura vegetal y condiciones climáticas.

En la tabla 1. se muestran los niveles óptimos de las propiedades físicas para sustratos en contenedor. (Ansorena, 1994)

PROPIEDAD	NIVEL
Tamaño de partícula	0,25-2.50
Densidad aparente (g/cm ³)	<0,4
Densidad real (g/cm ³)	1,45-2,65
Espacio poroso total (% de volumen)	>85
Retención hídrica (% de volumen)	55-70
Capacidad aireación (% de volumen)	10-30
Agua fácilmente disponible (% de volumen)	20-30
Agua de reserva (% de volumen)	4-10
Agua total disponible (% de volumen)	24-40

Tabla 1 Propiedades físicas para sustratos en contenedor. Fuente: Miner, 1994

3.2.2. PROPIEDADES QUÍMICAS

Son las propiedades que influyen en el suministro de nutrientes (Rodríguez, 2016). Estos pueden ser modificados durante la operación del suelo. Determinan la disponibilidad de nutrientes y el nivel de acidez (García, 2018).

pH : Es el grado de acidez o alcalinidad que presentan los suelos. De este dependerá la disponibilidad y asimilación de nutrientes, el desarrollo de la vegetación y el comportamiento de microorganismos (López, 1998).

<i>pH</i>	<i>Denominación</i>
<i>Inferior a 5.0</i>	Fuertemente ácido
<i>5.1 a 6.5</i>	Moderadamente ácido
<i>6.6 a 7.3</i>	Neutro
<i>7.4-8.5</i>	Medianamente alcalino
<i>Superior a 8.5</i>	Fuertemente alcalino

Tabla 2 Fuente: NOM-021-RECNAT-2000

MATERIA ORGÁNICA: Esta proporcionada por la degradación de los elementos orgánicos acumulados en el suelo. Es responsable de la estructura y sirve como reservorio de nutrimentos disponibles para las plantas (López *et al.*, 1998). (Ansorena, 1994) Recomienda un valor mayor a 80%, (Rodríguez, 2016) Sugiere un valor mayor a 40% y en la NOM-021-RECNAT-2000 se establece que para suelos no volcánicos un valor superior al 6% indica un suelo muy alto en materia orgánica.

SALINIDAD Y SODICIDAD: Es la cantidad de sales disueltas en el suelo. estas pueden causar problemas y alterar las condiciones ideales de este para una apropiada adsorción de nutrientes. No todas las plantas son aptas para subsistir suelos salinos (López *et al.*, 1998).

ELEMENTOS NUTRITIVOS: Son aquellos elementos que sirven como alimento para las plantas. Estos pueden estar disponibles y no disponibles. Se dividen en macronutrientes (N, P, K), requeridos para la formación de su estructura, y crecimiento, y los micronutrientes (Mg, S-Ca), determinantes en la formación de clorofila y complemento para la estructura (López *et al.*, 1998).

PROPIEDADES QUÍMICAS	NIVEL OPTIMO
<i>pH</i>	5,2 – 6,3
<i>Conductividad eléctrica</i>	0,75-3,49
<i>Capacidad de intercambio catiónico (meq/100g)</i>	>20
<i>Materia Orgánica</i>	>80
<i>Nutrientes asimilables (ppm)</i>	55-70
<i>N – NO3</i>	100-199
<i>N – NH4</i>	0-20
<i>P</i>	6-10
<i>K</i>	150-249
<i>Ca</i>	>200
<i>Mg</i>	>70
<i>Fe</i>	0,3-3,0
<i>Mn</i>	0,02-3,0
<i>Mo</i>	0,01-0,1
<i>Zn</i>	0,3-3,0
<i>Cu</i>	0,001-0,5
<i>B</i>	0,005-0,5

Tabla 3 Propiedades Químicas para sustratos en contenedor. Niveles óptimos. Fuente: Miner, 1994

3.2.3. CARACTERÍSTICAS DE UN BUEN SUSTRATO

Para asegurar un buen desarrollo vegetal, y en ese sentido, una alta eficiencia en la regulación térmica sobre la envolvente de la edificación es fundamental que el medio de crecimiento conserve ciertas características que permiten proveer a la vegetación de buen alimento y un ambiente sano para el crecimiento radicular. (Ansorena, 1994), (Rodríguez, 2016) y (García, 2018), coinciden en que las siguientes características son fundamentales para que un sustrato permita un buen desarrollo vegetal.

- Apropiada distribución de partículas
- Aireación
- Estabilidad física
- Libre de enfermedades
- Disponibilidad de nutrientes
- Capacidad de retención hídrica
- Drenaje eficaz
- Intercambio catiónico
- Baja Densidad

ESTABILIDAD Y SOPORTE: El sistema debe tener la capacidad de proporcionarle a la planta la adecuada estabilidad durante todas sus etapas. Desde sus inicios hasta en su madurez, debe tener la capacidad de soportar el peso de la planta en su total desarrollo. Además, en muchos casos, las plantas introducidas en sistemas de naturación vertical, son plantas que absorben y retienen agua en sus hojas, esto incrementa en gran porcentaje su peso. Al mismo tiempo, para lograr una adecuada estabilidad, la planta debe establecerse de forma adecuada al sistema. Si sus raíces no son lo suficientemente fuertes y extensas para aferrarse al medio de crecimiento, existe el riesgo de que, en su adultez, con mayor peso de follaje estas se puedan llegar a desplomar.

RELACIÓN AIRE AGUA: Esta relación la ofrece la estructura del suelo, el cual, debe tener una diversidad en los tamaños de partículas que permita mantener gran cantidad de macroporos y microporos que le den al medio de crecimiento una alta capacidad de oxigenación y, a su vez, espacios para la captación de agua. "La estructura interna del material determina la porosidad interna y la densidad real, mientras que la granulometría determina la distribución de tamaños de poros interarticulares.³⁵ De la densidad aparente y la porosidad dependerán las propiedades hídricas del sustrato, como la retención de agua y la permeabilidad" (Villalobos, 2018). La porosidad debe ser mayor al 10% de la masa del sustrato y la capacidad de retención hídrica mayor al 35% del volumen de este mismo (Ansorena, 1994). A su vez, la retención hídrica debe realizarse de forma uniforme y en cantidades apropiadas.

NUTRIENTES: La vegetación requiere de elementos nutritivos que sirven de alimento para las plantas. Esta según el sistema, están disponibles en el sustrato o son introducidas mediante fertiirrigación. Los nutrientes necesarios, se dividen en macronutrientes y micronutrientes. La vegetación requiere mayores cantidades de macronutrientes los cuales son principalmente: Nitrógeno (N), Potasio (K), Fosforo (P), necesarios para el crecimiento y formación de la estructura vegetal (García, 2018). Los micronutrientes se requieren en una cantidad menor para la formación de enzimas y son Boro (B), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Fierro (Fe), Manganeso (Mn), Molibdeno (Mo), Zinc (Zn) y Cloro (Cl) (García, 2018).³⁶

³⁵ La porosidad de un sustrato es el porcentaje de su volumen que no está ocupado por material sólido. (García, 2018)

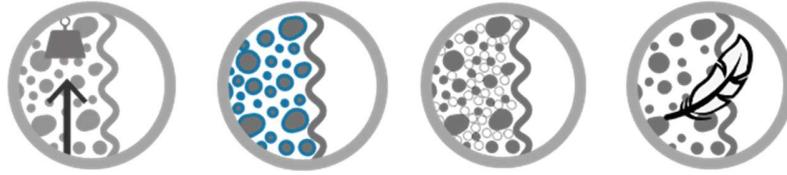
³⁶ Esta información es tomada de la tesis doctoral de la Dra. Ilse García Villalobos, desarrollada para sustratos destinados a azoteas verdes. Esta información es aplicable también para las necesidades a satisfacer para plantas en muros verdes.

3.3. LA FIBRA DE COCO EN SISTEMAS DE NATURACIÓN VERTICAL DE ENVOLVENTES

Para conservar estas características en sistemas verticales, existen algunos desafíos que afrontar si se planea implementar los muros vegetados contenedores de sustrato, como un sistema viable para la regulación térmica de un edificio y reducción del calentamiento urbano.

En primer lugar, está la posición no natural de la vegetación. En condiciones normales, estarían ubicadas en superficies horizontales donde su raíz crece en dirección a la gravedad (Geotropismo positivo), mientras que su tallos y hojas crecen opuestos a esta (Geotropismo negativo) y en dirección a la luz (Fototropismo positivo). Al posicionarlas en una superficie vertical, se requiere un medio de crecimiento que facilite el arraigo y le dé el soporte que requieren tanto el tallo, como la raíz para mantenerse firmes. Adicionalmente, por efectos de la gravedad, con el tiempo, el sustrato suele compactarse, perder volumen de sustrato en la parte superior de contenedor y, de esta manera, perder las propiedades que permiten un buen desarrollo de la vegetación. Esto puede resultar en una baja densidad de la cobertura vegetal y por ende el reemplazo constante de los módulos y un rendimiento relativamente bajo del desempeño como regulador térmico por la dificultad en tener una cobertura vegetal regular, constante y vigorosa.

Por esta razón, se requiere de un material que le proporcione el arraigo necesario a la raíz para que pueda soportar el tallo y hojas que buscan crecer hacia arriba, mientras que le facilita el crecimiento a la raíz hacia la parte inferior del módulo para encontrar los espacios de mayor humedad, nutrientes y aireación. Para esto, este material debe mantener una estabilidad física, adecuada retención hídrica, alta porosidad y, además, debe ser ligero para facilidad del anclaje de los módulos.



La fibra de coco es un material vegetal, obtenido de los residuos producidos en la industria del coco, compuesto por la parte del mesocarpo, (Florian & Roca, 2011) después de aprovechar las fibras largas para aislantes térmicos y mallas (Rodríguez, 2016). De los elementos sobrantes se generan 3 tamaños de fibra: chip, fibra y polvo, que es implementado como sustrato. Las diferentes porciones de mezcla entre estos tipos originan los tamaños de fibra de coco que se comercializan:

- Fibra de coco Grande: 80% Chip – 20% Polvo
- Fibra de coco Mediana: 70% Chip – 30% Polvo
- Fibra de coco Fina: 50% Chip – 50% Polvo

La fibra absorbe agua con gran facilidad sin importar su estado y no sufre contracciones ni expansiones que afecten su capacidad de aireación al variar su contenido de agua (Florian & Roca, 2011). La fibra de coco “presenta porosidad muy elevada, agua fácilmente disponible para la planta, aireación y ligereza” (Rodríguez, 2016). “Se trata de un producto ecológico y sostenible. Su extracción y posterior eliminación no conlleva impacto medioambiental” (Gosálbez, 2012). Sus fibras actúan como esponjas, por lo que sirven de reservorios para la planta obtener el agua después de largos periodos de sequía. Logra un buen equilibrio entre retención de agua y capacidad de aireación, de esta forma evitamos enfermedades por hongos en las raíces por exceso de humedad (Gosálbez, 2012), (Rodríguez, 2016). “Su descomposición es lenta debido al alto contenido de lignina, por lo cual mantiene sus propiedades con bastante estabilidad” (Florian & Roca, 2011).

Se realizó un estudio en el que se analizaron diferentes composiciones de sustratos: 70% restos vegetales con lodo + 30% puzolana volcánica, 70% puzolana volcánica + 30% restos vegetales con lodo, 70% Corteza de pino compostada + 30% puzolana volcánica, 70% Corteza de pino compostada + 30% fibra de coco y 70% fibra de coco + 30% corteza de pino compostada, 70% restos vegetales con lodo + 30% Corteza de pino compostada y 70% restos vegetales con lodo + 30% fibra de coco. Se encontró entonces que:

“Las diferentes combinaciones de corteza de pino con fibra de coco presentaron bajas densidades y elevada porosidad, además de niveles óptimos de pH y conductividad eléctrica y un contenido en materia orgánica estable durante todo el ensayo, lo que se reflejó en un mayor crecimiento en las plantas. Los sustratos a base de fibra de coco en 70%, 30% y el testigo presentaron las más bajas densidades y alto espacio poroso total (EPT)... la utilización de sustratos sostenibles a base de corteza de pino y fibra de coco resulta ser una práctica, sostenible y adecuada en jardinería vertical”. (Rodríguez, 2016)

De esta forma entonces, la fibra de coco en sus diferentes tamaños y con una mezcla de componentes orgánicos, minerales y drenantes, se puede lograr un material que logre mantener las características adecuadas para que permitan un buen desarrollo vegetal cuando están ubicadas en sentido vertical, y de esta forma, favorecer la regulación térmica sobre la envolvente de la edificación.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La experimentación consistió en dos etapas. Una fase inicial en la que se realizó un trabajo de campo para la obtención de datos térmicos y de cobertura vegetal, y una segunda fase de evaluación de los sustratos en laboratorio, con el fin de analizar las características físicas y químicas de las mezclas que posteriormente fueron contrastadas con la información obtenida en el experimento de campo.

4.1. EXPERIMENTACIÓN EN CAMPO

El proceso de experimentación en campo fue arduo y de muchos aprendizajes. Para esta etapa se ensambló la estructura, se realizó la preparación de las mezclas, el armado de los módulos, plantación, instrumentación y montaje de módulos. En un principio, se tenía contemplado iniciar la experimentación el mes de octubre, con el fin de alcanzar a tener un periodo corto de lluvias y evaluar el comportamiento del sistema a nivel hídrico. Sin embargo, surgieron algunos contratiempos que implicaron corregir y reformar algunos planteamientos del experimento y darles solución a problemas surgidos en las primeras semanas de experimentación. Fue solo hasta finales de noviembre que el sistema de naturación vertical pudo encontrarse en condiciones óptimas y estables para iniciar con las mediciones. Es por esto, por lo que el experimento tuvo una periodicidad de diciembre de 2019 a mayo de 2020. Estos contratiempos se desarrollarán a detalle en apartado de "4.1.2. *Diseño componentes esenciales*".

4.1.1. CONDICIONES EXTERIORES



El modelo experimental, está ubicado en uno de los cubos experimentales, a cargo del Laboratorio de interacción con el medio en la azotea de la Unidad de Posgrado de la UNAM, la cual está localizada en la reserva ecológica del pedregal de San Ángel, en la latitud $19^{\circ}18'35''$ N y longitud $99^{\circ}11'07''$ O. Con una altitud entre los 2,270 y los 2,349 msnm. Ya que se pretendía estudiar el sistema en las condiciones más adversas, se determinó que

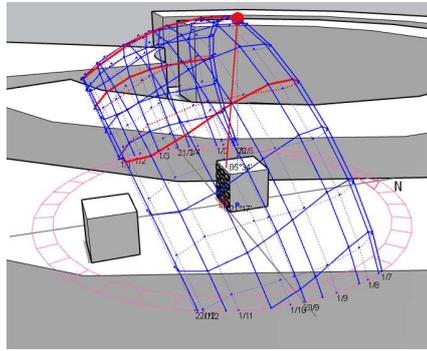
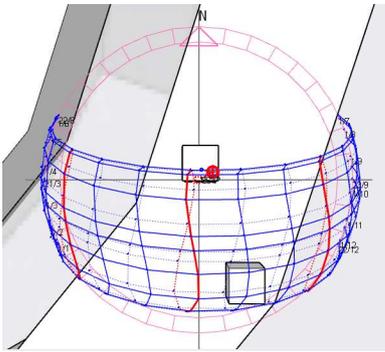
estarían ubicados en la fachada sur, ya que durante esta época del año esta tiene una constante incidencia del sol.

TEMPERATURA: La temperatura media anual es 16.3 °C. Durante los meses de marzo a septiembre, se obtienen temperaturas promedio cálidas, que varían entre los 16°C y 19°C, mientras que los meses de octubre a febrero, la temperatura baja obteniendo un promedio que varía entre los 12°C y 14°C. El mes más cálido es mayo, donde se obtienen temperaturas mínimas de 10°C y las máximas alcanzan 31°C, con una fluctuación térmica de 15°C. El mes más frío es enero con temperaturas mínimas alrededor de los 3°C y máximas de 23°C y una fluctuación promedio de 13°C.

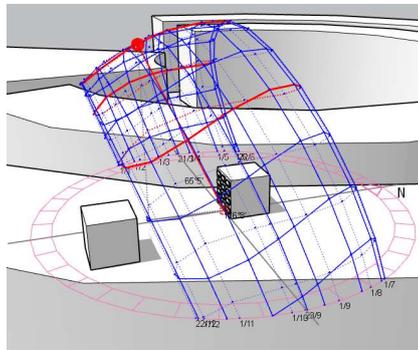
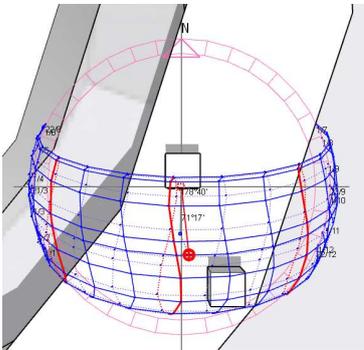
El experimento tuvo lugar desde el mes de diciembre de 2019 hasta mayo del 2020, por lo que debió soportar las temperaturas bajas de enero y febrero y las temperaturas altas de abril y mayo.

ASOLEAMIENTO: En la azotea no existen elementos que regulen la exposición solar o generen sombra al sistema, por lo que las condiciones serán adversas. El modelo experimental tendrá lugar mayormente durante la donde la trayectoria solar se inclina hacia el sur. Se quiere probar el sistema en las condiciones más adversas, por esta razón, el estará posicionado sobre la cara sur del módulo, de este modo se probará el comportamiento del sistema expuesto a la asolación a lo largo del día durante los meses de experimentación. Esta posición también proporciona una ventaja durante los meses fríos, ya que, se podrá compensar las bajas temperaturas mediante ganancia solar, aprovechando el azimut durante esta temporada.

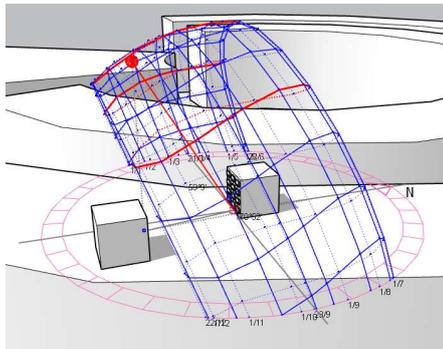
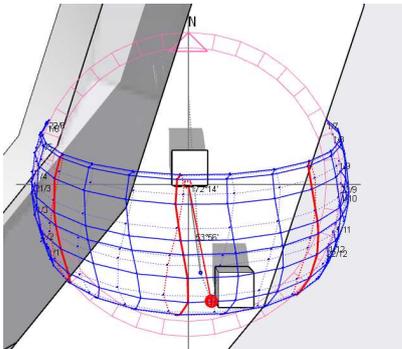
• Mayo



• Septiembre



• Febrero



HUMEDAD La humedad promedio anual es de 62%. Los meses más húmedos son de junio a octubre con una humedad alrededor de 72%, mientras que los meses de noviembre a mayo la humedad disminuye a alrededor 54%.

Durante el periodo de experimentación, en un principio la humedad relativa estará a un nivel óptimo y al final de la experimentación disminuirá. El sistema deberá soportar temperaturas bajas y humedad relativa baja.

PRECIPITACIÓN La precipitación promedio anual es de 691mm. Las lluvias se presentan durante el verano, entre los meses de junio y octubre. Mientras que la temporada de sequía es larga y se presenta entre los meses de noviembre y mayo. Esta temporada inicia con las más bajas temperaturas y termina con las más altas temperaturas, por lo que las condiciones climáticas se vuelven adversas para la vegetación. El periodo de experimentación tuvo lugar durante la época de secas del año en Ciudad de México.

VIENTOS En la zona se presentan vientos desde el sur oeste (255°) a una velocidad promedio de 1.2m/s.

MICROCLIMA El sistema de naturación estará ubicado en la azotea de una edificación de 4 pisos, sin edificaciones o volumetrías aledañas. El paisaje contextual de la unidad de posgrado es básicamente vegetativo, lo que puede reducir la isla de calor en gran medida. Sin embargo, debido a su ubicación en altura, el sistema de naturación estará desprovisto de elementos que limiten o impidan la exposición a la radiación y luz solar, por lo que las condiciones serán arduas. La velocidad del viento podrá llegar a ser constante dado que no existen volúmenes aledaños que lo restrinjan, redireccionen o túneles de viento que aumenten su velocidad.

4.1.2. DISEÑO COMPONENTES ESENCIALES

4.1.2.1. Especie vegetal

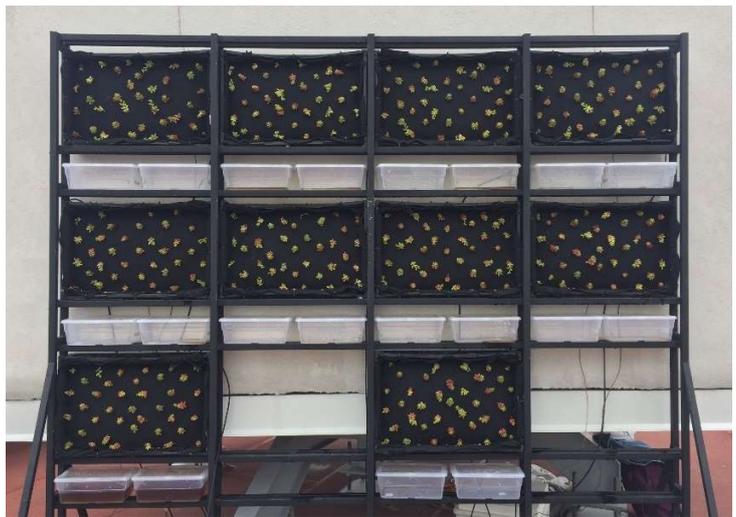


Teniendo en cuenta las condiciones climáticas mencionadas, la especie vegetal deberá soportar tanto bajas, como altas temperaturas, una temporada de sequía y una constante exposición solar. Se analizó una paleta vegetal de unas 10 especies en las que se determinó que se estudiaría la especie *Sedum rubrotinctum*. Esta es una especie nativa de México y cumple con las condiciones anteriormente mencionadas.

La especie *Sedum rubrotinctum* perteneciente a la familia de las Crassulaceae, su nombre común es "dedos de niño" o "dedos rojos". Es una especie perenne, de rápido crecimiento y alta adaptabilidad a ambientes arduos (García, 2018). Se caracteriza por hojas ovaladas y abultadas, tallos ramificados y delgados que no superan los 20 cm de altura. Sus hojas tienen una coloración verde intensa o roja cuando está expuesta a la luz solar directa, lo que puede ser una buena referencia para identificar los cambios por las condiciones exteriores (Palomino, 2012) . La reproducción de esta especie puede ser sexual por semilla o asexual por hojas o esquejes.

Se han hecho 2 estudios previos en sistemas de naturación en azoteas con esta especie vegetal en la UNAM, por lo que es una oportunidad de estudiar su comportamiento en vertical.

Una característica para tener en cuenta, igual de importante a una adecuada selección vegetal, es la densidad de cobertura vegetal y el tamaño de cada uno de los individuos a plantar. Para efectos de esta investigación se seleccionaron esquejes individuales de 10cm de alto, tomando "ramas que tengan el mejor aspecto, es decir, que las hojas no estén dañadas, que tenga buen color, que no tenga plagas, que el tallo no se vea podrido" (Islas Luna, Reyes Santiago, & González Zorzano), además aquellas que fueran muy similares en sus características para evitar variaciones en el proceso experimental. Posteriormente, los esquejes cortados se dejaron 10 días a la sombra, con el fin de que el corte realizado cicatrizara, y las plantas iniciaran un proceso de crecimiento de la raíz antes de ser plantados.



En un principio, se planteó una densidad de vegetación baja, donde cada módulo estaba cubierto únicamente por 39 esquejes; 10 cm de espacio entre cada uno de ellos. Sin embargo, en las primeras semanas de experimentación, la baja densidad, y la amplia superficie de geotextil de color negro expuesta, provocó muy altas temperaturas en la superficie, por lo que se quemaron tallos y hojas de un alto porcentaje de vegetación.

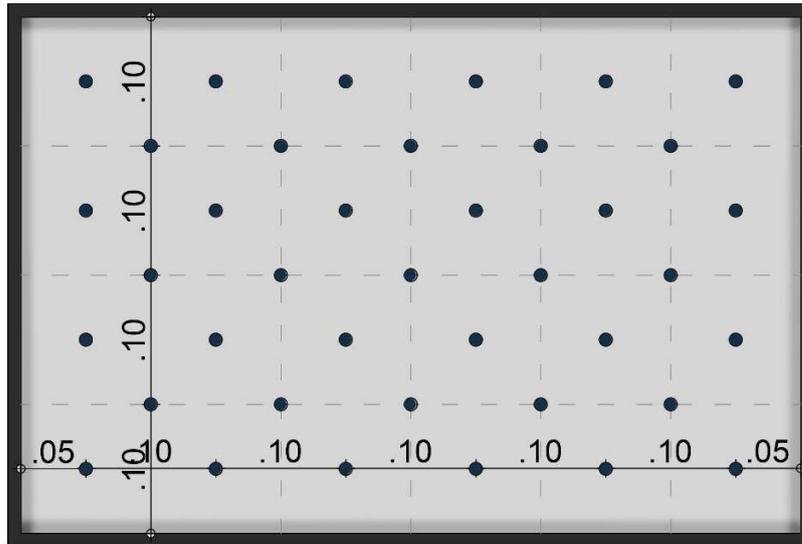


Ilustración 2 Versión 1 plantación

Se determinó aumentar la densidad de vegetación a una pulgada de espaciamiento entre cada planta, para un total de 90 esquejes por módulo y reemplazar todos los esquejes de manera que todos los módulos estuvieran en las mismas condiciones. Se inició entonces un nuevo el proceso de corte, acondicionamiento y plantación de 900 esquejes.

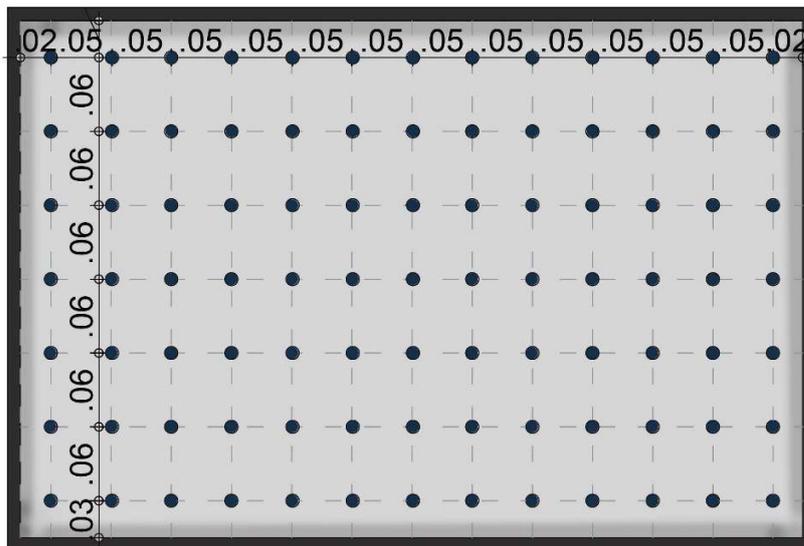
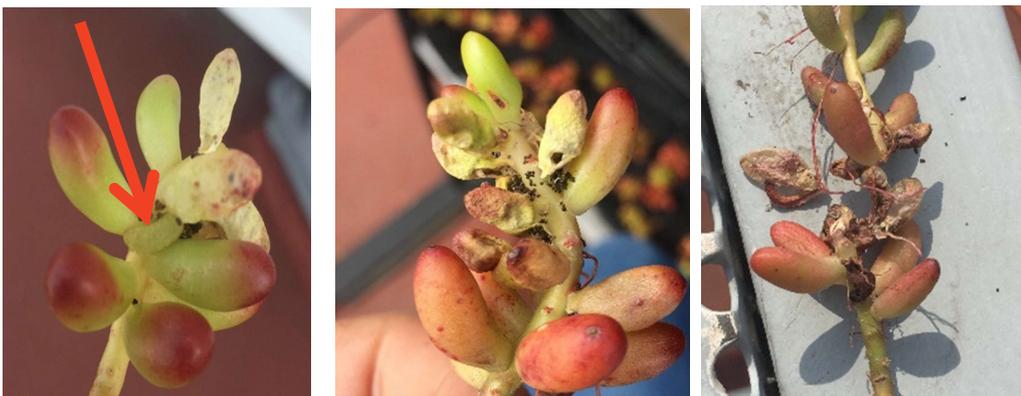


Ilustración 1 Versión 2 plantación

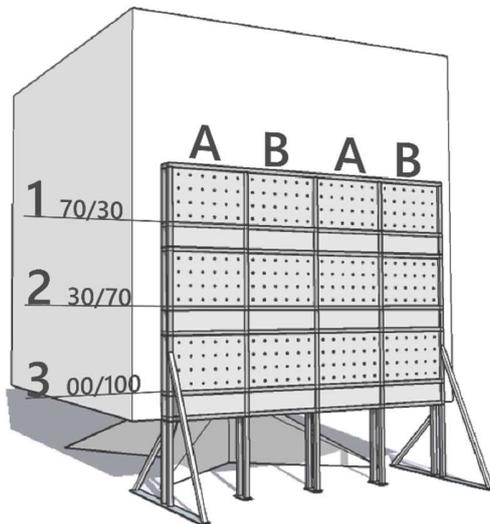
CONTROL CORRECTIVO DE PLAGAS: Dos semanas después de la plantación de este segundo grupo de vegetación, dado que se les estaba haciendo seguimiento todos los días, se identificó la presencia de gusanos de la especie de mariposa *Callophrys xami*. Estos gusanos se alimentan de la planta casi por completo; devoran tallos y se alimentan de la carnosidad de las hojas dejando únicamente la capa superficial de la hoja. Al momento de identificar la plaga, se aplicó un tratamiento orgánico contra gusanos que constaba de 4 a 6 aplicaciones. De todos modos, en cada uno de los módulos atacados, se retiraron los individuos afectados por la plaga y posteriormente se hizo una evaluación en cada uno de los módulos de la cantidad de individuos atacados, con el fin de reemplazar en todos los módulos la misma cantidad de individuos y mantener las mismas condiciones con el fin de evitar afectar el experimento lo menos posible. Se retiraron un total de 21 individuos por cada módulo y se posicionaron en el costado derecho en todos los módulos para controlar y hacerle seguimiento a los individuos nuevos y existentes, y evitar cualquier afectación al experimento.



Una vez terminado el tratamiento contra la plaga y que los individuos mostraran una estabilidad, se dio inicio al registro de las mediciones.

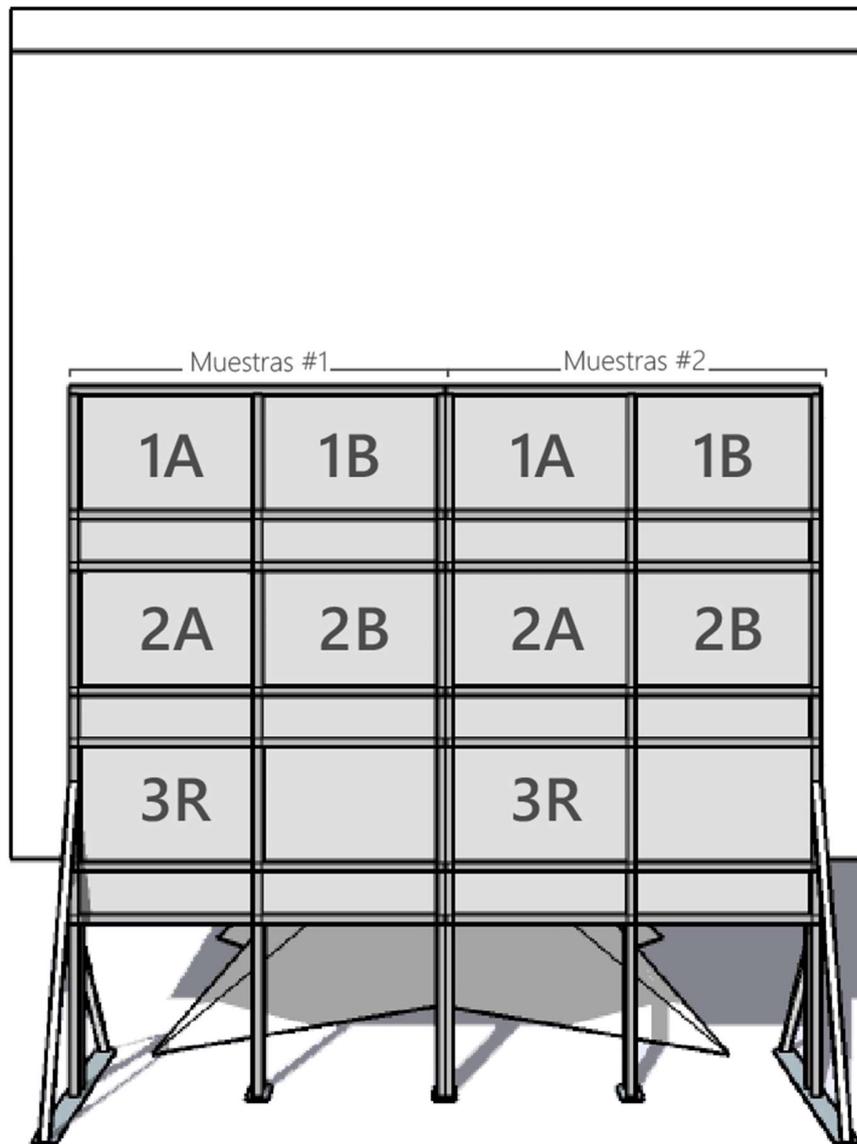
4.1.2.2. Medio de crecimiento

Se realizó un modelo experimental factorial que consistía en evaluar 2 tamaños de fibra de coco: Fina (FcF) y Grande (FcG), en 2 proporciones diferentes con una mezcla de referencia (MR) compuesta por: **33% Tierra Negra** como material mineral, **33% Agrolita** como material drenante y aligerante, y **33% Abono** como material orgánico (García, 2018) (Palomino, 2012). Como resultado, se obtuvieron entonces 5 sustratos diferentes: 1A (70% FcF / 30%MR), 1B (70% FcG / 30%MR), 2A (30% FcF / 70%MR), 2B (30% FcG / 70%MR), 3R (0 Fc / 100% MR)³⁷, y se analizaron 2 muestras de cada uno, para un total de 10 módulos contenedores de sustrato.



- 1** 70% Fibra de Coco - 30% Mezcla de referencia.
- 2.** 30% Fibra de Coco – 70% Mezcla de referencia.
- 3.** 0% Fibra de Coco – 100% Mezcla de referencia. (MR)
- A** Fibra de coco Fina. (FcF)
- B** Fibra de coco Grande. (FcG)

³⁷ FcF: Fibra de Coco Fina
FcG: Fibra de Coco Grande
MR: Mezcla de Referencia



- 1A** - 70% Fibra de Coco Fina- 30% Mezcla de referencia.
- 1B** - 70% Fibra de Coco Gruesa – 30% Mezcla de referencia.
- 2A** - 30% Fibra de Coco Fina- 70% Mezcla de referencia.
- 2B** - 30% Fibra de Coco Gruesa – 70% Mezcla de referencia.
- 2B** - 30% Fibra de Coco Gruesa – 70% Mezcla de referencia.
- 3R** – 0 % Fibra de Coco – 100% Mezcla de referencia.

La preparación de las mezclas se realizó en la azotea del edificio J de la unidad de posgrados. Cada módulo requirió 19.2L de mezcla repartidos según las proporciones determinadas anteriormente. Se realizaron las mezclas individualmente por módulo, en todos los casos se siguió el mismo proceso de elaboración:

1. En primer lugar se realizó la mezcla de referencia, para lo que se dispusieron los componentes según su proporción.
2. Se integraron los materiales hasta llegar a una mezcla homogénea.
3. Se procedió a incorporar la cantidad correspondiente de fibra de coco uniformemente.
4. Posteriormente se llenaron los módulos, previamente cubiertas sus caras por el geotextil.

4.1.2.3. Estructura



La superficie en la que estará instalado el sistema hace parte de un cubo experimental con dimensiones de 3.00m x 3.00m x 3.00m, que puede girar sobre su propio eje 360°. Esta tiene un área total de 9m² y está compuesta por: 1). Una estructura metálica y 2). La envolvente, un sistema doble capa de USG DUROCK y materiales aislantes en el interior con un espesor final de 0.30m. El manual de usuario de los módulos experimentales expresa que “en ninguna circunstancia estos deben ser perforados” (Sánchez, 2017), por lo que se determinó que el sistema estaría compuesto por una estructura metálica autoportante de 2.53m de ancho por 2.40m de alto. (Ver Anexo 2 y 3).



Para cada módulo se utilizó como base una caja de polietileno de alta densidad de 60cmx40cm



Se cubrió con geotextil de 300gr en todas las caras en su interior. Para proyectos futuros se recomendaría un gramaje menor, dado que, el espesor del geotextil en la capa frontal puede llegar a afectar el tallo de la vegetación cuando las perforaciones son muy angostas.



Posteriormente se llenó hasta la mitad de sustrato y se ubicó la primera sonda para la medición de la temperatura interior del sustrato.



Se completaron los 19L de sustrato requeridos para completar los 8cm de profundidad.



Se sobrepuso una geomalla de 5mm y posteriormente una rígida de 10mm, con el fin de conservar la estabilidad del sustrato. Cada malla se tensó y se fijó con cinchos aprovechando las aberturas de las caras de la caja de polietileno.



Posteriormente se cubrió la cara frontal con un geotextil y se demarcó la posición de cada planta.



Se procedió a realizar la plantación, mediante reproducción por esqueje. Estos fueron cortados con 3 semanas de anterioridad esperando el crecimiento de raíz para que pudieran ser plantados.³⁸

³⁸ Se plantaron inicialmente 39 esquejes, sin embargo, se pudo ver que el geotextil lograba muy altas temperaturas perjudicando el desarrollo de la vegetación. Por tal motivo, se decidió aumentar la superficie cubierta de cada módulo a 90 esquejes, esto se explicará con mayor detenimiento en el capítulo de resultados.

4.1.2.4. Sistema hídrico

El sistema de riego fue fundamental para la correcta preservación de la vegetación. Se realizó un riego por goteo, mediante el uso de mangueras de PEBD, y 13 goteros³⁹ autocompensantes de 2LPH, dispuestos en cada columna de vegetación para cada módulo. Adicionalmente se instalaron válvulas que permitieran un riego controlado y un bajo flujo de agua. Se dispusieron contenedores en la parte inferior de cada módulo para evaluar la cantidad de agua drenada y la capacidad del sistema de retención de agua lluvia.

La metodología de irrigación consistió en 2 riegos por semana, controlando rigurosamente cada descarga por un tiempo de 5 minutos para un riego de 0.43L/min por módulo; Se demarcó una línea de nivel base mínimo en el contenedor de agua principal, y con las líneas llenas, se suministraba al contenedor únicamente el volumen de agua determinado para 2 módulos⁴⁰. Así entonces, se controlaba la cantidad de descarga dejando únicamente una línea abierta hasta que el nivel de agua lograra de nuevo el nivel base.

³⁹ Se destinó un gotero por la línea de vegetación.

⁴⁰ Cada línea final abastece 2 módulos.



4.1.2.5. Cobertura Vegetal

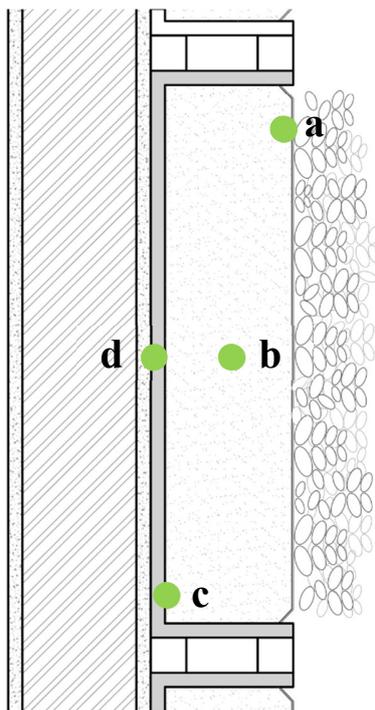
La propagación de la vegetación fue realizada mediante reproducción por esqueje⁴¹ de la especie *Sedum rubrotinctum*. En un inicio, se había determinado tener 39 individuos en cada módulo. Estarían ubicados con una separación de 10 cm en una retícula previamente demarcada sobre el geotextil. Esta separación daría mayor facilidad al momento de hacerle seguimiento al crecimiento de cada una de las plantas. Sin embargo, al cabo de un mes y medio, se vio que esta separación no era conveniente para la vegetación debido al calor adquirido por la alta exposición del geotextil que cubría la parte frontal de cada módulo. Se determinó aumentar la densidad de vegetación, de forma que el geotextil estuviera lo menos expuesto posible. Se plantaron entonces, 90 esquejes por módulo ubicados a una separación de 2.5cm cada uno, e igualmente de forma reticular.

⁴¹ Método de reproducción asexual, que consiste en cortar una sección de la planta primaria, bien sea tallo, rama o brote, que al estar en condiciones favorables se estimula la formación de raíces, obteniéndose una nueva planta.

Se realizó un registro fotográfico semanal y para efectos del análisis de la vegetación, se eligió de cada módulo la foto respectiva de la segunda semana de cada mes. De esta forma habría un mes de diferencia en cada imagen a evaluar. Con estos insumos se procedió a evaluar: La cobertura vegetal mediante la identificación del porcentaje cubierto por vegetación; esta información fue analizada con el programa de procesamiento de imágenes ImageJ. Y se evaluó el desarrollo vegetal, mediante la observación y caracterización del proceso de cada uno de los esquejes. Para esto, se determinó una escala de 5 calificaciones (Excelente, Bueno, Regular, Malo, Marchita), las cuales describirían el desarrollo de cada esqueje en comparación con el mes anterior. Se definieron ciertas propiedades y características a tomar en cuenta para determinar una calificación adecuada y objetiva en cada caso (tabla 5). Adicionalmente, a cada calificación se le asignó un color, y se demarcó con ese color el área respectiva a cada esqueje. Teniendo como resultado una imagen compuesta por pixeles de colores, que, en conjunto, indican si fue satisfactorio, o no, el desempeño de cada módulo. Esta evaluación también permitió tener un seguimiento estadístico de la vegetación y así cuantificar esquejes con buen o mal desempeño y esquejes marchitos. Consideraciones que fueron tomadas en cuenta al momento de contrastar esta información con el desempeño térmico y los resultados obtenidos en el laboratorio.

4.1.3. DESEMPEÑO TÉRMICO

Para evaluar el desempeño térmico, fueron instalados 3 sensores de temperatura en el interior de cada módulo; (a) en la parte más externa del módulo ***t Ext***, (b) En todo el centro del módulo al interior del sustrato ***tSust***, (c) al interior del sustrato en la parte posterior ***tPost*** y (d) inmediatamente detrás de cada módulo, sobre la superficie de la envoltura ***tSup***. Adicionalmente, se tomaron mediciones de referencia del área que no está cubierta por el sistema de naturación ***tSupExp***, con el fin de evaluar la fluctuación térmica de la superficie resultante de cada uno de los módulos y compararla con la fluctuación térmica del área que no está naturada.



a. Temp. Externa del módulo (***t Ext***)



10 sensores HOBO Pendant UA-001-64

c. Temp. Sustrato Posterior (***t Post***)



2 HOBO UX120-006M 4 canales análogo. 8 Sondas de temperatura.

b. Temp. Sustrato Interior (***t Sust***)

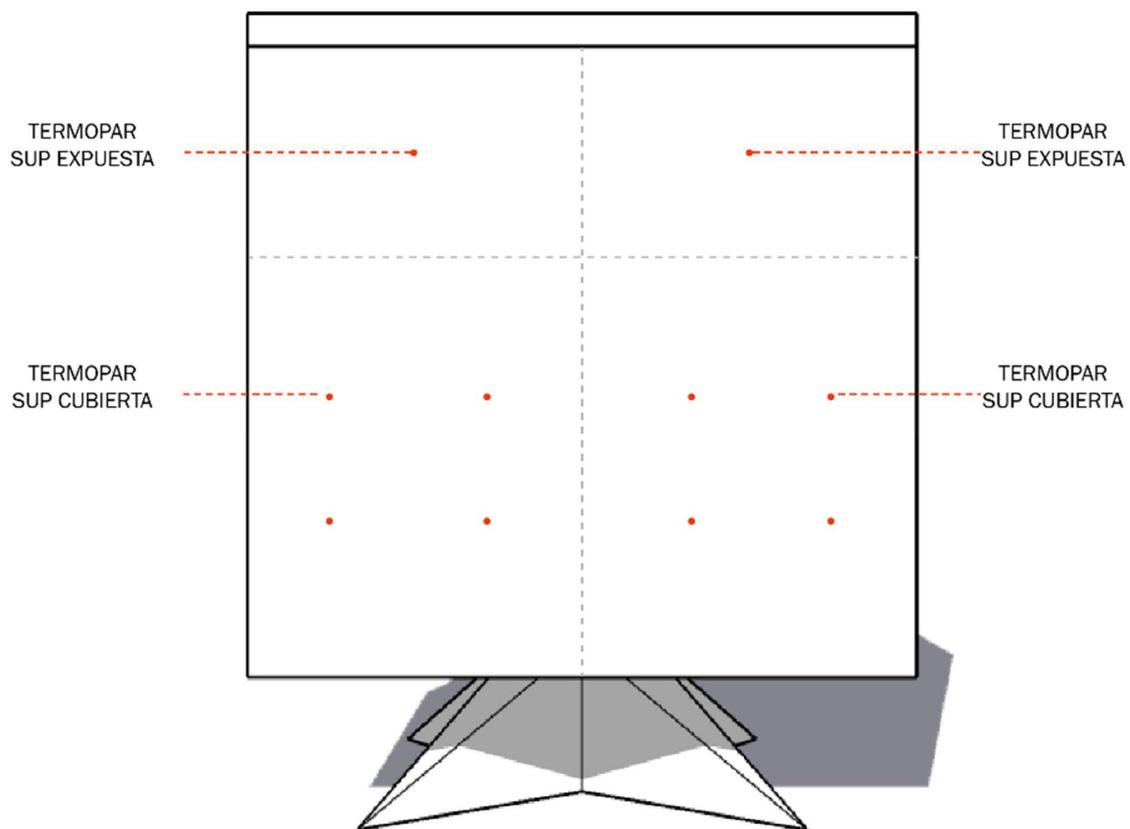


12 Sensores de temperatura Campbell 107 con sonda.

d. Temp. Superficie cubierta y superficie expuesta. (***t Sup*** y ***t SupExp***)

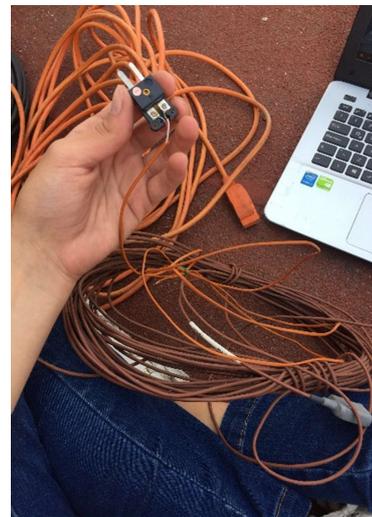


Termopares tipo K



La información obtenida por las sondas y los termopares se almacenó en un Datalogger CR300, protegido por una caja para exteriores INV 249 0350 y potenciado por una batería PS150 y un panel solar.

El registro de datos térmicos inició en octubre del 2019, sin embargo, por algunos ajustes que se hicieron al experimento en el mes de noviembre de 2019 que consistieron en aumentar la densidad de la vegetación y cambiar el geotextil, se tomó en cuenta la información a partir del mes de diciembre de 2019. Se analizó cada mes desde diciembre del 2019 hasta mayo del 2020, haciendo énfasis en la información de enero, el mes en que se registró el día más frío del año y de abril, mes en que se registró el día más cálido.



4.2. CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO.

Se realizaron pruebas de caracterización física y química para determinar la calidad del sustrato, con base en los rangos de nivel óptimo para un sustrato de cultivo en contenedor proporcionados por Miner, A. (1994). *Sustratos. Propiedades y caracterización*. Las pruebas se realizaron en el laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, de la Unidad de Posgrado, UNAM, haciendo uso de las metodologías definidas por la NOM-021-RECNAT-2000 "Que establece las

especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis” y al manual de técnicas de análisis: materiales ecológicos y constructivos⁴²

. Para el análisis se tomaron 3 muestras de cada sustrato, para un total de 15 muestras.

4.2.1. PARÁMETROS FÍSICOS

Los parámetros físicos se refieren a la organización estructural y morfológica que propician la relación aire – agua. (García, 2018, pág. 8). Los sustratos deben poseer una elevada porosidad, capacidad de retención de agua y al tiempo buen drenaje y buena aireación. (Ansorena, 1994, pág. 35). Cada uno de los componentes del sustrato tendrán partículas de diferente tamaño que darán lugar a poros “interparticulares”, y a su vez, estas tendrán poros en su interior, poros “intraparticulares”, que dependen de la naturaleza del material. (Ansorena, 1994, pág. 36) Los poros más grandes tienen mayor tendencia a conservar aire, mientras que los más pequeños retienen el agua (Ansorena, 1994, págs. 37 - 39). Es por esto por lo que es necesaria una adecuada distribución de tamaño de partículas, que, a su vez, proporcionará una adecuada capacidad de retención de agua y porosidad en el interior del sustrato (Ansorena, 1994, págs. 36 - 39). La evaluación de los parámetros físicos permite analizar la capacidad del sustrato de proporcionar un medio de crecimiento adecuado, determinado por la granulometría, la densidad, retención hídrica y aireación.

⁴² (López *et al.*, 2015).

Peso	Kg
Granulometría	% Tamaño de partículas
Textura	% Arenas, % Limos, % Arcillas.
Densidad aparente	Masa / Volumen total
Densidad real	Masa / Volumen sin espacio poroso
Porosidad	% Porosidad inicial / % Porosidad Final.

Tabla 4. Parámetros físicos: Unidades a media. Elaboración propia. Fuente (García, 2018), (Rodríguez, 2016), (Ansorena, 1994)

PESOS Para la determinación del peso de los sustratos, en un primer momento se pesó cada módulo al finalizar su elaboración antes de haber plantado la vegetación y con el sustrato completamente seco. También se tomó una muestra de 1L de cada sustrato, se dejó secar a temperatura ambiente cada sustrato y cada material por un periodo de 8 días y se registró el peso de cada uno. De esta forma se pudo determinar el peso volumétrico de cada componente y determinar cuál es el sustrato más liviano y el más pesado en estado seco.

GRANULOMETRÍA El proceso se realizó con una tamizadora digital marca Tyler modelo RX-812 del laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, el cual separa partículas de diferente tamaño mediante un movimiento oscilatorio a través de un tamiz. haciendo uso de 8 tamices, por un tiempo de 15 minutos. Posteriormente se pasó a pesar cada uno de los tamices con una báscula digital y una báscula digital de precisión para los tamices más pequeños con una menor cantidad.

Tamiz	Apertura de malla
#4	4.75mm
#6	3.35mm
#10	2.00mm
#18	1.00mm
#20	850 μ m
#25	710 μ m
>25	<75 μ m

Tabla 5. Tamaños de tamices utilizados en la determinación de la granulometría. Elaboración propia

Adicionalmente, se capturaron imágenes con un microscopio estereoscópico marca Motic SMZ-17, a una ampliación de 0.75X. Esto permitió observar la composición y características del tamaño de las partículas de cada uno de los sustratos.

TEXTURA La evaluación de la textura de cada sustrato se realizó por el método de sedimentación en probeta. Este consistió en humedecer 75g de sustrato en un vaso de precipitados con 50ml de agua y añadir 25 ml de peróxido de hidrógeno. Se calienta el sustrato en una parrilla eléctrica, hasta quemar completamente la materia orgánica. Posteriormente se vierte la mezcla en un a probeta y se adiciona agua hasta aforar 250 ml. Cuando se hayan sedimentado todas las partículas se mide con una regla la muestra completa siendo esta el 100% y se identifican los diferentes estratos conformados y se mide cada uno, para determinar el porcentaje de cada uno. Estos porcentajes se comparan con el triángulo de texturas para identificar el carácter de cada sustrato.

DENSIDAD APARENTE: Se define como la masa de un sustrato entre su volumen, relacionando el peso seco y el volumen total incluyendo el espacio poroso (Rodríguez, 2016). El procedimiento consistió en llenar una probeta

con 10 ml de sustrato y tomar su peso, se golpea la base de la probeta 10 veces con la misma fuerza sobre la palma de la mano, se afora hasta lograr los 10ml y se pesa de nuevo. Se hicieron 15 repeticiones de este procedimiento por muestra de sustrato. Finalmente, se calcula la densidad aparente aplicando la fórmula

$$\text{Densidad Aparente} = \text{masa} / \text{volumen} (10\text{cm}^3)$$

DENSIDAD REAL: Se define como el cociente entre la masa de las partículas del medio de cultivo y el volumen que ocupan, sin considerar los poros o huecos (Ansorena, 1994). Para sustratos minerales⁴³ suele ser próxima a 2,65g/ml, mientras que para los orgánicos⁴⁴ se toma el valor medio de 1.50 g/ml (Ansorena, 1994). La técnica que se utilizó fue de probeta, que consiste en obtuvo el peso del matraz solo (Pm) y posteriormente obtener el peso del matraz con sustrato 5g de muestra (Pms) y el sustrato solo (Ps). Luego con agua destilada se afora a 25ml y se deja en el desecador haciendo vacío durante 15 minutos para eliminar todo el aire del interior, y se deja reposando por 30 minutos. Luego se afora a los 25ml con agua, obteniendo el peso del suelo con agua (Psa) y se toma la temperatura. Posteriormente se retira la muestra de sustrato del matraz y se afora a 25ml únicamente con agua destilada para obtener el peso del matraz con agua (Pma). Finalmente, con los datos obtenidos se realizan las siguientes formulas

$$Ps = Pms - Pm$$

$$Vs = ((Pma - Pm) / Pw) - ((Psa - Pms) / Pw)$$

$$Dr = Ps / Vs$$

⁴³ Sustrato de origen inorgánico procedentes de la meteorización de rocas minerales.

⁴⁴ Sustrato de origen orgánico son procedentes de la descomposición de plantas o elementos de origen animal.

Donde:

Ps	Peso del sustrato
Pms	Peso del matraz con sustrato
Pm	Peso del matraz solo
Vs	Volumen sustrato
Pma	Peso matraz + agua
Pw	Densidad del agua
Psa	(Peso del matraz + suelo + agua destilada) - aire

ESPACIO POROSO: La densidad aparente se encuentra inversamente relacionada con la porosidad de un material, a mayor densidad, menor espacio poroso y viceversa (Rodríguez, 2016, pág. 67). Por medio del valor del % de espacio poroso se pueden inferir las condiciones hídricas y de aireación del suelo (García, 2018, pág. 23). Este se encuentra de la siguiente forma:

$$Ept\% = 100 (1 * Dap / Dr)$$

Donde:

Dap	Densidad Aparente
Dr	Densidad real
Ept	Espacio poroso total

HUMEDAD: Para evaluar el porcentaje de agua que retienen los sustratos se utilizó un método gravimétrico. Se tomó 1g de sustrato y se dejó en la mufla por un tiempo de 15 horas a 50°C. La diferencia en los pesos indica la humedad perdida, y se representa en porcentaje.

4.2.2. PARÁMETROS QUÍMICOS

La reactividad química de un sustrato se define como la transferencia de materia entre el sustrato y la solución nutritiva que alimenta las plantas a través de las raíces. (Rodríguez, 2016, pág. 70)

pH: El potencial de hidrógeno es una medida de concentraciones de iones H^+ en una solución acuosa (Ansorena, 1994, pág. 74). Determina la disponibilidad de los minerales dado que controla las relaciones químicas y biológicas en el sustrato⁴⁵. El nivel óptimo de pH para cultivo sin suelo se sitúa entre 5.5 y 6.8, en este rango se encuentran de forma asimilable la mayor parte de los nutrientes (Rodríguez, 2016, pág. 117).

La determinación del pH se realizó mediante el método de papel tornasol. El cual es usado para medir la concentración de iones de hidrógeno en una sustancia, mediante una escala de pH de ácido a alcalino, representados con diferentes colores.

MATERIA ORGÁNICA: El porcentaje de materia orgánica varía en función de la naturaleza de las mezclas empleadas para la elaboración de los sustratos (Rodríguez, 2016, pág. 117). Para el análisis de materia se utilizó el método por ignición, en la que se calcinó la materia orgánica con en una mufla de marca Felisa, modelo FE-340, llevando 1.0000g de cada muestra a los 550°C por 4 horas. La diferencia en el peso en la muestra determina el porcentaje de materia orgánica contenida.

⁴⁵ Información tomada de la clase de Naturación dirigida por la Dra. Ilse García Villalobos. Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, ofrecido por la UNAM.

5. RESULTADOS

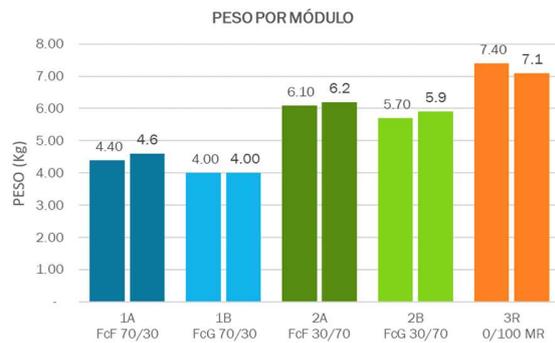
5.1. PARÁMETROS FÍSICOS

5.1.1. PESOS

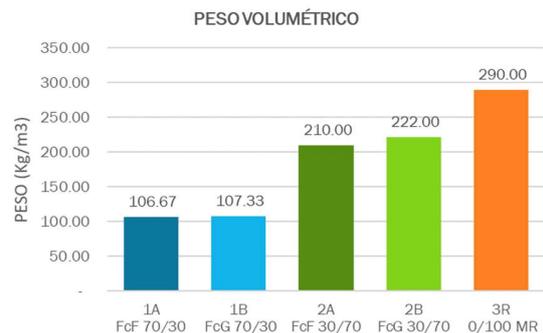
La gráfica 1. muestra los pesos obtenidos por módulo al momento de terminar el armado, con el sustrato completamente seco y previo a realizar la plantación. El menor peso fue 4.0kg correspondiente a los módulos con fibra de coco grande y mayor proporción de fibra de coco, 1B (FcG 70/30). Los de mayor peso fueron los de solo mezcla de referencia 3R(0/100) llegando hasta 7.4kg.⁴⁶

FC/M	A Fina		B Grande	
	A Fina	B Grande	A Fina	B Grande
70/30	4.4Kg	4.0Kg	4.6Kg	4.0Kg
30/70	6.1kg	5.7kg	6.2Kg	5.9kg
00/100	7.4kg		7.1kg	

La gráfica 2. muestra el peso volumétrico por sustrato, siendo más livianos los de mayor contenido de fibra de coco, sin una diferencia considerable entre los tamaños de fibra evaluados.



Gráfica 1. Peso por módulo. Elaboración propia.



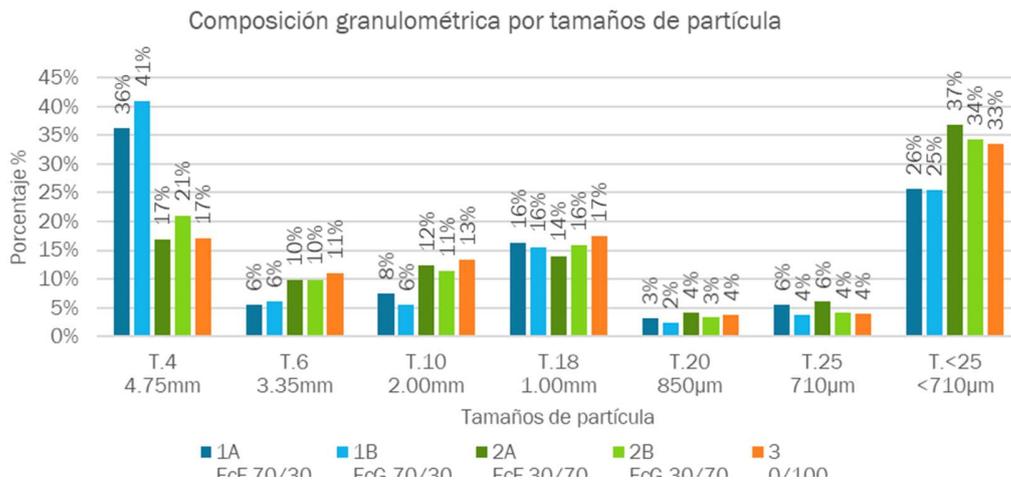
Gráfica 2. Peso volumétrico. Elaboración propia.

⁴⁶ Este peso incluye el peso del sustrato, del contenedor, de las geomallas y la capa de geotextil.

5.1.2. GRANULOMETRÍA

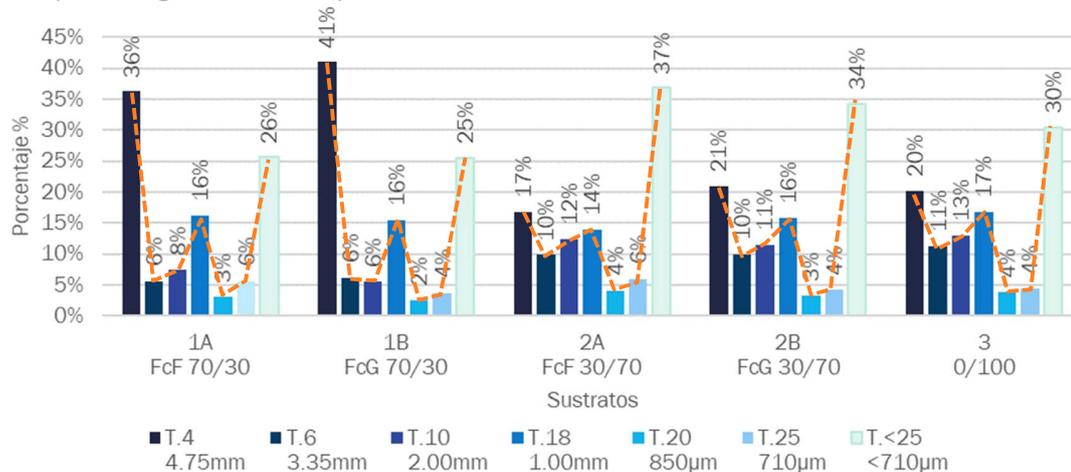
Las gráficas 3 y 4 nos indican las proporciones de la composición de cada uno de los sustratos. Teniendo en cuenta que: 1) **“La porosidad aumenta a medida que aumenta el tamaño de partícula”** (Ansorena, 1994, pág. 37), 2) **Los poros más grandes tienen mayor tendencia a conservar aire, mientras que los más pequeños retienen el agua** (Ansorena, 1994, págs. 37 - 39), y que, 3) **De las partículas más pequeñas (entre otros factores) depende la capacidad de intercambio catiónico, por ende, la cantidad de nutrientes disponibles** (Ansorena, 1994, págs. 25-29), se puede entonces, tener una noción preliminar del comportamiento de cada uno de los sustratos.

Hay una similitud en el comportamiento entre los sustratos con menor proporción de fibra de coco (2A - FcF 30/70, 2B - FcG 30/70) y la mezcla de referencia (3R 00/100MR); se puede apreciar un leve equilibrio entre la cantidad de partículas entre los 4.75mm y 1mm, hay menor presencia de tamaños 850µm y 710 µm y un incremento prominente en las partículas <710µm, mientras que, el comportamiento de los sustratos con mayor proporción de fibra de coco (1A FcF 70/30, 1B FcG 70/30) es opuesto, con mayor presencia de partículas de tamaños 4.75mm, de partículas <710µm, seguido de partículas de 1mm.



Gráfica 3. Composición granulométrica por tamaños. Elaboración propia.

Composición granulométrica por sustratos



Gráfica 4. Composición por sustrato. Elaboración propia.

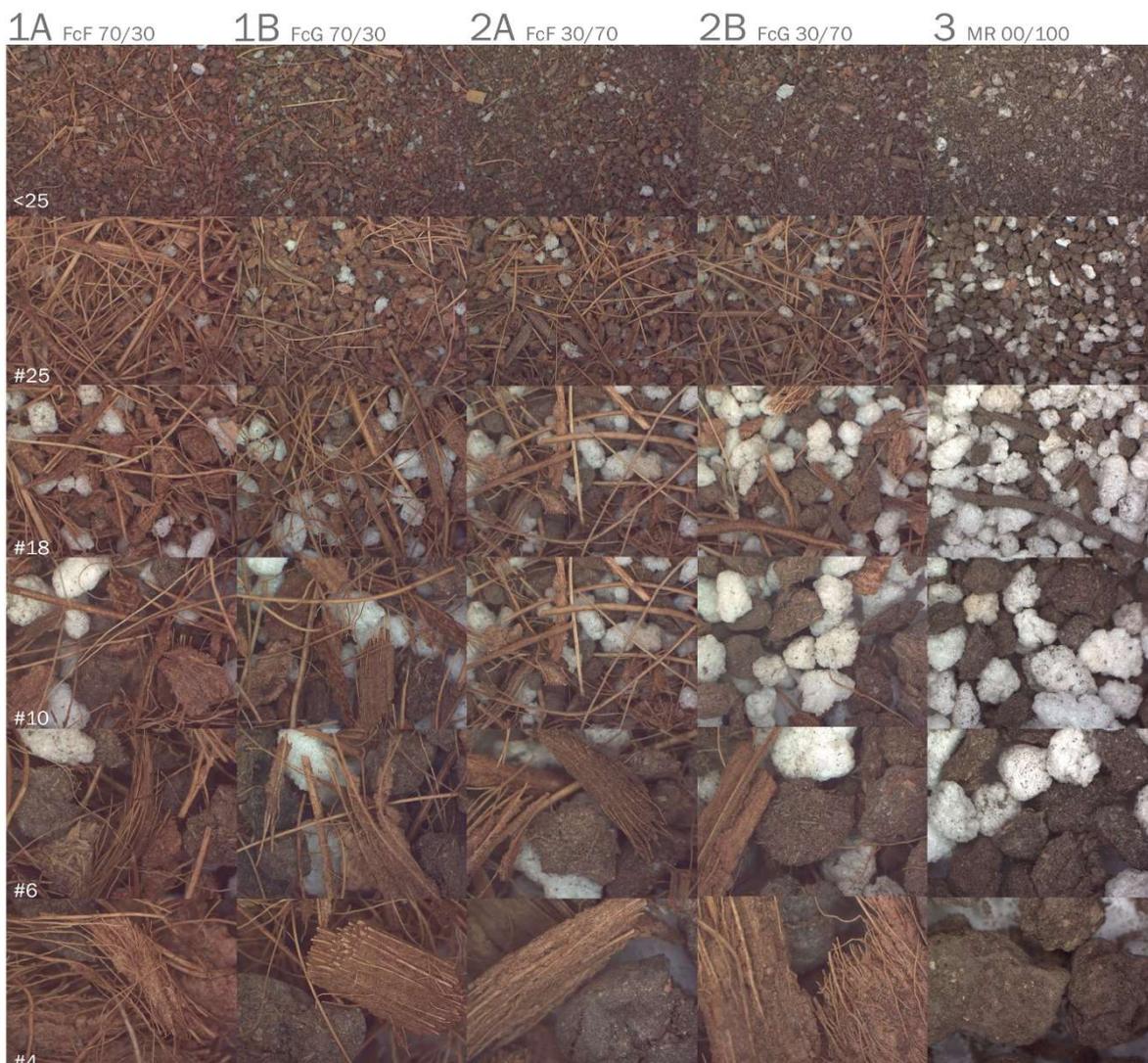


Ilustración 3. Imágenes microscopio estereoscópico 0.75X. Elaboración propia.

1A FcF 70/30 – Fibra de Coco Fina 70% / Mezcla de Referencia 30%
 1B FcG 70/30 – Fibra de Coco Gruesa 70% / Mezcla de Referencia 30%

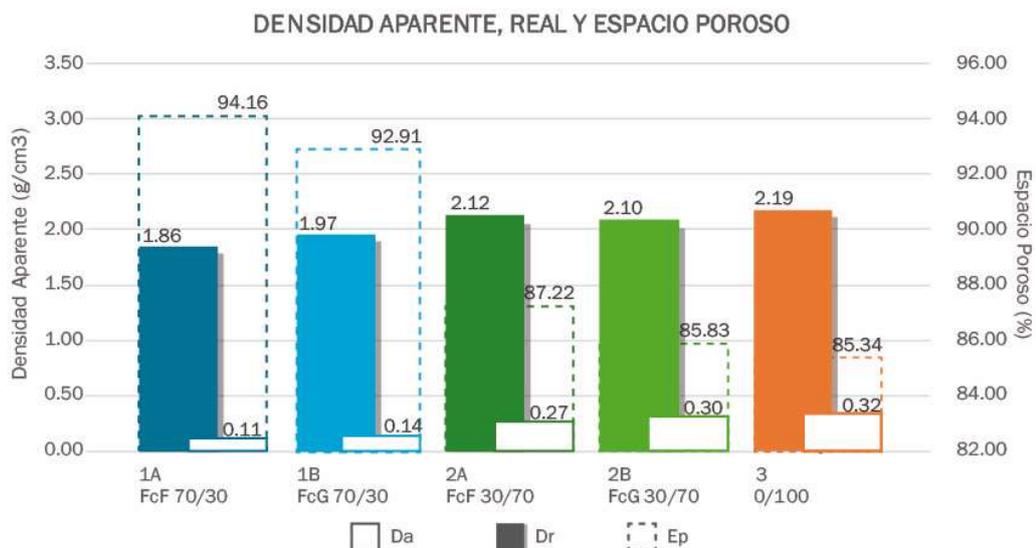
2A FcF 30/70 – Fibra de Coco Fina 30% / Mezcla de Referencia 70%
 2B FcG 30/70 – Fibra de Coco Gruesa 30% / Mezcla de Referencia 70%
 3R MR100 – Fibra de Coco 0% / Mezcla de Referencia 100%

5.1.3. TEXTURA

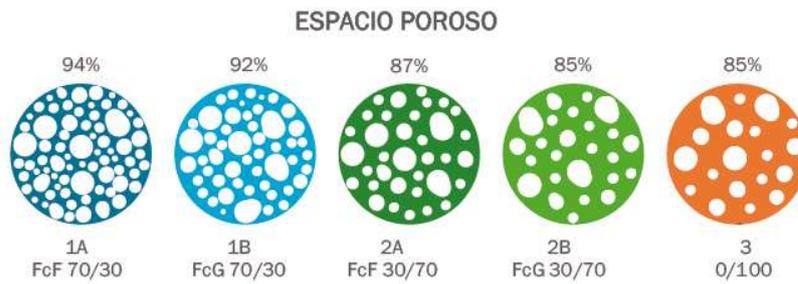
Esta prueba queda suspendida debido al cierre de las instalaciones del posgrado ocasionado por la contingencia originada por el virus COVID-19.

5.1.4. DENSIDAD APARENTE, REAL Y ESPACIO POROSO

Los valores de referencia indicados en la Tabla 1 expresan que el nivel de densidad aparente adecuado es menor a $0,4 \text{ g/cm}^3$, densidad real en un rango de 1.45 a 2.65 y espacio poroso mayor a 85%. En ese sentido, como puede verse en la Gráfica 5 todos los sustratos poseen un nivel óptimo de densidad en los tres factores. Aun así, los sustratos con menor cantidad de fibra de coco y la muestra de referencia, tienen valores de densidad muy similares y superan a los de mayor cantidad de fibra de coco. Adicionalmente, no hay diferencia notable en los resultados obtenidos entre los diferentes tamaños de fibra de coco. El sustrato con mayor cantidad de fibra de coco fina obtuvo el resultado más alto a nivel de porosidad con un 94%, mientras que la mezcla de referencia obtuvo el menor con un 85%.



Gráfica 5 Densidad aparente, real y espacio poroso. Elaboración propia.



Gráfica 6 Densidad aparente, real y espacio poroso. Elaboración propia.

5.2. PARÁMETROS QUÍMICOS

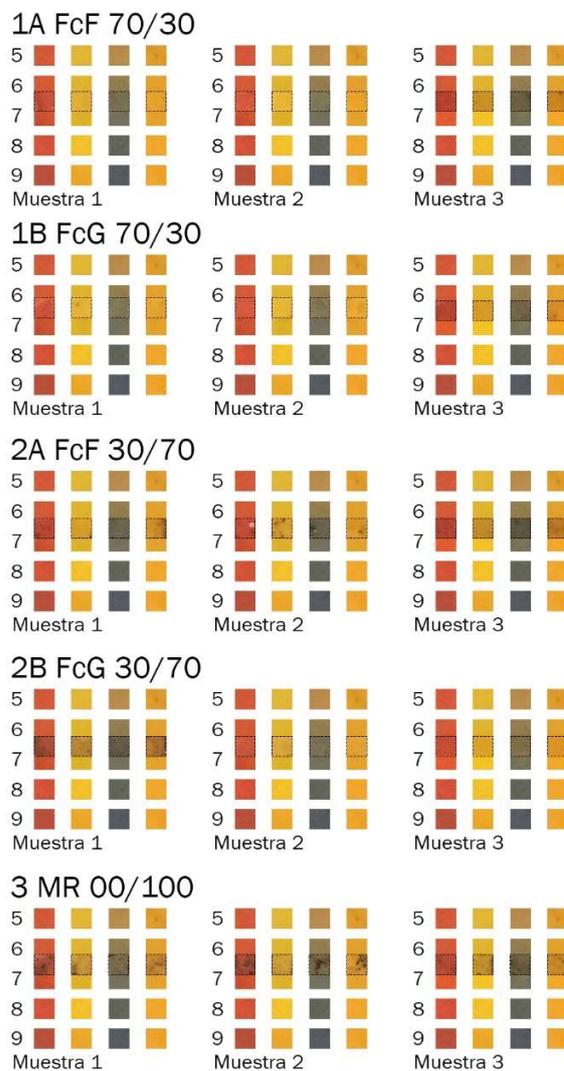


Ilustración 4. Evaluación de pH con papel tornasol. Elaboración propia.

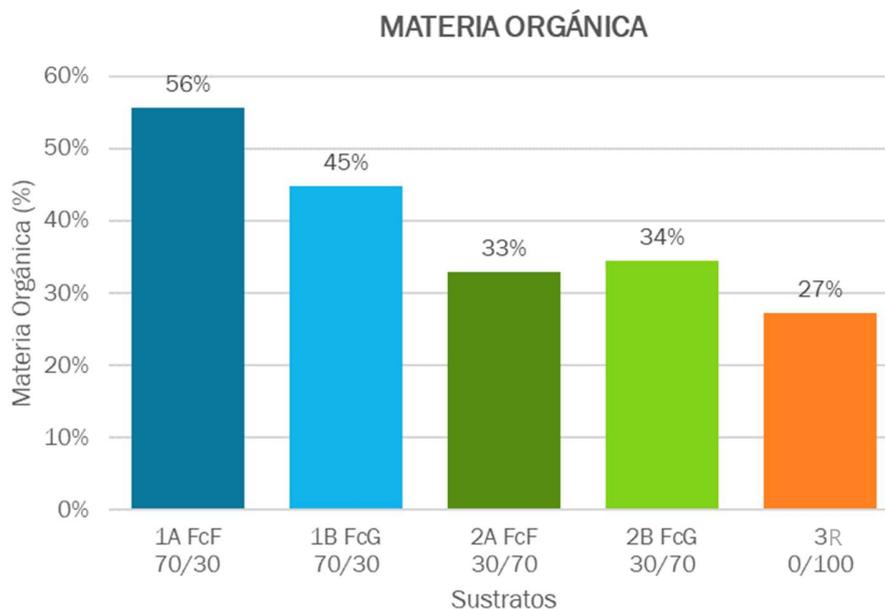
5.2.1. POTENCIAL DE HIDRÓGENO

El pH se determinó mediante el método de papel pH. Se pudo identificar que todos los sustratos están en rangos en rangos de ligeramente ácidos a neutros (pH6 a pH7). Como se puede ver en la ilustración 2, podría decirse que aquellos sustratos con más cantidad de fibra de coco tienen una tendencia más hacia el nivel 7 de pH, mientras que, los de menor cantidad de fibra de coco y la muestra de referencia tienden hacia el nivel 6 de pH. Queda pendiente realizar la prueba con un potenciómetro para obtener niveles de pH más específicos y realizar la comparación entre los sustratos.

Para un sustrato en contenedor se prefiere que los niveles sean ligeramente ácidos (pH5.2 – pH6.3) (Ansorena, 1994) (pH5.5 – pH6.5) (Rodríguez, 2016, pág. 70).

5.2.2. MATERIA ORGÁNICA

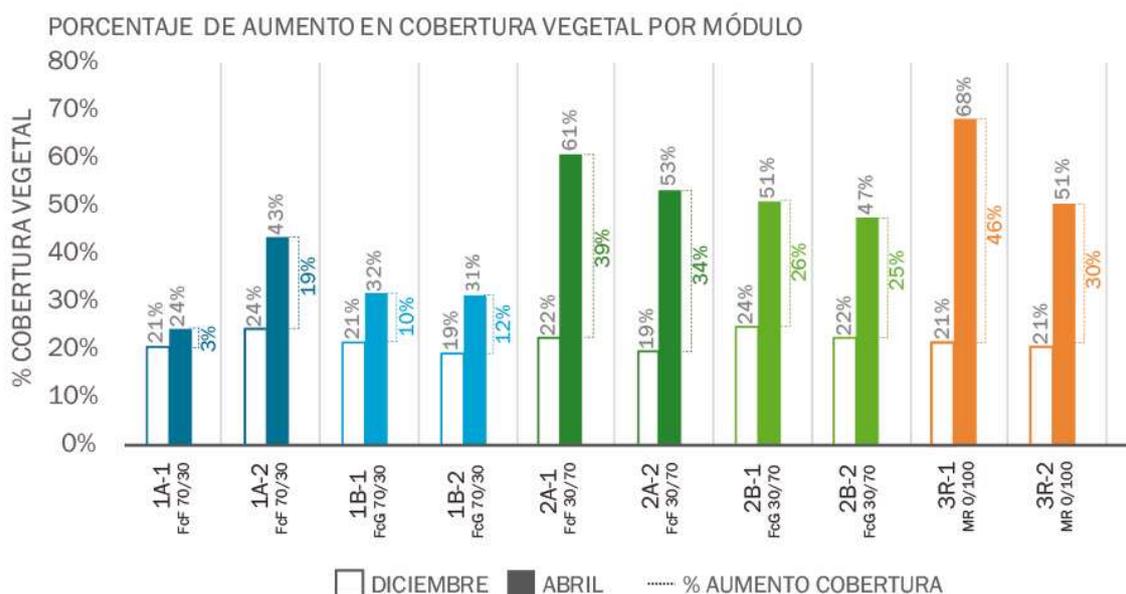
La Fibra de coco tiene un impacto importante sobre el porcentaje de materia orgánica de las mezclas. En la gráfica 6, se puede apreciar que el valor correspondiente al sustrato 1A (FcF 70/30) con 56% de MO, duplica al menor, correspondiente a la mezcla de referencia, el sustrato 3R(00/100MR) con 27% de MO. El porcentaje de MO aumenta en los sustratos 1A (FcF 70/30) y 1B (FcG 70/30) por la mayor presencia de fibra de coco en la mezcla, siendo más prominente el porcentaje materia orgánica del sustrato 1A(FcF 70/30). Los sustratos 2A(FcF 30/70) y 2B(FcG 30/70), tienen una cantidad resultante similar a al porcentaje de materia orgánica presente en la mezcla de referencia.



Gráfica 7. Porcentaje de materia orgánica. Elaboración propia.

5.3. COBERTURA VEGETAL

Mediante el método de identificación del porcentaje cubierto por vegetación, información analizada con el programa de procesamiento de imágenes ImageJ, se pudo identificar el área cubierta por la vegetación en cada uno de los módulos. En la gráfica 7 se puede apreciar que los módulos de mayor proporción de mezcla de referencia: 2A (FcF 30/70), 2B (FcG 30/70) y solo muestra de referencia (3R), fueron



Gráfica 8. Porcentaje de cobertura vegetal por módulo. Elaboración propia.

los que mayor cobertura lograron entre los meses de diciembre a abril.

En la ilustración 3 se puede identificar que los módulos con mayor cantidad de fibra de coco tuvieron un aumento en promedio del 11%. Los de fibra de coco fina, mostraron un resultado levemente mayor, respecto a los de fibra de coco grande. Adicionalmente, se puede ver que los de menor o nulo contenido de fibra de coco, tuvieron un aumento promedio superior al 30%.

DICIEMBRE

ABRIL



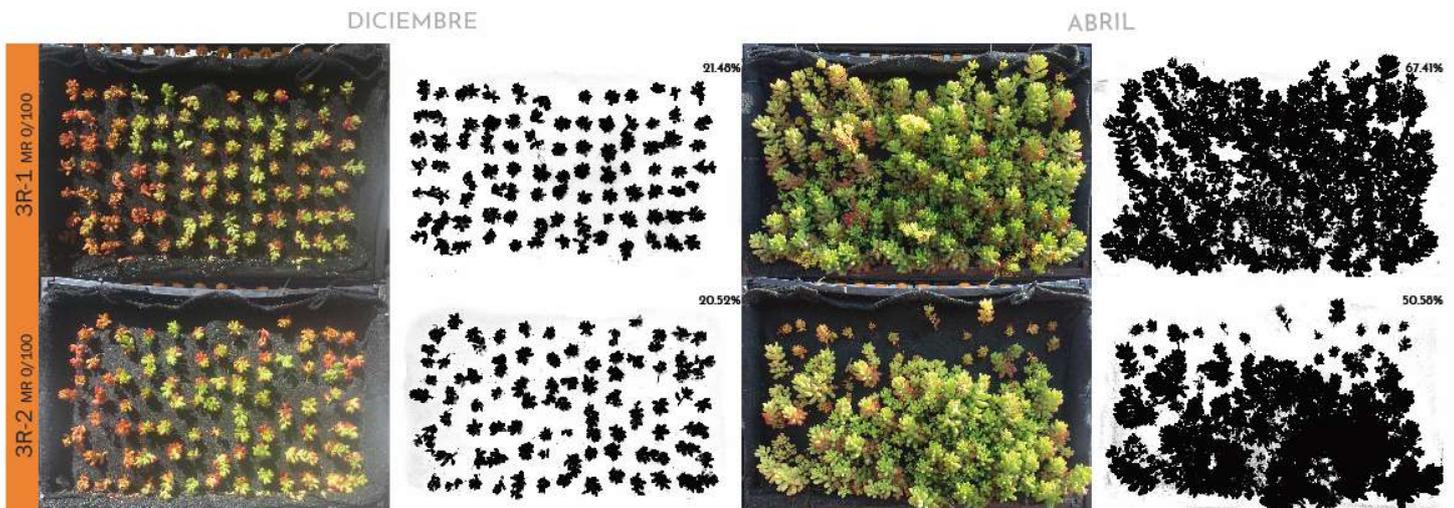


Ilustración 5. Cobertura vegetal. Elaboración propia.

Se realizó un análisis cualitativo del desarrollo de la vegetación por cada individuo, con el fin de identificar los cambios en la vegetación de cada uno de los módulos. La Ilustración 4 muestra las imágenes tomadas de cada módulo durante los meses de diciembre a abril (una por cada mes). La ilustración 5 muestra estas mismas imágenes, pero con un recuadro sobrepuesto por individuo, cuyo color indica una calificación otorgada, resultado de la comparación del desarrollo de cada individuo respecto al mes anterior. Para esto, se estableció una escala de valor de 5 posiciones, con el fin de asignar una calificación objetiva al identificar en el individuo una o varias características definidas en la Tabla 5. El resultado fue un mapa de píxeles en el que se puede identificar fácil y rápidamente los módulos con mejor desarrollo vegetal.

EXCELENTE	<ul style="list-style-type: none"> - Se aprecia un crecimiento significativo de la planta. - Presenta nuevos brotes. - Apariencia fuerte y saludable: de color verde o rojo intenso. - Hojas robustas y fuertes. 	DEFICIENTE	<ul style="list-style-type: none"> - Presenta una disminución de tamaño respecto el mes anterior. - Pérdida de hojas. - Apariencia seca a punto de marchitez. - Tallo seco
BUENO	<ul style="list-style-type: none"> - Se aprecia un crecimiento significativo de la planta. - Apariencia saludable: de color verde o rojo. 	MARCHITA	<ul style="list-style-type: none"> - Espacio vacío por pérdida del individuo. - Disminución significativa de su tamaño, sumado a tallo completamente seco y hojas secas y quemadas.
REGULAR	<ul style="list-style-type: none"> - Se mantuvo igual o no hubo crecimiento significativo de la planta - Presenta un color pálido con tendencia a amarillo. - Cantidad de hojas estable pero delgadas. 		

Tabla 5 Características a tomar en cuenta para asignar calificación



Ilustración 6. Desarrollo vegetal por módulo en 5 meses de experimentación. Elaboración propia.

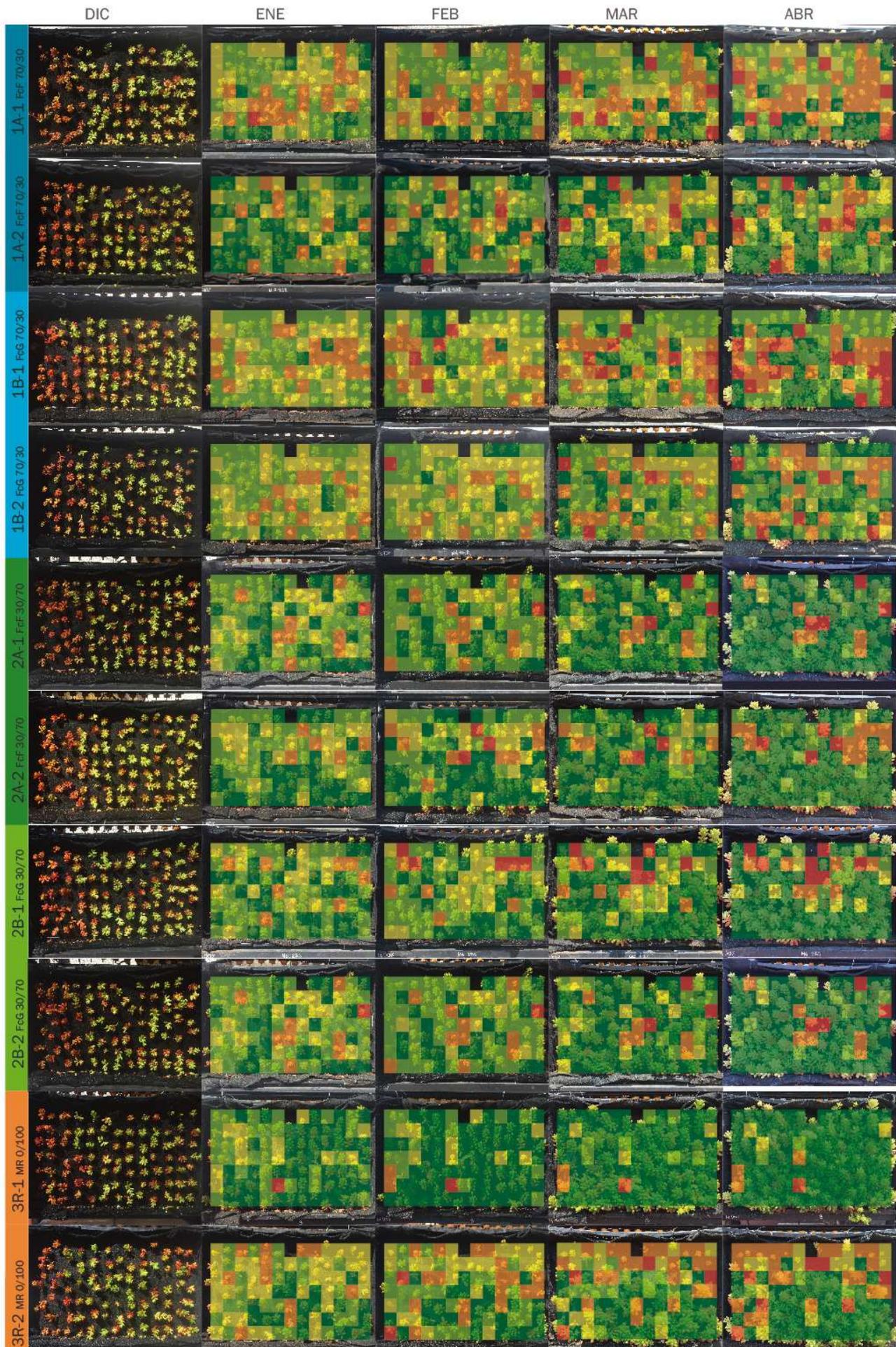
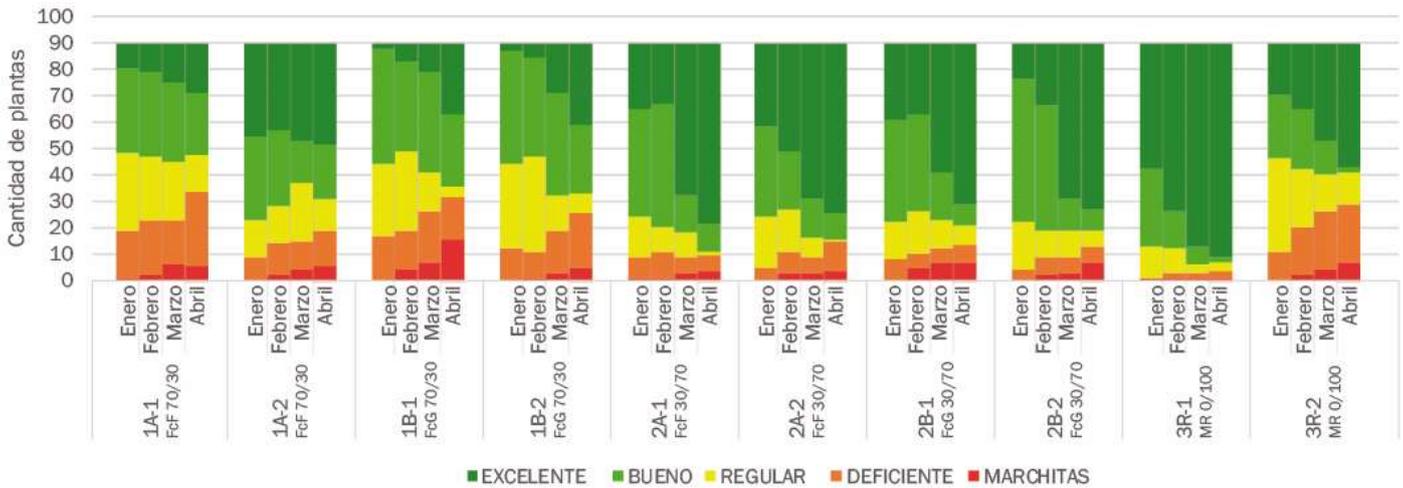


Ilustración 7. Análisis del comportamiento vegetal por módulo en un periodo de 5 meses. Elaboración propia.

COMPORTAMIENTO VEGETAL ENERO - ABRIL

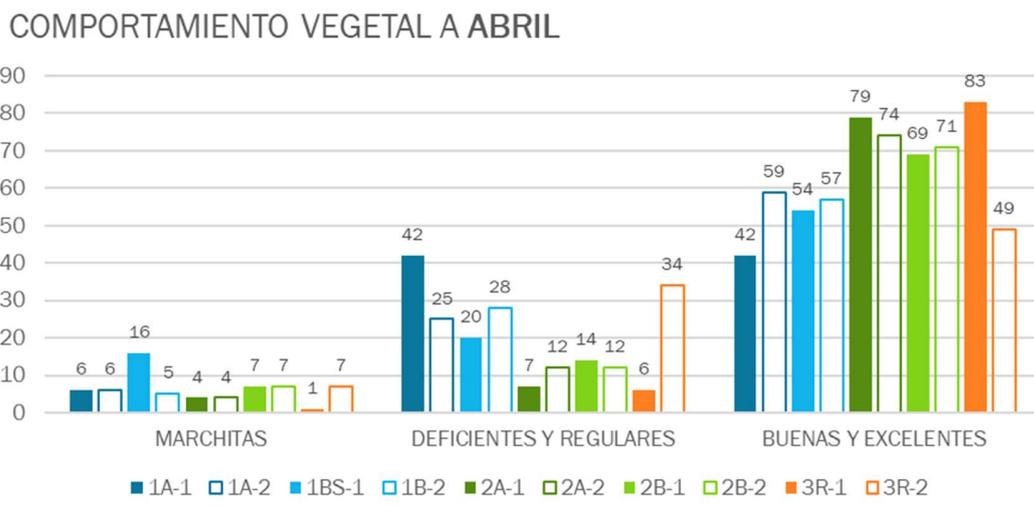


Gráfica 9. Comportamiento vegetal por módulo de enero a abril. Elaboración propia.

En las ilustraciones de 3 a la 5, se puede apreciar la evolución de la vegetación por un periodo de cinco meses. Se puede ver una clara diferencia entre los módulos de menor o nula cantidad de fibra de coco (2A – FcF 30/70, 2B FcG 30/70, 3R 0/100) y los de mayor cantidad de fibra de coco (1A – FcF 70/30, 1B – FcG 70/30). Los primeros, muestran una tendencia a incrementar la cantidad de individuos con desarrollo excelente, disminuyendo o manteniendo relativamente estable aquellas con desarrollo regular o deficiente. Por otro lado, los módulos con mayor proporción de fibra de coco (1A – FcF 70/30, 1B – FcG 70/30) tienen un aumento leve de aquellas clasificadas como excelente, pero también aumenta la cantidad de plantas deficientes en su desarrollo.

En la ilustración 3, en la segunda muestra del módulo de solo mezcla de referencia (3R-2), se puede identificar que la vegetación con más bajo desarrollo está localizada en la parte superior del módulo, mientras que, en la parte inferior, la vegetación tuvo un muy buen comportamiento, similar a su muestra par (el módulo 3R-1). Esto fue resultado del asentamiento del sustrato y falta de tensionamiento de las mallas del módulo. En los otros sustratos con fibra de coco, es variable la ubicación de la vegetación con un buen o regular comportamiento; no se logra identificar una zona tan clara o definida y se puede ver una distribución de forma aleatoria.

En la gráfica 10 se expone el comportamiento de la vegetación al mes de abril. El módulo con mayor cantidad de individuos con descripción Bueno y Excelente fue una de las muestras de mezcla de referencia (3R - 0/100MR), seguido de los módulos con menor cantidad de fibra de coco fina (2A - FcF 30/70). El módulo con mayor número de plantas marchitas fue el sustrato con fibra de coco grande en mayor proporción de fibra de coco (1B - FcG70/30), sin embargo, en los otros módulos la cantidad de marchitas es muy similar. Los módulos con menor cantidad de vegetación con descripción deficiente y regular fueron los módulos en proporción menor proporción de fibra de coco, sin diferencia en el tamaño de fibra de coco (2ª – FcF 30/70, 2B FcG 30/70), junto con uno de los módulos de 3R(0/100MR).



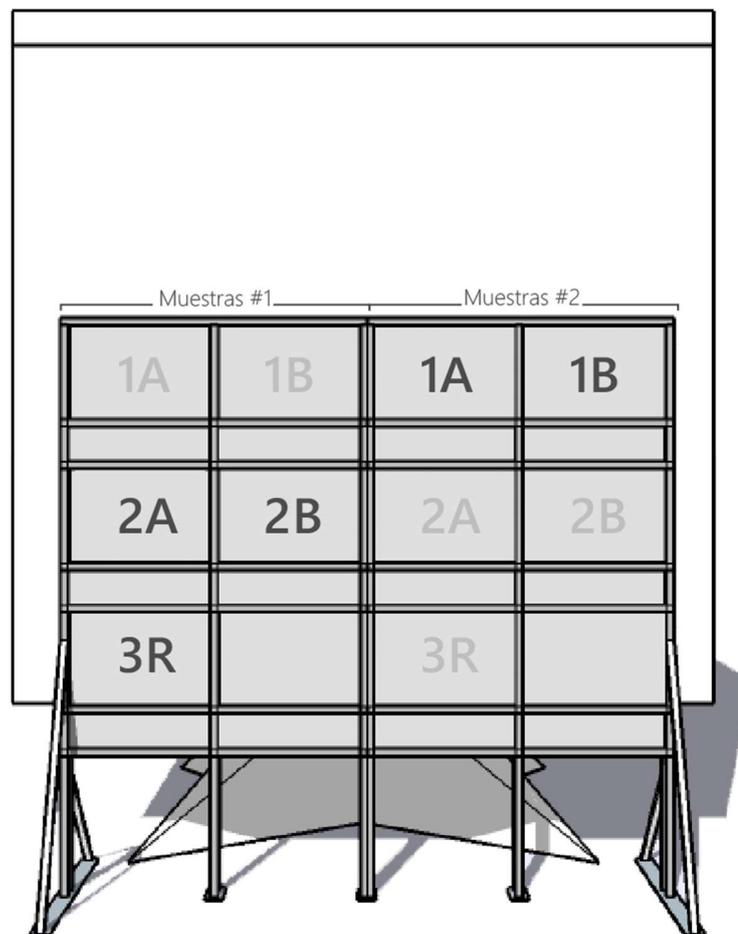
Gráfica 10. Comportamiento vegetal al mes de abril. Elaboración propia.

5.4. DESEMPEÑO TÉRMICO

Se determinó evaluar el día más frío del mes de enero (el día más frío del mes más frío del año), y el día más cálido de abril, que, a pesar de ser normalmente el segundo mes más cálido del año, los resultados de temperatura y precipitación se compararon con los resultados obtenidos el mes de mayo (el mes más cálido del año) y se vio que fueron más altas las temperaturas en el mes de abril, por lo que se determinó evaluar el día más cálido de este mes.

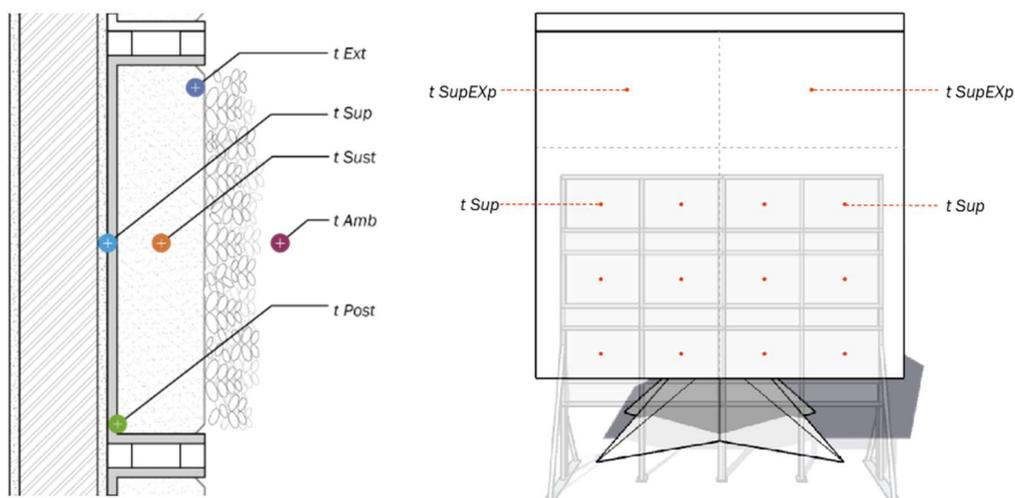
Para el análisis de resultados del desempeño térmico, se definió analizar la muestra de cada sustrato que obtuvo mejor desarrollo vegetal, los módulos:

1A-2, 1B-2, 2A-1, 2B-1).

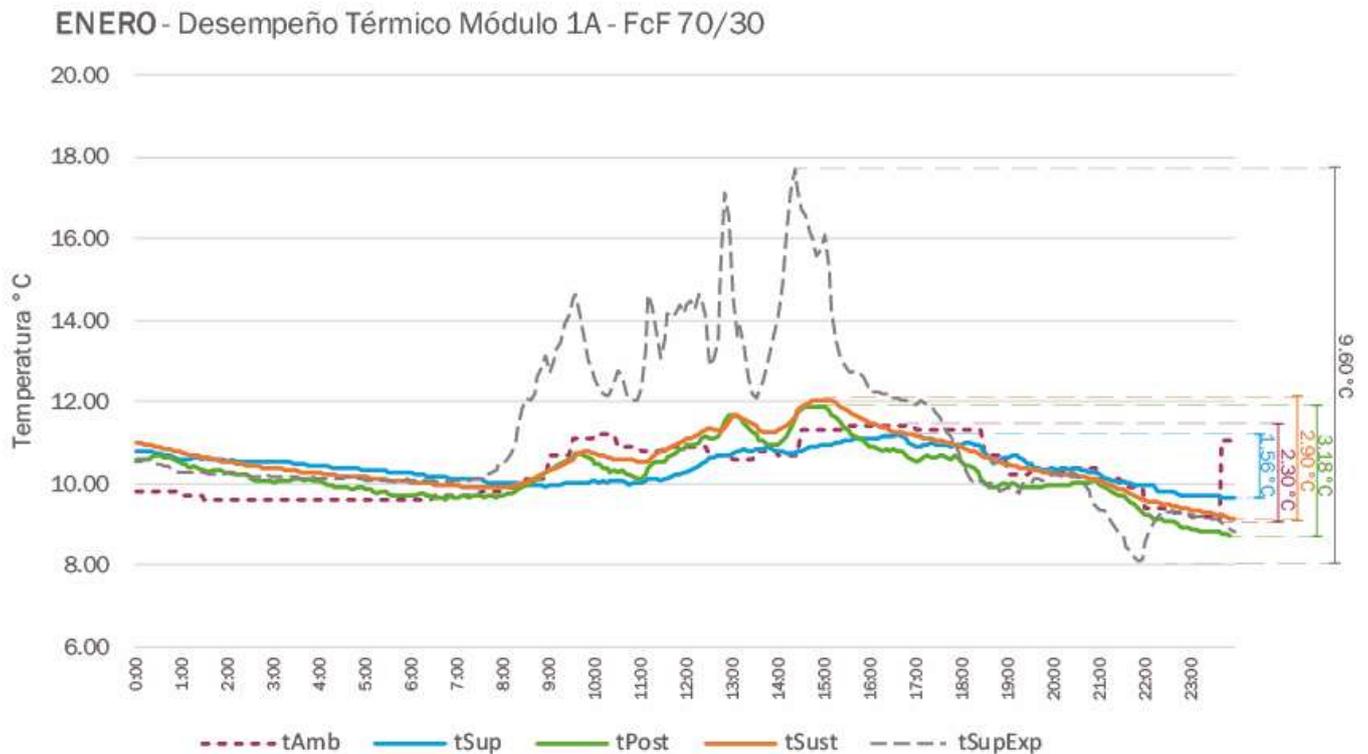


Los resultados del desempeño térmico se mostrarán de dos formas: En primer lugar, se analizará el comportamiento interior de cada módulo, con el fin de evaluar la transferencia de calor hacia la envolvente de manera individual, y en segunda instancia, se evidenciarán las comparativas de los resultados obtenidos entre los diferentes tamaños de fibra de coco, y a su vez, de las diferentes proporciones de mezcla. De esta forma, se podrá determinar la zona al interior del módulo que mayor efecto tiene en la disminución de la fluctuación térmica y definir cuál de los sustratos con fibra de coco tuvo mejor desempeño térmico para cada uno de los días evaluados.

Algunos problemas técnicos limitaron la obtención de información, por lo que únicamente se pudo analizar información externa (t_{Ext}) de los sustratos 1B, 2A y 2B del mes de enero. Adicionalmente se obtuvo registro únicamente de las posiciones interiores (t_{Post} y t_{Sust}) de los módulos de mezcla de referencia, sin embargo, se tomará esta información como base para comparación con los módulos con fibra de coco.



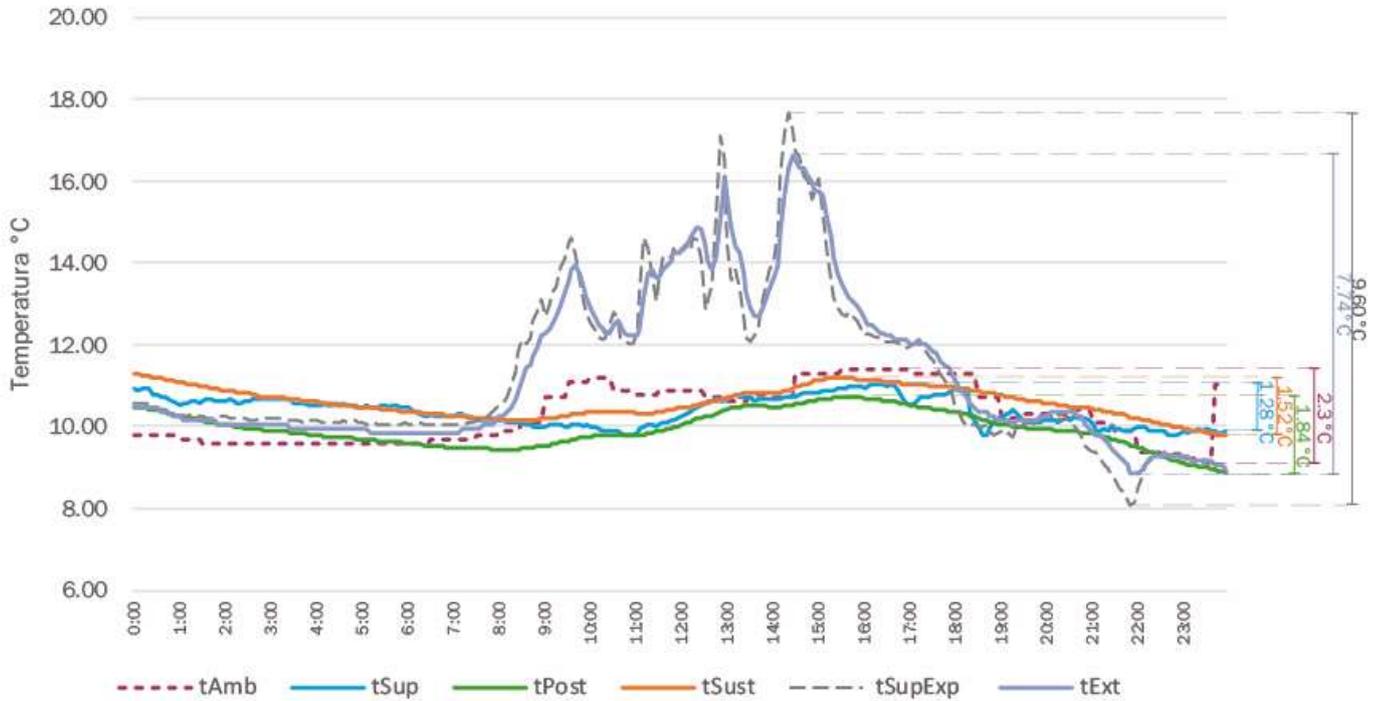
5.4.1. ENERO – EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO POR SUSTRATO



Gráfica 11. Desempeño térmico del módulo 1A FcF 70/30 - enero. Elaboración propia.

En la gráfica 111 se muestra el desempeño térmico del sustrato 1A (FcF 70/30) en el día frío. Se puede apreciar que, durante las horas de incremento en la temperatura ambiente, las temperaturas interiores del módulo (tPost, tSust) aumentan con una tendencia similar, mientras que, la temperatura de la superficie de la envolvente (tSup) tiene un ligero incremento y no alcanza a superar la temperatura ambiente (tAmb). Al bajar la temperatura ambiente, la temperatura de la superficie se mantiene levemente superior a las otras posiciones, y hasta 2°C más alta que la temperatura de la superficie expuesta (tSupExp).

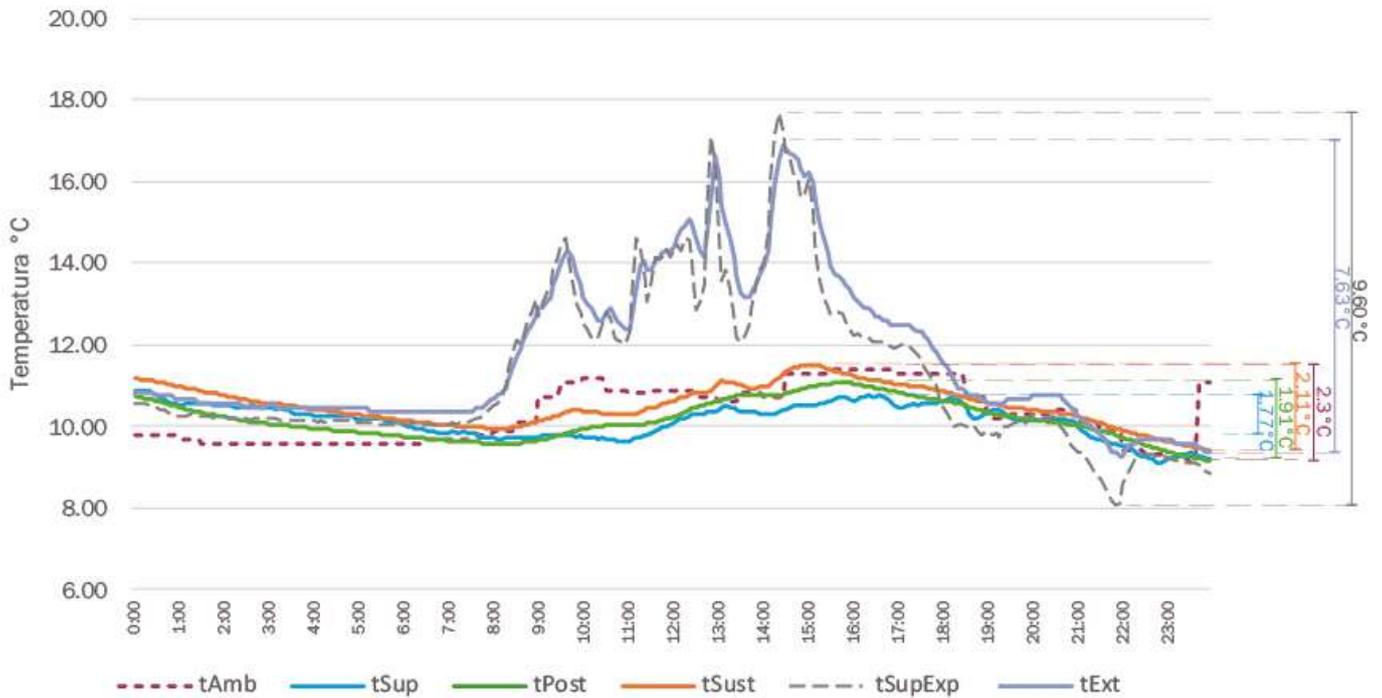
ENERO - Desempeño Térmico Módulo 1B - FcG 70/30



Gráfica 12. Desempeño térmico módulo 1B FcG 70/30 – enero. Elaboración propia.

En la gráfica 122 se muestra el desempeño térmico del sustrato 1B (FcG 70/30). Se puede ver que la tendencia de la capa más externa del módulo (tExt) y de la superficie expuesta (tSupExp) es muy semejante, por lo que se hace evidente el efecto de regulación térmica sobre la superficie de la envolvente. Sin embargo, las temperaturas del interior del sustrato (tSust, tPost) y la superficie de la envolvente (tSup) son muy similares, con poca variación respecto a la temperatura ambiente (tAmb), evidenciando que hay una mayor susceptibilidad a los cambios por el comportamiento de temperatura ambiente.

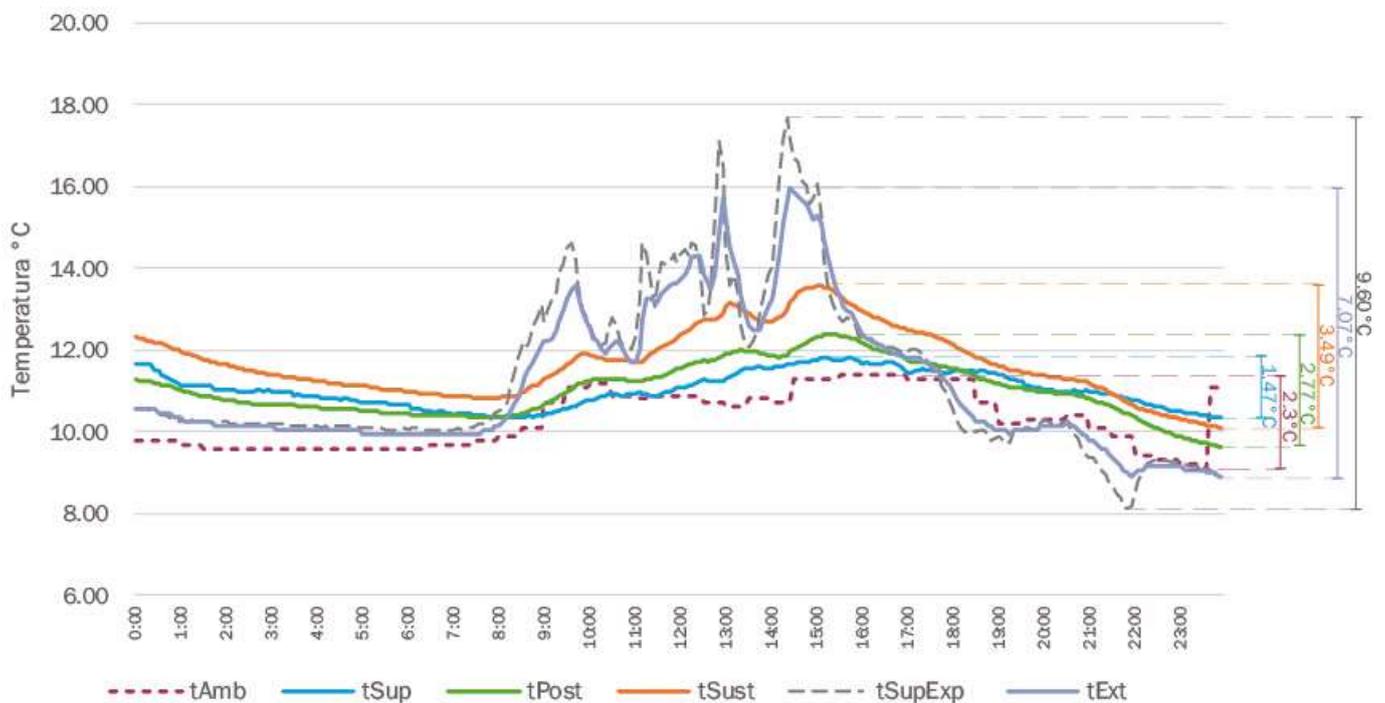
ENERO - Desempeño Térmico Módulo 2A - FcF 30/70



Gráfica 13 Desempeño térmico módulo 2A FcF 30/70 – enero. Elaboración propia.

La gráfica 133 muestra el comportamiento en el día frío del sustrato 2A (FcF 30/70). Se puede ver que la temperatura externa de módulo (tExt) sigue los mismos lineamientos que la temperatura de la superficie expuesta (tSupExp), tanto en altas como en bajas temperaturas, mientras que, estos picos se eliminan en las posiciones interiores del sustrato (tSust, tPost) y de la superficie adyacente al módulo (tSup), evidenciando el efecto de la regulación térmica del sistema. Durante las temperaturas más bajas, la superficie expuesta (tSupExp) presenta una disminución considerable en la temperatura superficial, mientras que, la superficie adyacente al módulo (tSup) se mantiene por encima.

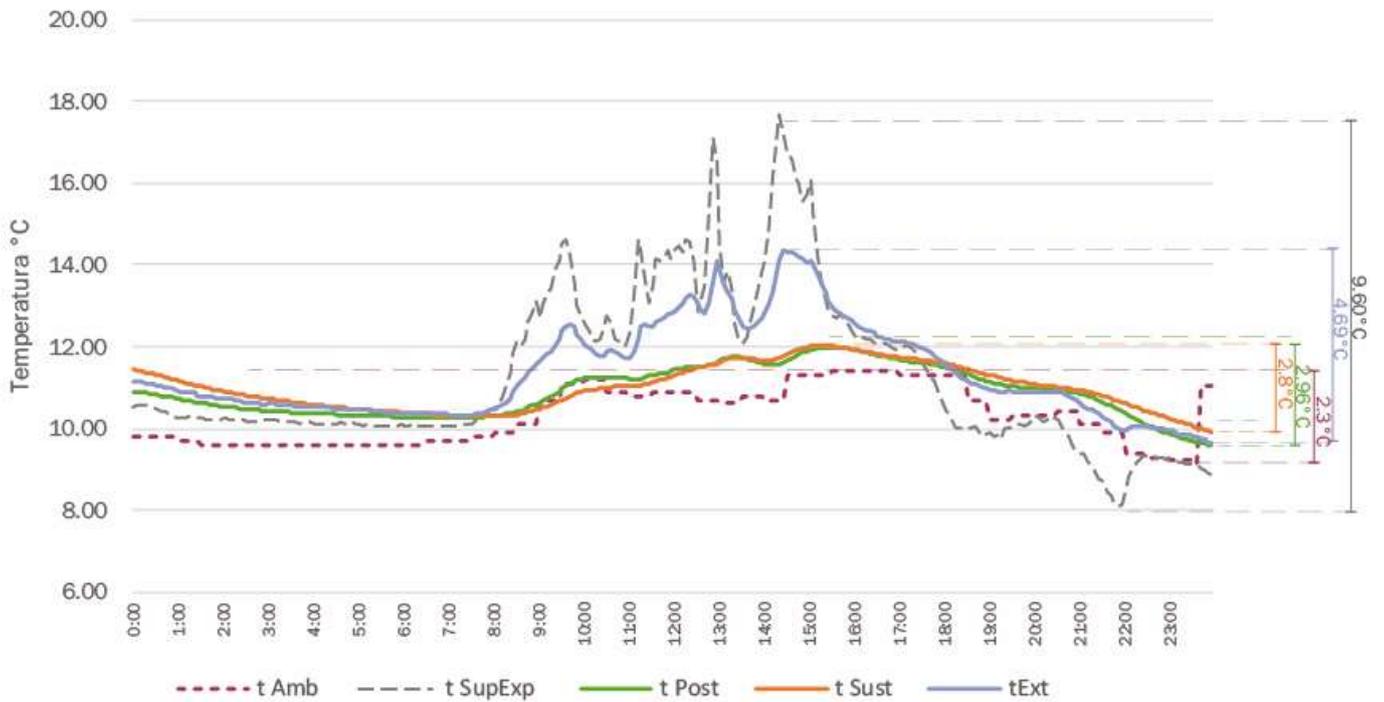
ENERO - Desempeño Térmico Módulo 2B - FcG 30/70



Gráfica 14 4Desempeño térmico módulo 2B FcG 30/70 – enero. Elaboración propia.

En el sustrato 2B (FcG 30/70), grafica 144, se presenta una mayor diferencia entre las temperaturas de las diferentes posiciones, y a comparación de otros sustratos, se puede ver una mayor temperatura en la posición interior del sustrato (tSup). Esto resulta en un leve incremento de la temperatura de la superficie de la envolvente (tSup). Es evidente una reducción de temperatura entre la posición interior del sustrato (tSup) y la posición posterior del módulo (tPost). Sobre la superficie (tSup) se alcanzan temperaturas más altas que la temperatura ambiente (tAmb) a lo largo del día, y durante las horas de más bajas temperaturas, supera a esta misma en hasta 2°C y a la superficie expuesta hasta en 3°C.

ENERO - Desempeño Térmico Módulo 3R - MR 0/100



Gráfica 15 Desempeño térmico módulo 3R 0/100MR – enero. Elaboración propia.

En la gráfica 155 se puede ver el sustrato 3R (00/100 MR). Se obtuvo información únicamente de la parte posterior del módulo (tPost) y del interior del sustrato (tSust). Se puede ver que a lo largo del día se lograron mantener temperaturas superiores a la temperatura ambiente (tAmb) al interior del módulo, y que, se logran amortiguar las temperaturas más bajas a lo largo del día frío. No hay gran diferencia entre la parte posterior del módulo con el interior del sustrato.

5.4.2. ENERO – CONSOLIDADO DE TEMPERATURAS DURANTE EL DÍA FRÍO

En la tabla ANEXO 4, se puede apreciar el comportamiento térmico durante el día frío, la siguiente descripción se hará desde el costado izquierdo de la tabla hasta el costado derecho.

La temperatura ambiente tuvo sus horas más frías en las horas de la mañana y noche. Entre las 2:00pm y 6:00pm, lograron un máximo de 11.4°C y terminando con una oscilación térmica durante el día de 2.3°C.

La superficie expuesta (tSupExp) alcanza un máximo de 17.7°C a lo largo del día y un mínimo de 8.1°C, con una oscilación térmica de 9.60°C.

En el sustrato 1A (FcF 70/30), las más altas temperaturas fueron alrededor de las 4:00pm y las más bajas se dieron en las horas de la noche. La temperatura más alta obtenida en la superficie (tSup), se da alrededor de una hora y media después de las temperaturas más altas al interior del sustrato (tPost, tSust), mientras que las más bajas se dan simultáneas. Esta diferencia entre los puntos máximos es únicamente de 1°C.

En el sustrato 1B(FcG 70/30), la temperatura más alta de la superficie (tSup) se dio una hora después de la temperatura más alta del sustrato (tSust) y dos horas y media después de la más alta en la posición exterior (tExt). Durante las horas más frías, la temperatura externa del módulo (tExt) es muy similar a la temperatura de la fachada (tSup), mientras que, durante las horas cálidas se marca una diferencia hasta de 5.7°C entre estas dos.

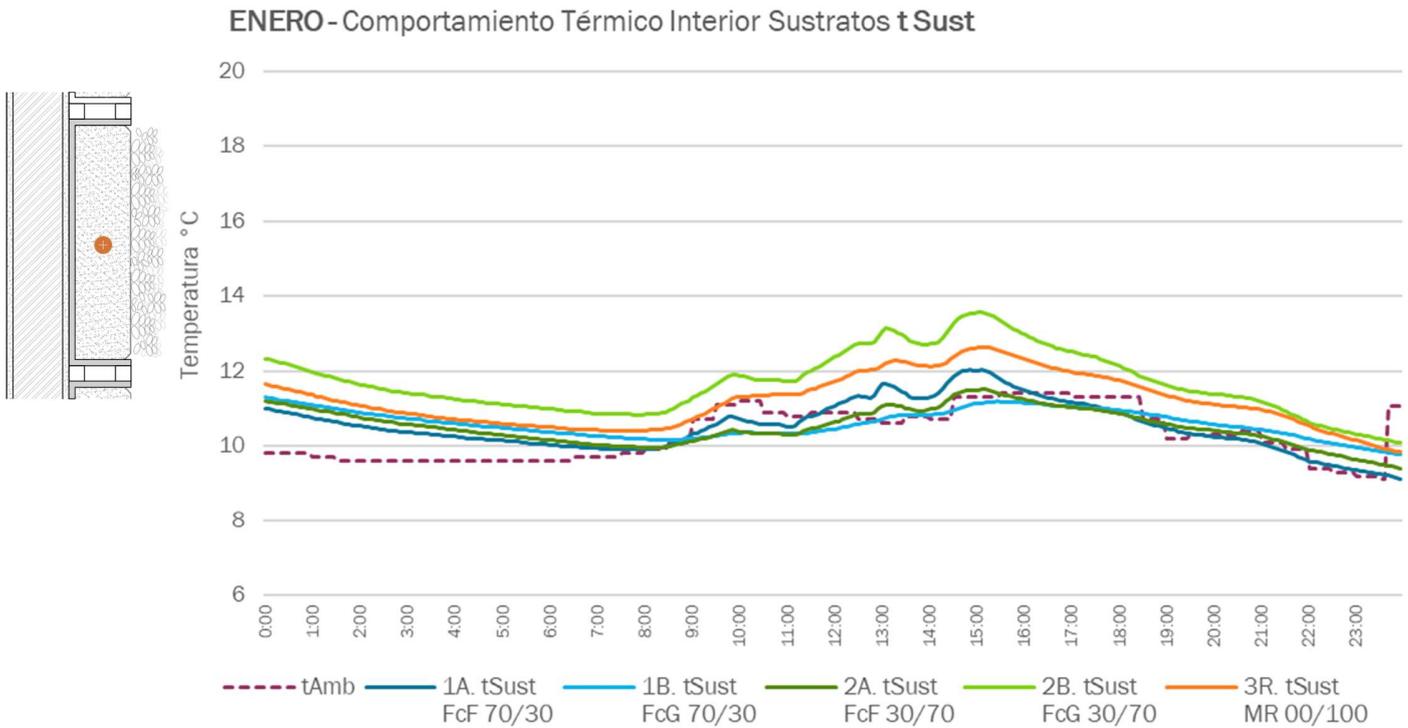
El sustrato 2A (FcF 30/70) logra las temperaturas más altas después de las 3:00pm. La temperatura de la superficie se mantiene en muy bajas temperaturas durante el día; tiene su máximo en horas de la noche anterior, por lo que, al momento del máximo en el interior del módulo (posiciones tPost y tSust), esta no refleja un aumento considerable. Durante las horas frías la diferencia entre la temperatura de

la superficie (tSup) y la temperatura externa del módulo (tExt), es mínima, pero en horas más cálidas, la diferencia marca hasta 5.7°C.

En el sustrato 2B (FcG 30/70), las temperaturas más altas se dan alrededor de las 3:00pm. Hay una diferencia de 1 hora entre la temperatura más alta registrada en la posición exterior (tExt) y la superficie (tSup), y la diferencia es hasta de 4°C. Las temperaturas mínimas sobre la superficie se dan en horas de la mañana, mientras que en el interior del módulo se dan en horas de la noche.

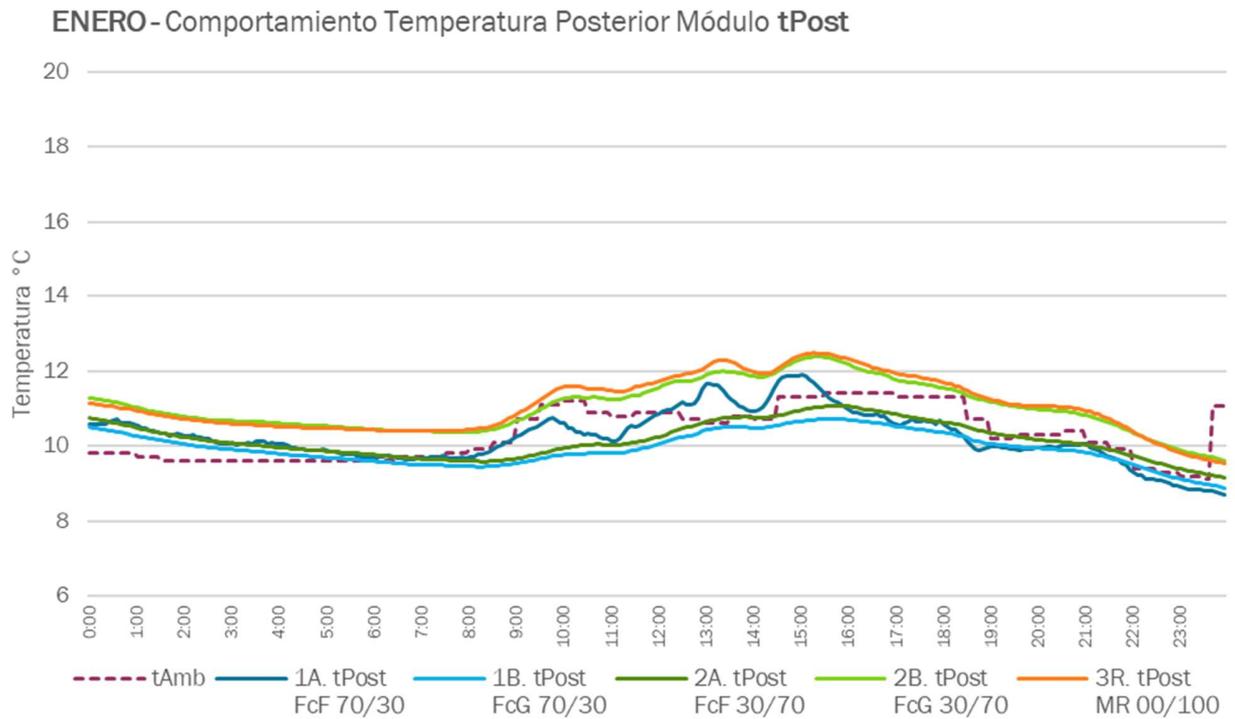
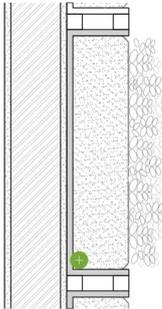
La superficie adyacente (tSup) que se mantuvo más cálida a lo largo del día frío, fue la superficie de la envolvente en el sustrato 2B(FcG 30/70), logrando hasta 1.5°C más que la temperatura ambiente. Seguido de 2A, con 1.4°C más que la temperatura ambiente, sin embargo, esta fue superior a la temperatura ambiente únicamente durante las horas más frías del día. El sustrato 1B(FcG 70/30) fue el que tuvo un comportamiento más similar a la temperatura ambiente en la posición tSup.

5.4.3. ENERO – EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO POR POSICIÓN



Gráfica 16. Comportamiento térmico posición tSust - enero. Elaboración propia.

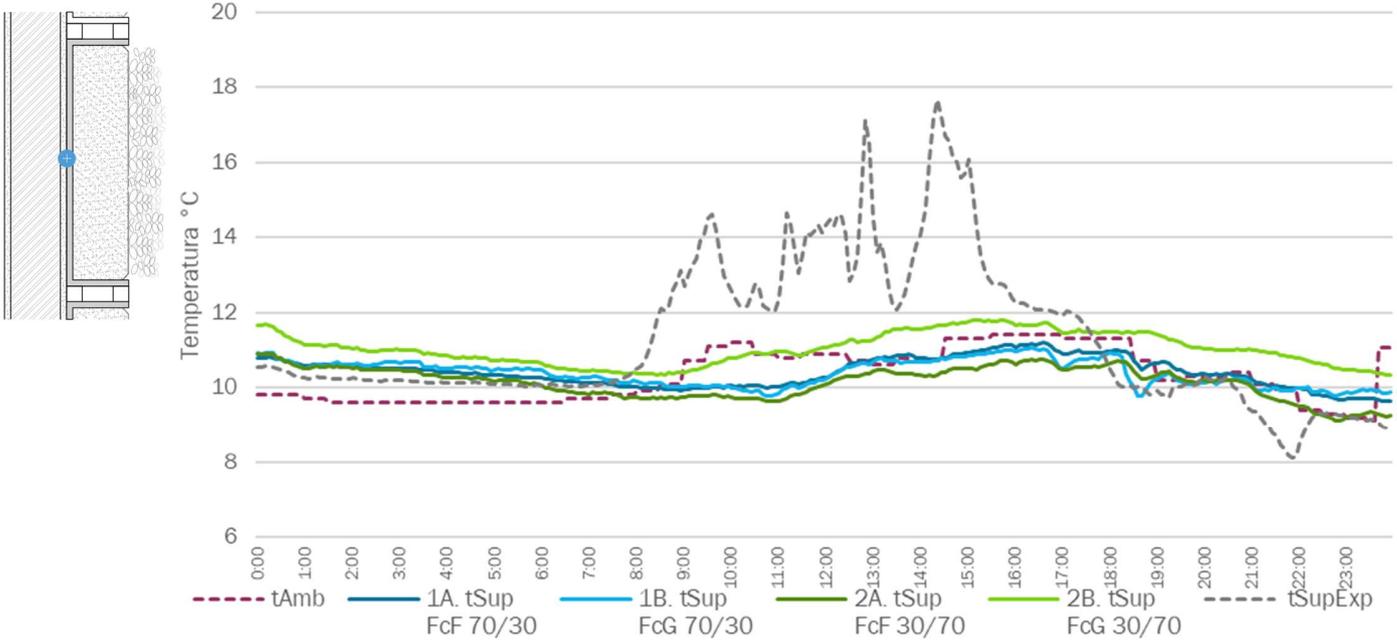
En la gráfica 166 se puede ver el desempeño térmico durante el día frío al interior de los sustratos. Todos los sustratos mantuvieron temperaturas mayores a la temperatura ambiente durante las horas de más bajas temperaturas. Durante las horas de más altas temperaturas, solo los sustratos 2B(FcG 30/70) y 3R(0/100MR), se mantuvieron por encima de la temperatura ambiente (tAmb). El sustrato con mas altas temperaturas fue el 2B(FcG 30/70), el de más bajas fue el 2A(FcF 30/70). Los sustratos 1A(FcF 70/30), 1B(FcG 70/30) y 2A(FcF 30/70), tuvieron un comportamiento muy similar. La diferencia entre las temperaturas promedio de estos tres sustratos durante el día frío, no supera los 0.07°C.



Gráfica 17. Comportamiento térmico posición tPost - enero. Elaboración propia.

En la gráfica 17 se puede ver el desempeño térmico durante el día frío en la parte posterior de los sustratos. Continúa una similitud en el comportamiento entre los sustratos 2B(FcG 30/70) y 3R(0/100MR), sin embargo, se nota una reducción de temperatura 2B(FcG 30/70). 1A (FcF 70/30) pareciera tener una temperatura un poco variable durante las horas de más altas temperaturas, y su registro en general es muy similar a 1B(FcG 70/30) y 2A(FcF 30/70) en las horas de más bajas temperaturas. Estos últimos, muestran un comportamiento muy similar y constante.

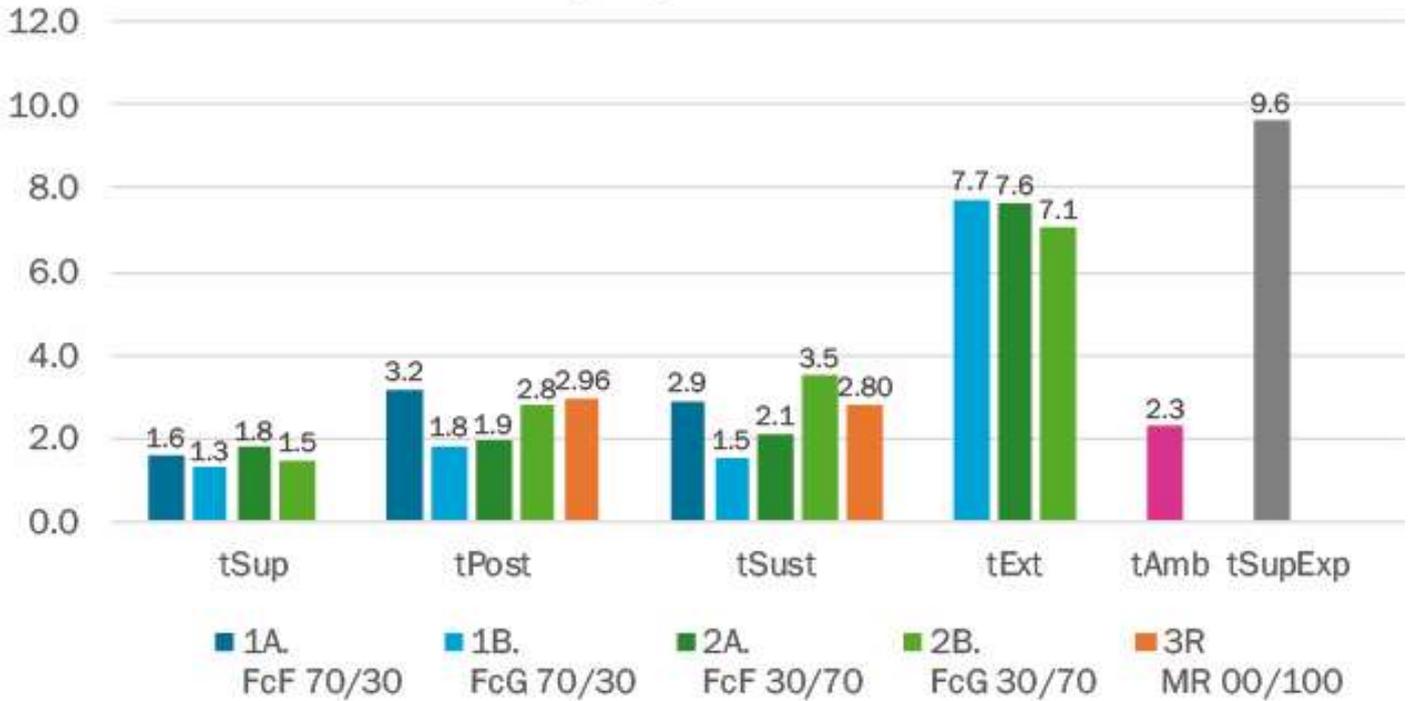
ENERO - Comportamiento Térmico Superficie Envolvente tSup



Gráfica 18. Comportamiento térmico posición tSup - enero. Elaboración propia.

En la gráfica 188 se puede ver el desempeño térmico durante el día frío en la superficie de la envolvente adyacente a cada módulo. Es evidente la regulación térmica del sistema de naturación sobre la superficie (tSup), a comparación de la superficie expuesta (tSupExp), ya que, además de regular los picos de altas temperaturas, se amortiguó el pico bajo de temperatura que se dio en horas de la noche sobre la superficie expuesta (tSupExp). La máxima diferencia entre la superficie adyacente al módulo 2B(FcG 30/70) y el módulo 2A(FcF 30/70), los cuales, registran las temperaturas más altas y bajas respectivamente, es de 1°C.

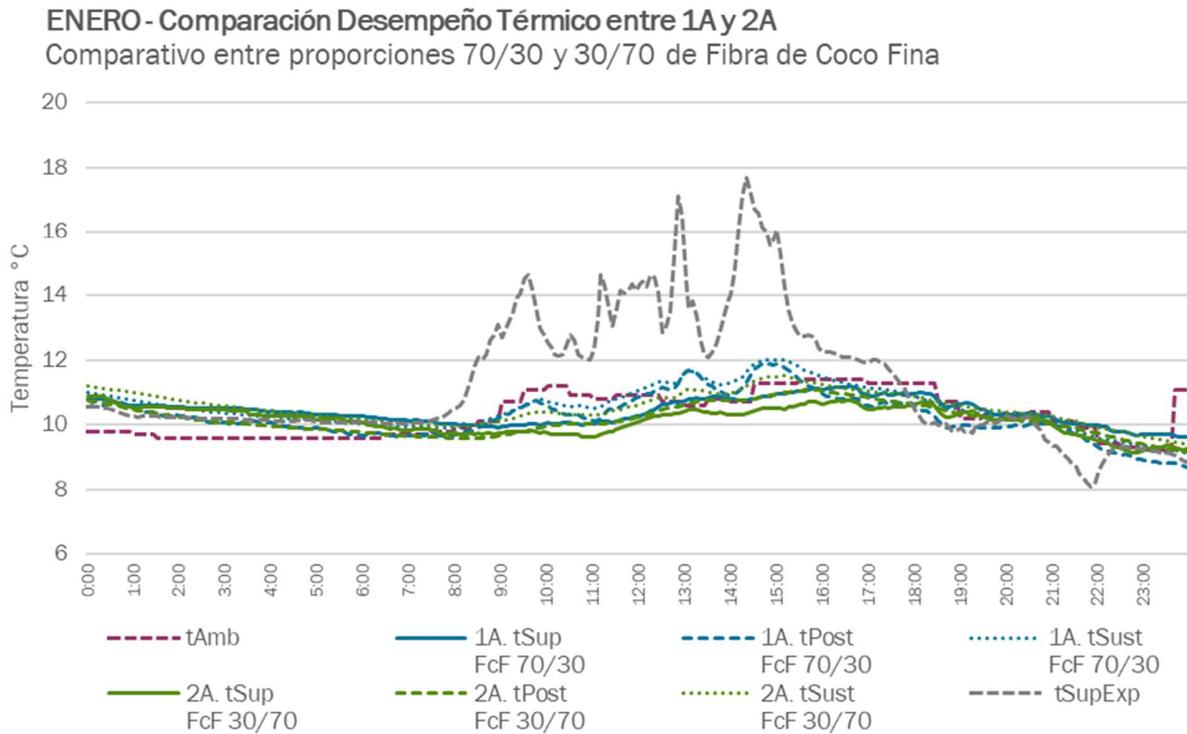
ENERO - Fluctuación térmica por posición



Gráfica 19. Fluctuación térmica por posición - enero. Elaboración propia.

En la gráfica 199 se puede ver la fluctuación térmica por posición durante el día frío. Sobre la superficie expuesta (tSupExp) se da una alta variación de temperatura a comparación de la oscilación térmica en el ambiente (tAmb). Los sensores ubicados en la parte exterior (tExt) registraron hasta 2°C menos de oscilación térmica que en la superficie expuesta (tSupExp) u la superficie de la envolvente en todos los módulos registró una fluctuación similar alrededor de 1.5°C.

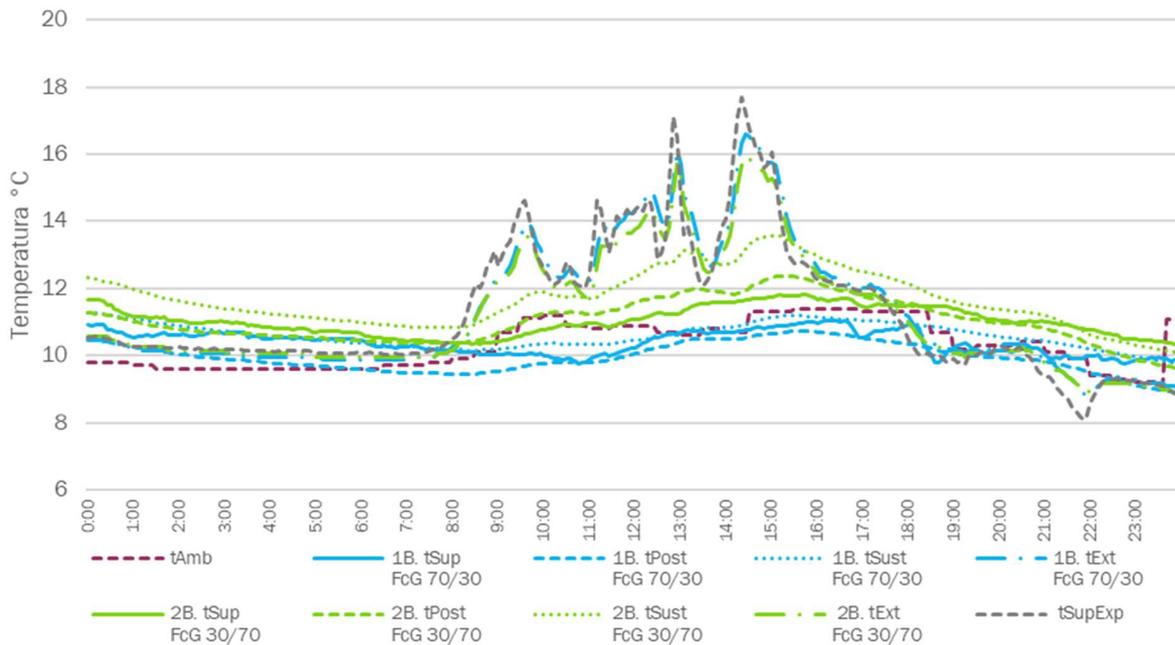
5.4.4. ENERO – COMPARATIVA ENTRE SUSTRATOS



Gráfica 20 Comparación 1A y 2A - enero. Elaboración propia

En la gráfica 202 se muestra el comportamiento térmico de las diferentes proporciones de sustrato, con la fibra de coco fina. El comportamiento entre los dos sustratos es muy similar en la posición del sustrato (tSust) y de la superficie de la envolvente (tSup), difiere un poco en la posición posterior del módulo (tPost). Se aprecia una regulación térmica más inmediata en 2A (FcF 30/70), entre el interior del sustrato (tSust) y la parte posterior del módulo (tPost), mientras que, la regulación térmica del sustrato con mayor contenido de fibra de coco 1A (FcF 70/30) se da entre (tPost) y (tSup).

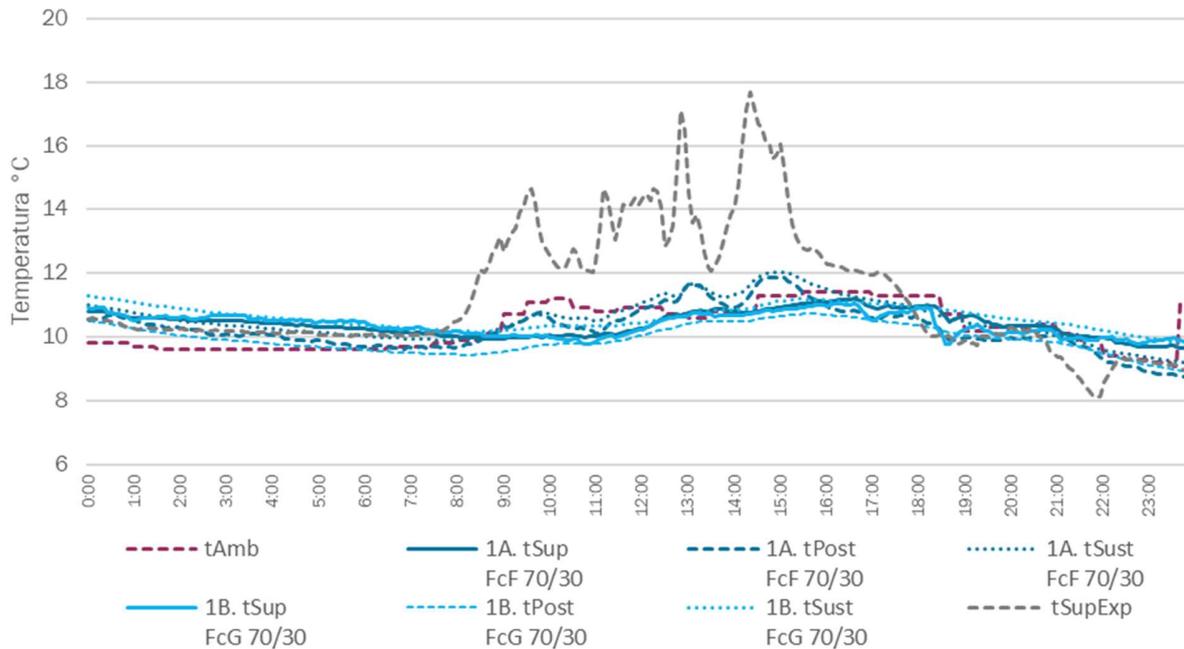
ENERO - Comparación Desempeño Térmico entre 1B y 2B
 Comparativo entre proporciones 70/30 y 30/70 de Fibra de Coco Grande



Gráfica 21 Comparación 1B y 2B - enero. Elaboración propia.

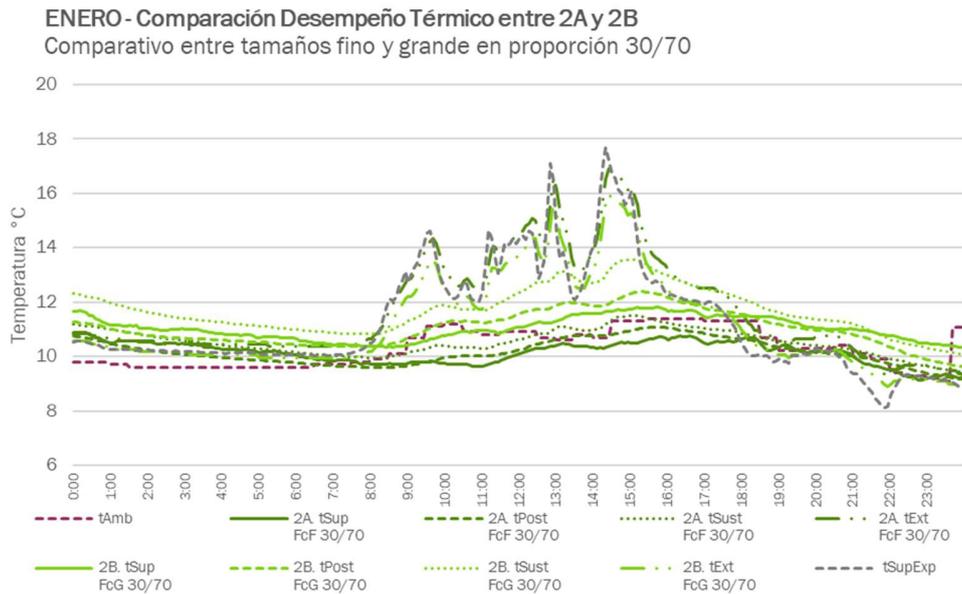
En la gráfica 211 se muestra el comportamiento térmico de las diferentes proporciones de sustrato, con la fibra de coco grande. Mientras que el sustrato el sustrato 1B (FcG 70/30) se mantiene inferior y muy similar al comportamiento de la temperatura ambiente, el sustrato 2B logra mantener una temperatura un poco más elevada a lo largo del día en la superficie de la envolvente (tSup) y en el sustrato (tSup, tSust).

ENERO - Comparación Desempeño Térmico entre 1A y 1B
 Comparativo entre tamaños fino y grande en proporción 70/30



Gráfica 22 Comparación 1A y 1B – enero. Elaboración propia.

En la gráfica 222 se muestra el comportamiento térmico entre los diferentes tamaños de fibra de coco, en la proporción 70/30. A pesar de que la amplitud en las diferentes posiciones de los dos sustratos es muy baja, se puede igual apreciar un comportamiento muy similar en los dos módulos. Podría decirse que es un poco mayor la regulación térmica sobre la superficie de 1A(FcF 70/30) que en 1B (FcG 70/30), ya que, las temperaturas en todas las posiciones de 1B (FcG 70/30) son muy similares, y en 1A(FcF 70/30), los ligeros cambios de temperatura sobre el sustrato (tSust) y sobre la parte posterior (tPost) del módulo no impactan directamente sobre la temperatura de la superficie (tSup). La diferencia sobre la superficie entre estos dos no es significativa, sin embargo, al interior del sustrato (tSust), la fibra de coco fina alcanza a mantenerse 1°C más alta que la fibra de coco grande.



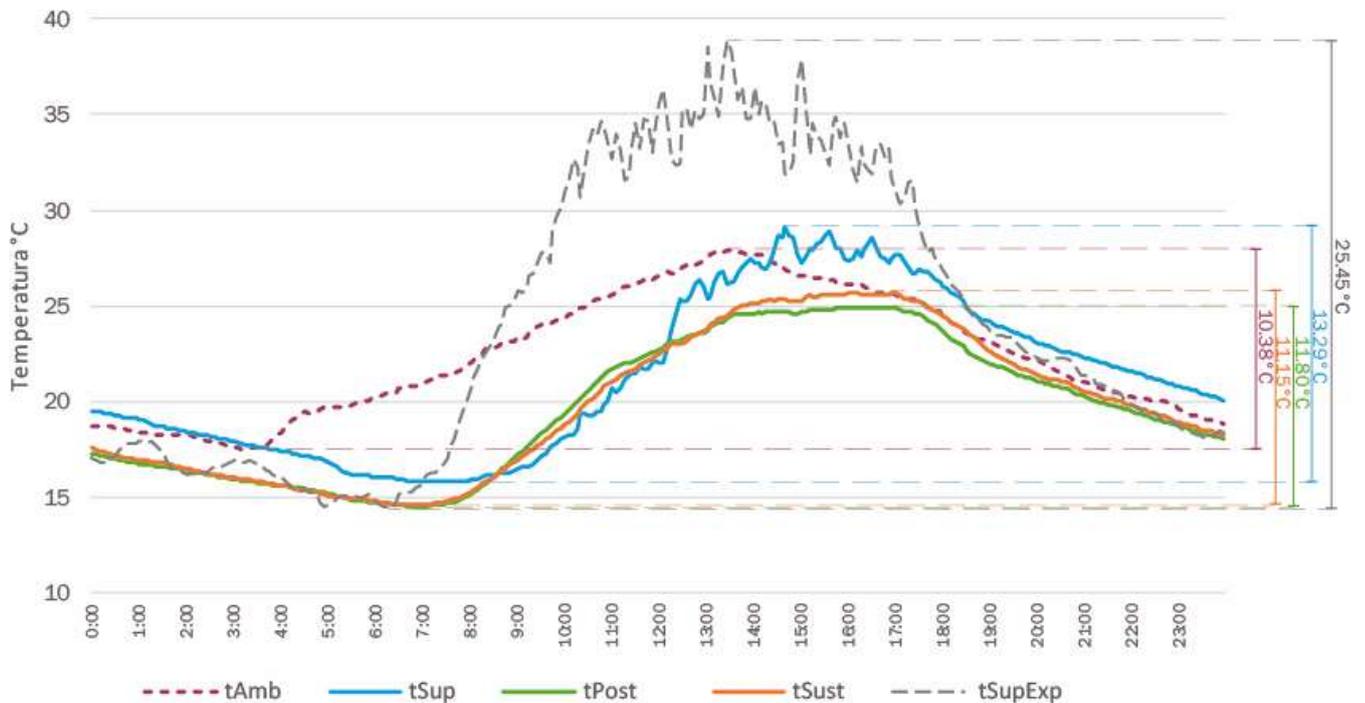
Gráfica 23. Comparación 2A y 2B - enero. Elaboración propia.

En la gráfica 233 se muestra el comportamiento térmico entre los diferentes tamaños de fibra de coco, en la proporción 30/70. Se puede ver que, a pesar de que los dos sustratos logran temperaturas diferentes, tienen la misma tendencia, en especial, en la parte posterior del sustrato (tPost) y en la superficie (tSup). El sustrato 2B (FcG 30/70), adquiere más calor durante el día e impacta elevando la temperatura de la superficie hasta 1°C, a diferencia de el sustrato 2A (FcF 30/70).

Durante el día frío se puede observar que la amplitud o el diferencial de temperaturas al interior de los módulos en general, es mínimo. El sustrato 2B(FcG 30/70), es el único que logra mantener la superficie de la edificación (tSup) por encima de la temperatura ambiente (tAmb) a lo largo del día. Durante las horas de más bajas temperaturas, en todos los sustratos se puede ver una regulación térmica que impide a la superficie disminuir su temperatura considerablemente, como es evidente en la superficie expuesta (tSupExp), la cual, baja sustancialmente y se mantiene inferior a la temperatura ambiente (tAmb).

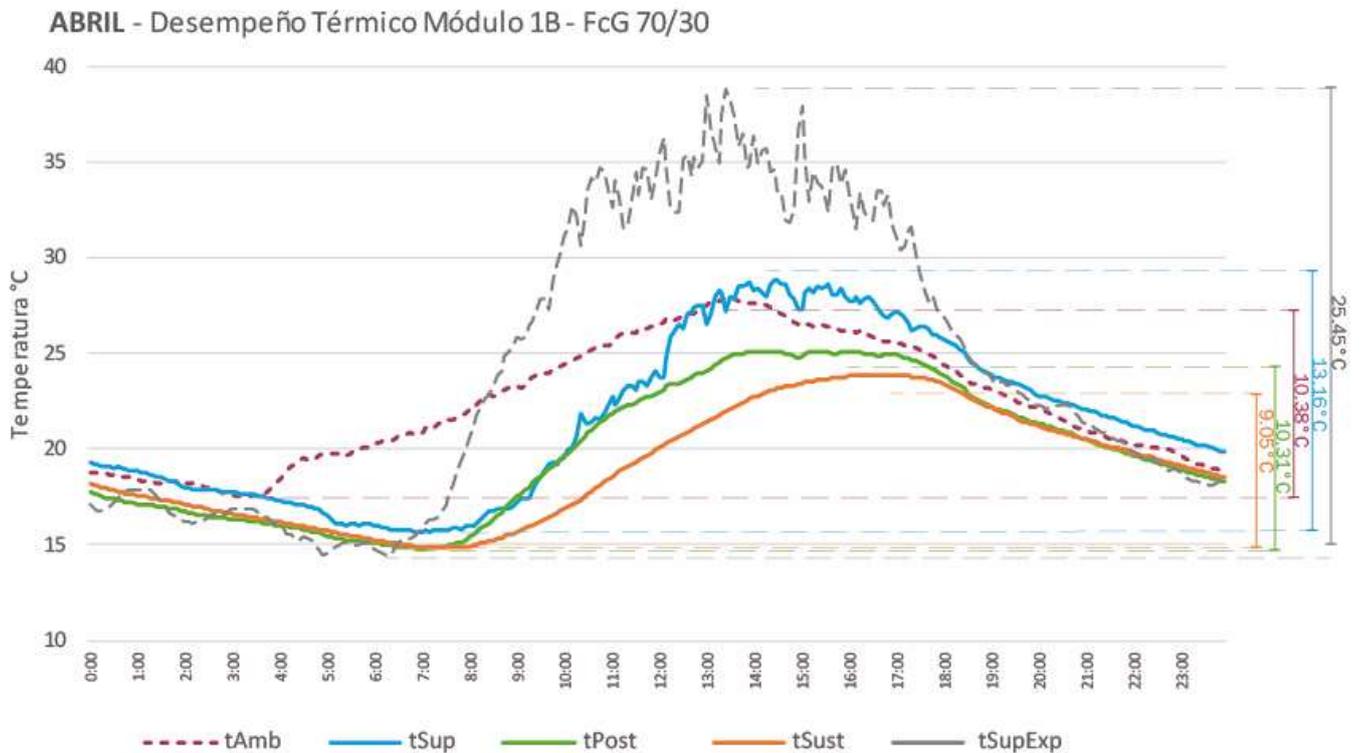
5.4.5. ABRIL – EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO POR SUSTRATO DÍA CÁLIDO

ABRIL - Desempeño Térmico Módulo 1A - FcF 70/30



Gráfica 24. Desempeño térmico 1A – abril. Elaboración propia.

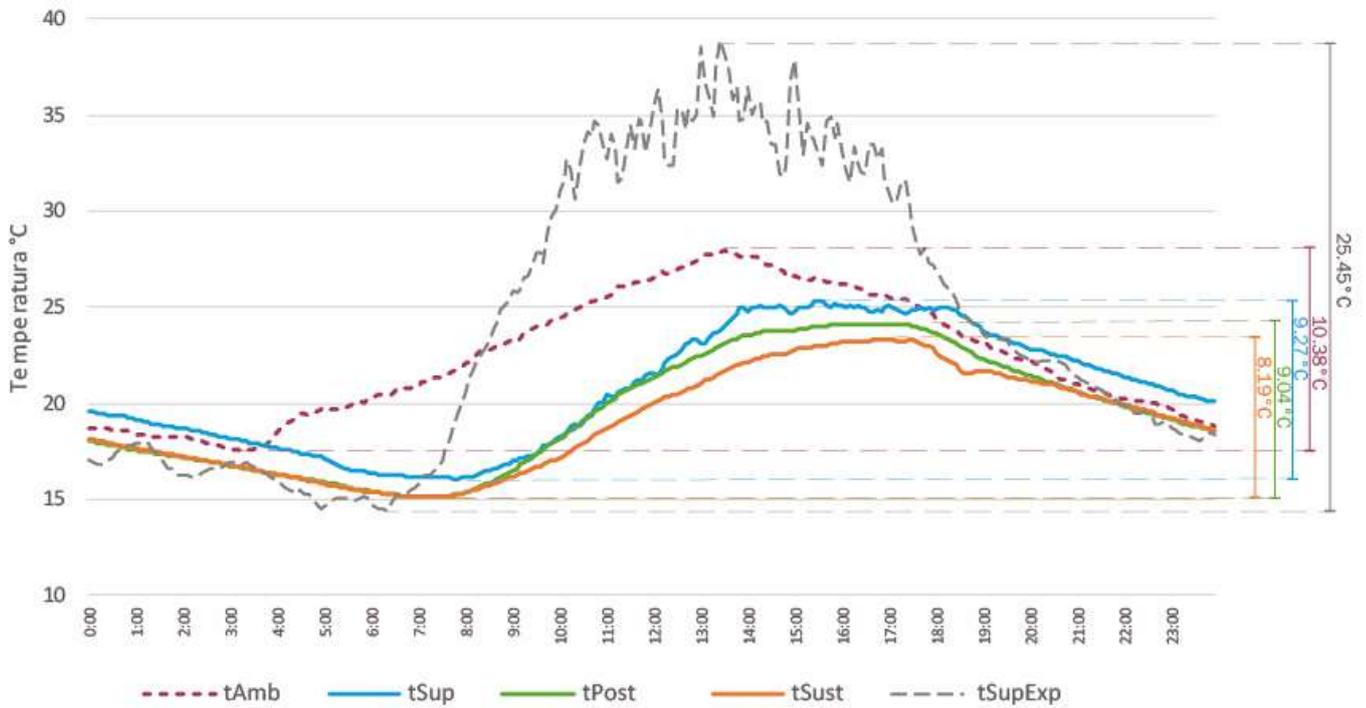
En la gráfica 244 se muestra el desempeño térmico del sustrato 1A (FcF 70/30) en el día cálido. Durante las horas de la mañana, el sustrato logra generar un periodo de latencia en la temperatura de la superficie, la cual, durante las horas de mayor temperatura, se mantiene inferior a la temperatura ambiente (tAmb). Solo cuando esta empieza a disminuir, la temperatura de la superficie (tSup) la supera hasta por 1°C. No hay diferencia considerable entre la posición posterior del módulo (tPost) y la temperatura interior del sustrato (tSust). Hay una notable diferencia entre el comportamiento de la superficie expuesta (tSupExp) y la superficie adyacente al módulo (tSup). La primera alcanza los 39°C, con una oscilación de 25°C, mientras que la segunda tiene su máximo en 29°C con una oscilación de 13°C.



Gráfica 25. Desempeño térmico 1B – abril. Elaboración propia.

En la gráfica 255 se muestra el desempeño térmico del sustrato 1B (FcG 70/30). A pesar de que la temperatura de la superficie inicia muy similar a la temperatura ambiente, al igual que el sustrato anterior, hay un periodo de latencia en el que la temperatura ambiente (tAmb) empieza a aumentar y las otras posiciones continúan disminuyendo. Hay una diferencia marcada entre las diferentes posiciones durante las horas cálidas del día. La temperatura de la superficie tiene un incremento súbito al iniciar la tarde y se mantiene superior a la temperatura ambiente a partir de ese momento. Durante la noche o en la madrugada, el registro es muy similar en todas las posiciones.

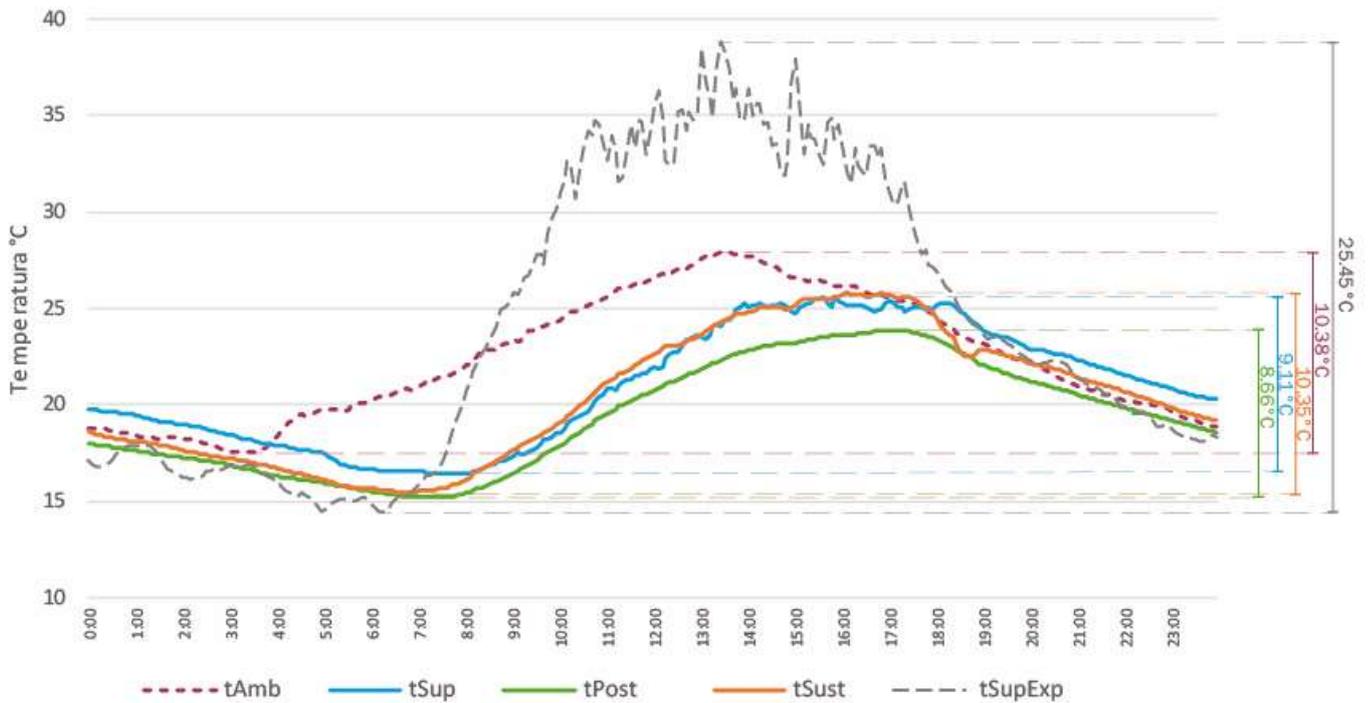
ABRIL - Desempeño Térmico Módulo 2A - FcF 30/70



Gráfica 26. Desempeño térmico 2A – abril. Elaboración propia.

La gráfica 266 muestra en el sustrato 2A (FcF 30/70). Se puede ver una diferencia notable entre el comportamiento de la superficie cubierta por el sistema de naturación (tSup) y la superficie expuesta (tSupExp), la cual, tiene un incremento súbito a partir de las 7 de la mañana. Las otras posiciones (tSup, tPost, tSust) tienen un incremento en la temperatura más retardado y se mantienen inferiores a la temperatura ambiente durante el día. Al momento de la temperatura ambiente alcanzar el máximo e iniciar su descenso, las tres posiciones se nivelan y se mantienen constantes hasta entrar la noche.

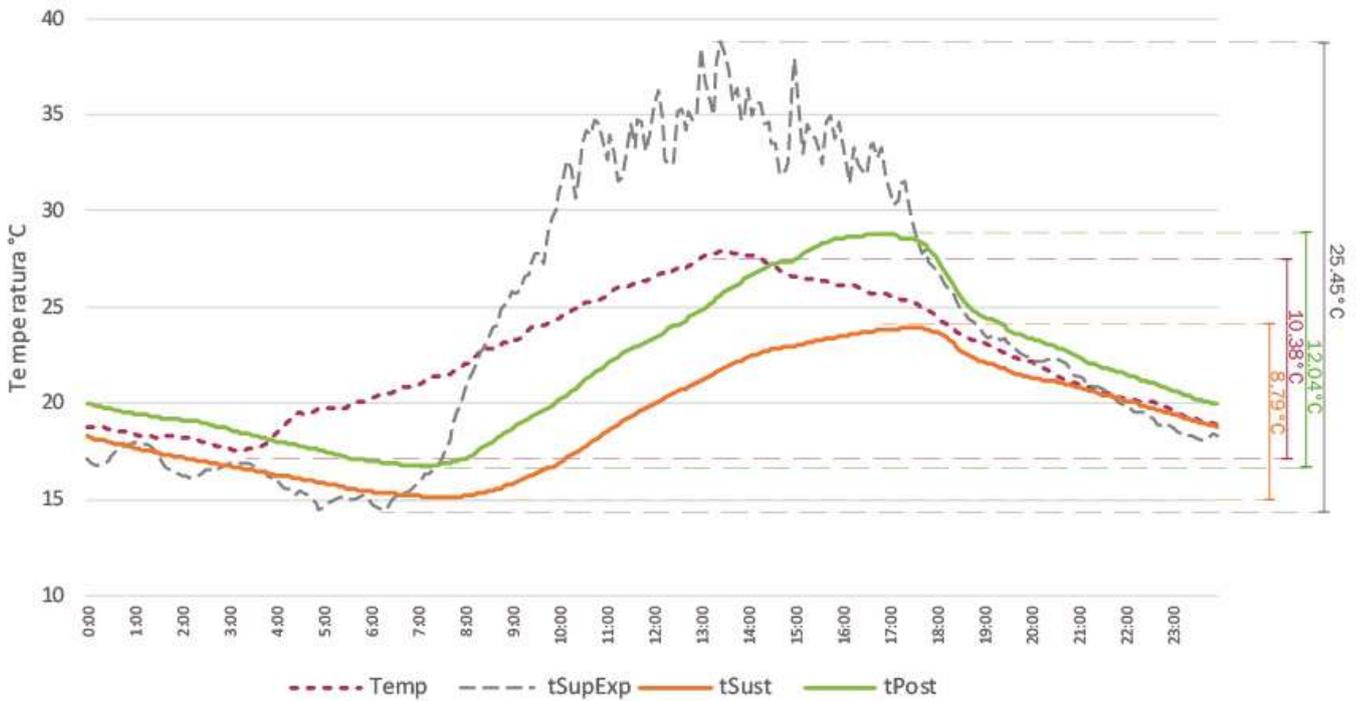
ABRIL - Desempeño Térmico Módulo 2B - FcG 30/70



Gráfica 27. Desempeño térmico 2B - abril. Elaboración propia.

En el sustrato 2B (FcG 30/70), grafica 27, se puede ver un comportamiento muy similar a 2A (FcF 30/70). De igual manera, todas las posiciones se mantienen inferiores a la temperatura ambiente durante el día, posibilitando mejores temperaturas sobre la superficie de la envolvente (tSup). En este caso, la temperatura del sustrato (tSust) es muy similar a la temperatura de la superficie de la envolvente (tSup), mientras que la temperatura posterior del módulo (tPost), registra temperaturas levemente inferiores a estas durante el día.

ABRIL - Desempeño Térmico Módulo 3R 00/100MR



Gráfica 27. Desempeño térmico 3R - abril. Elaboración propia.

En la gráfica 28 se puede ver el sustrato 3R (00/100 MR) Durante el día cálido en el sustrato (tSust) se obtienen temperaturas inferiores a la temperatura ambiente a lo largo del día, mientras que, en la parte posterior del módulo, sí se supera la temperatura ambiente pero únicamente después de que esta inicia su descenso en horas de la tarde.

5.4.6. ABRIL – CONSOLIDADO DE TEMPERATURAS DÍA CÁLIDO

En la tabla ANEXO 5, se puede apreciar el comportamiento térmico durante el día cálido, la siguiente descripción se hará desde el costado izquierdo de la tabla hasta el costado derecho.

La temperatura ambiente (tAmb) tuvo sus horas más cálidas de 12:00pm a 4:00pm logrando un máximo de 28°C y terminando con una oscilación térmica durante el día de 10°C.

La superficie expuesta (tSupExp) alcanza un máximo de 39°C a lo largo del día y un mínimo de 14°C, con una oscilación térmica de 24°C.

En el sustrato 1A (FcF 70/30), las más altas temperaturas fueron alrededor de las 3:00pm con 29.1°C sobre la superficie (tSup) y las más bajas se dieron en las horas de la mañana al interior del módulo (tPost, tSust) con 14.5°C en ambas posiciones. La temperatura máxima sobre la superficie se da hasta 1 hora después de la temperatura ambiente máxima. Esta misma, se mantiene superior a la temperatura del sustrato a lo largo del día, excepto por unas horas en la mañana en el que se igualan.

En el sustrato 1B (FcG 70/30), la temperatura de la superficie (tSup) alcanza los 28.8°C como máximo y como mínimo registró 15.7°C. El máximo sobre la superficie se da 1 hora después del máximo en la temperatura ambiente. A lo largo del día, la temperatura de la superficie (tSup) se mantuvo superior a las temperaturas al interior del sustrato (tPost, tSust), hasta por 6.5°C.

El sustrato 2A (FcF 30/70) logra sobre la superficie de la envolvente (tSup) las temperaturas más altas 2 horas después de la temperatura ambiente máxima. A lo largo del día, la superficie de la envolvente (tSup) se mantiene superior a la temperatura del sustrato (tSust). A comparación de los dos sustratos anteriores, se puede ver que se retarda hasta por 1 hora el incremento de las temperaturas sobre

la superficie, la cual llega a un máximo de 25.3°C, alcanzando una oscilación térmica sobre la superficie (tSup) de 9.27°C.

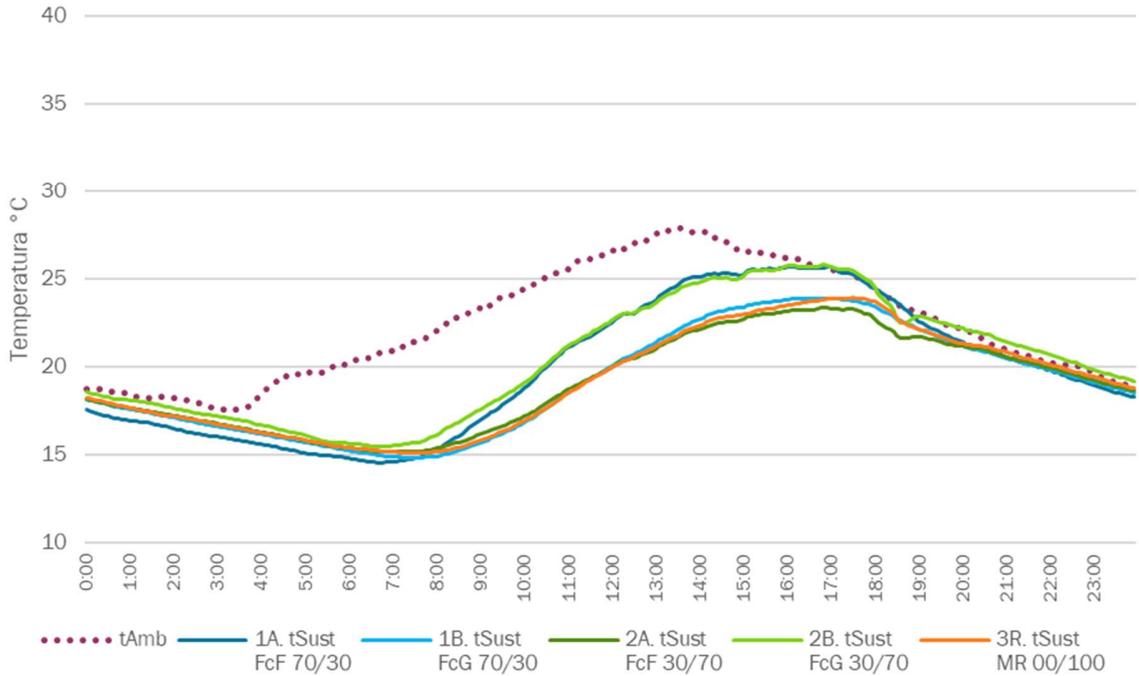
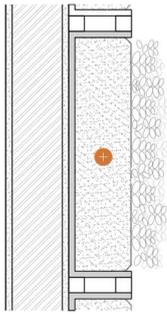
En el sustrato 2B (FcG 30/70), las temperaturas más altas se dan después de las 3:00pm, 2 horas después de la temperatura ambiente máxima. En este caso, el incremento de temperaturas inicia en el sustrato, y paulatinamente va transfiriéndose este a la superficie, manteniéndose muy similares en horas de más altas temperaturas.

Durante el día, la superficie adyacente (tSup) a los módulos de los sustratos 1A (FcF 70/30) y 1B (FcG 70/30), se mantuvieron hasta 7°C por debajo de la temperatura ambiente y 2°C por encima. El sustrato 1A (FcF 70/30) supera la temperatura ambiente después de las 3:00pm, mientras que, 1B (FcG 70/30) supera la temperatura ambiente desde las 12:00pm. Los sustratos 2A(FcF 30/70) y 2B(FcG 30/70) logran mantenerse por más tiempo por debajo de la temperatura ambiente, logrando estar hasta 6°C por debajo de la durante las horas más cálidas del día y superándola únicamente después de las 6:00pm.

A comparación del desempeño de la superficie expuesta (tSupExp), en el instante más cálido del día, el módulo que logró mayor diferencia en el instante más cálido del día fue el módulo 2A (FcF 30/70) con 14°C menos que la superficie expuesta (tSupExp). El de menor diferencia fue el módulo 1B(FcG 70/30), con 10°C. Durante las horas de la mañana y la madrugada, la superficie cubierta por el sistema de naturación, logró mantenerse en todos los módulos hasta 3°C por encima de la temperatura registrada en la superficie expuesta.

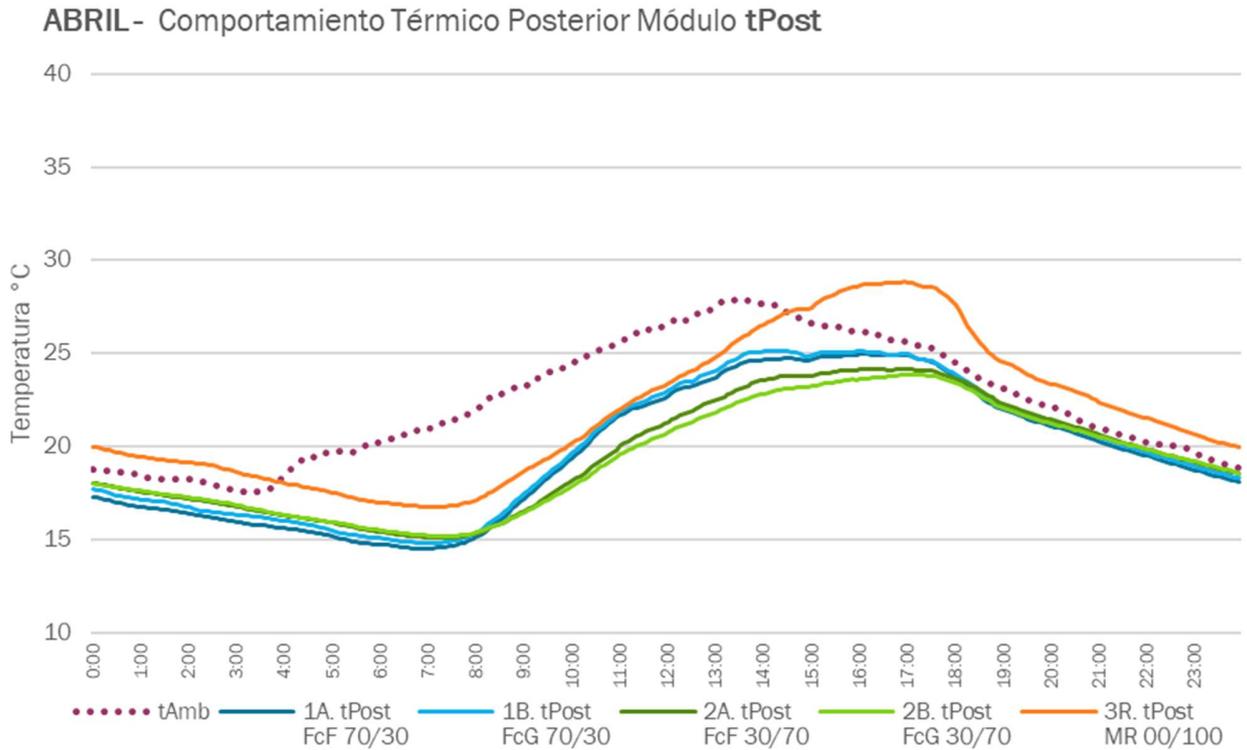
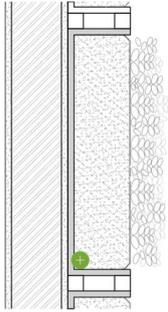
5.4.7. ABRIL – EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO POR POSICIÓN

ABRIL- Comportamiento Térmico Interior Sustrato tSust



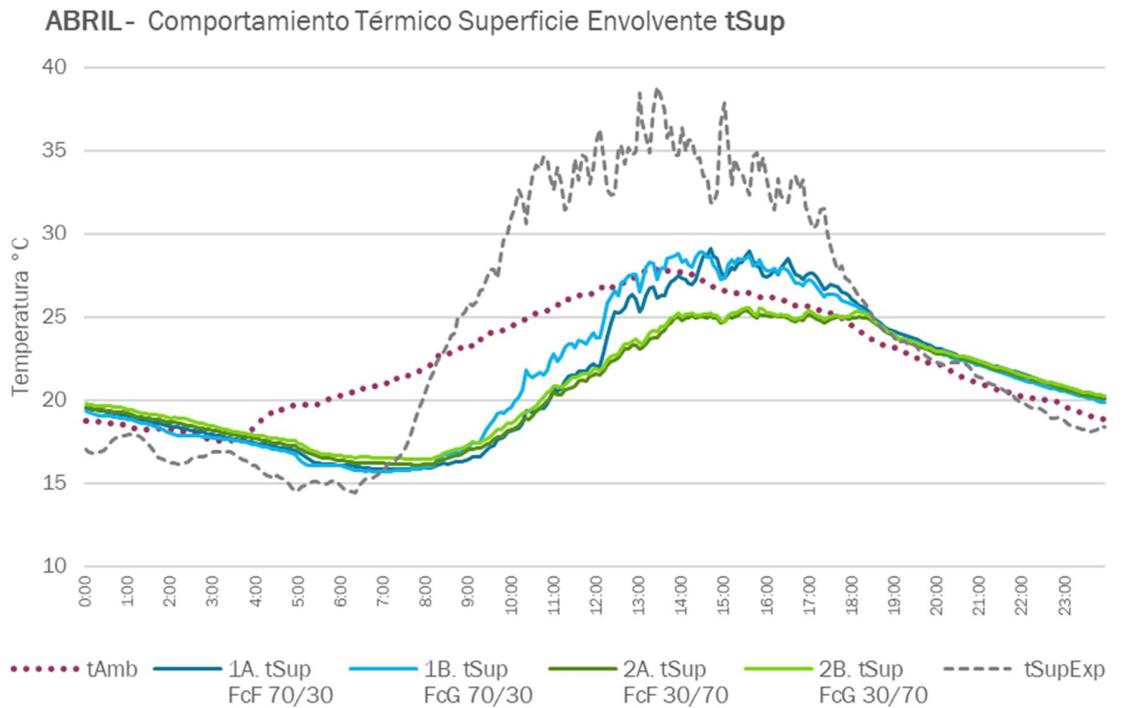
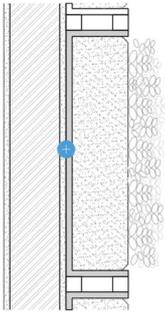
Gráfica 28. Comportamiento térmico posición tSust - abril. Elaboración propia.

En la gráfica 29 Se puede apreciar el comportamiento de los sustratos en el interior del sustrato (tSust). Durante las horas más frías del día, todos los sustratos tienen una temperatura y comportamiento muy similar. Mientras que, en las horas más cálidas, se marca la diferencia en el comportamiento entre los sustratos 1B, 2A, 3R y 1A, 2B, estos últimos alcanzan temperaturas superiores.



Gráfica 29. Comportamiento térmico posición tPost. Elaboración propia.

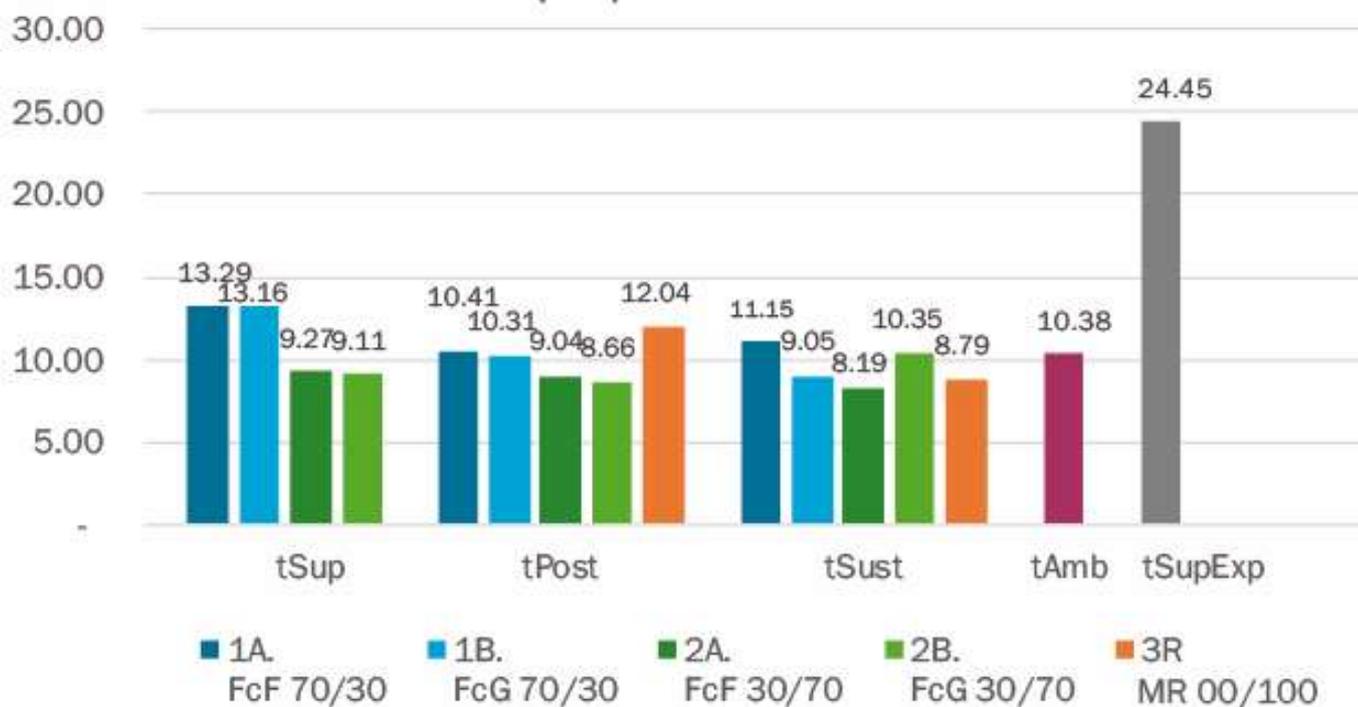
En la posición posterior del módulo (tPost), en la gráfica 30 se puede ver un comportamiento similar entre los sustratos con misma proporción. Comparándolo con la gráfica anterior 29, el sustrato 2B(FcG 30/70) disminuye del sustrato a la parte posterior del módulo, mientras que el 1B(FcG 70/30), aumenta en este mismo sentido. El 2A(FcF 30/70) y 1A(FcF 70/30), se mantienen con un registro similar entre la posición interior del sustrato (tSust) y la posición posterior del módulo (tPost). De esta manera, se crea una similitud entre 1A con 1B y 2A con 2B. El sustrato 3R (0/100MR) es el que mayores temperaturas logra en la parte superior del módulo.



Gráfica 30. Comportamiento térmico posición tSup - abril. Elaboración propia.

En la gráfica 31 se indica el comportamiento de todos los sustratos en la posición sobre la superficie de la envoltente (tSup), en relación con la temperatura ambiente (tAmb) y la superficie expuesta (SupExp). Es notable la regulación térmica del sistema de naturación sobre la superficie (tSup), a comparación de la superficie expuesta (tSupExp). Las superficies con mejor desempeño en el día cálido fueron las de proporción 30/70, sin haber mayor variación entre los diferentes tamaños de fibra de coco. Estas superaron la temperatura ambiente únicamente al caer la noche, mientras que las de proporción 70/30 superaron levemente la temperatura ambiente en horas de la tarde.

ABRIL - Fluctuación térmica por posición

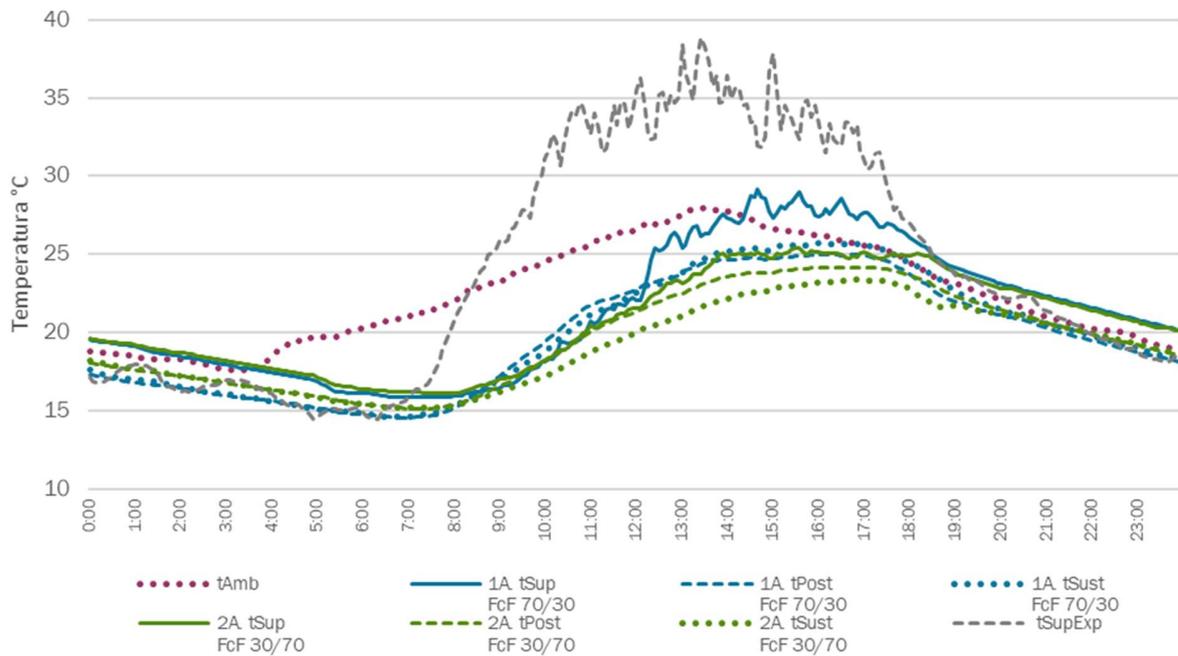


Gráfica 31. Fluctuación térmica por posición - abril. Elaboración propia.

En la gráfica 32 se indica la fluctuación térmica de todos los sustratos por posición. Sobre la superficie los sustratos con mayor cantidad de fibra de coco (1A, 1B) obtuvieron una mayor fluctuación térmica que los sustratos con menor cantidad de fibra (2A, 2B), y superficie expuesta lo superó hasta en 15°C. En las otras posiciones todos tuvieron una fluctuación térmica similar a la registrada en el ambiente.

5.4.8. ABRIL - COMPARATIVA ENTRE SUSTRATOS

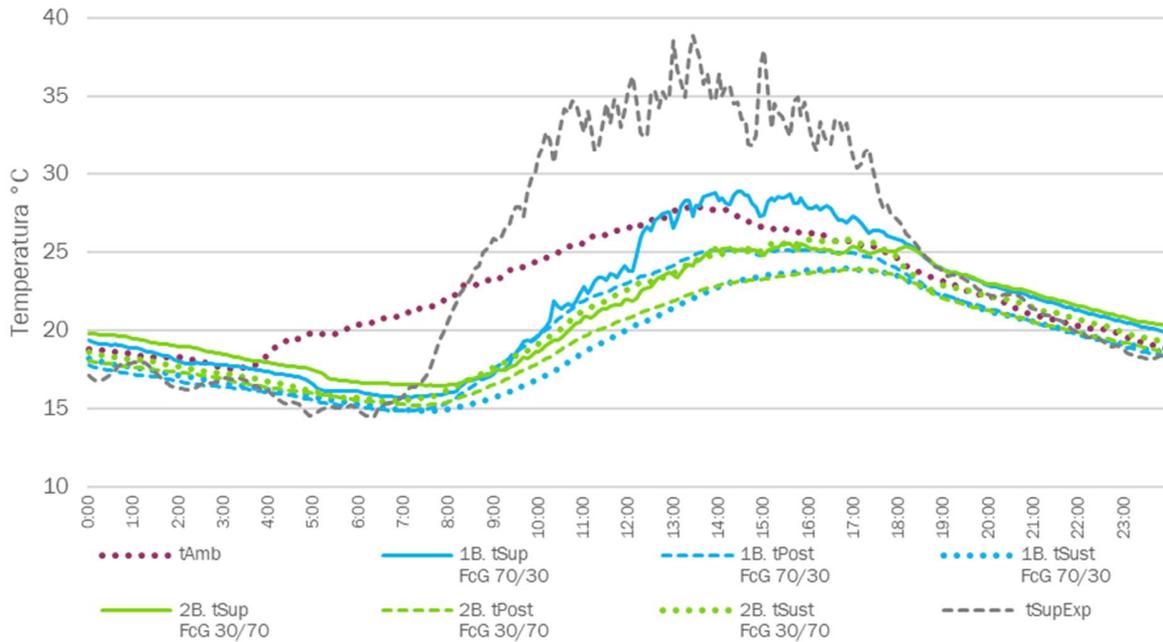
ABRIL - Comparación Desempeño Térmico entre 1A y 2A
Comparativo entre proporciones 70/30 y 30/70 de Fibra de Coco Fina



Gráfica 32. Comparación 1A y 2A - abril. Elaboración propia.

En la gráfica 33 se muestra el comportamiento de los sustratos con fibra de coco fina, en proporciones 70/30 y 30/70. En el sustrato 1A (FcF 70/30) se puede ver una leve diferencia entre las posiciones tSust y tPost, pero se marca un incremento notable sobre la superficie. En el 2A hay una ligera amplitud entre la diferentes posiciones y la temperatura de la superficie se asemeja más al comportamiento del sustrato al interior.

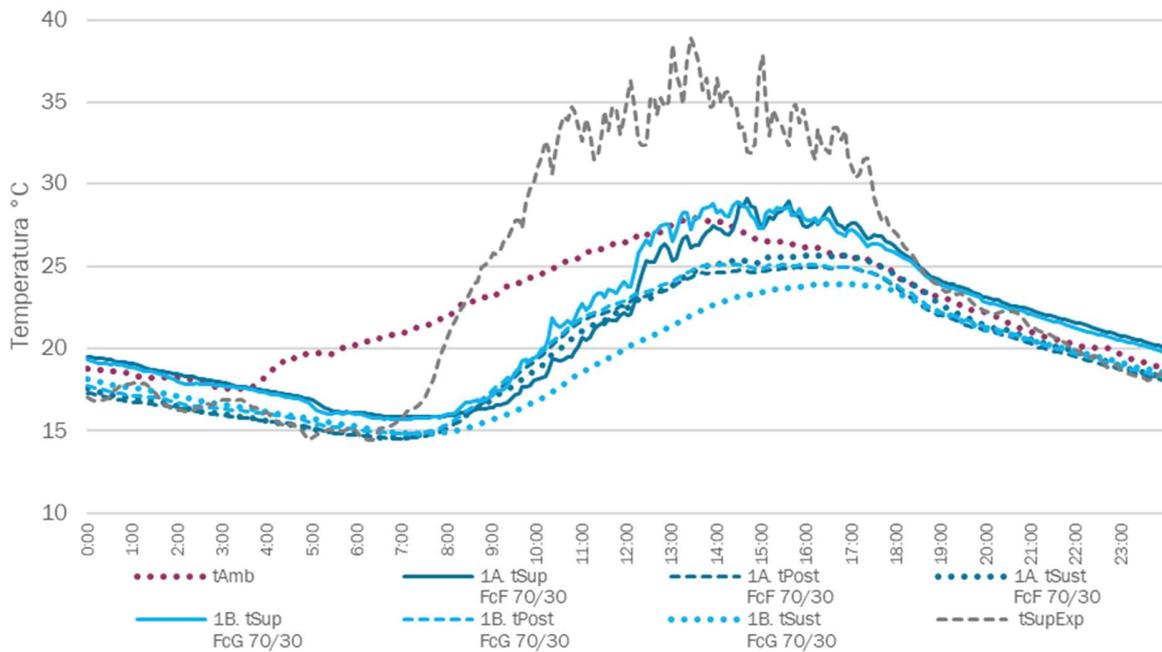
ABRIL - Comparación Desempeño Térmico entre 1B y 2B
 Comparativo entre proporciones 70/30 y 30/70 de Fibra de Coco Grande



Gráfica 33. Comparación 1B y 2B - abril. Elaboración propia.

En la gráfica 34 se muestra el comportamiento térmico de las diferentes proporciones de sustrato, con fibra de coco grande. Se puede ver en 1B (FcG 70/30) una mayor variación de temperaturas entre las diferentes posiciones, mientras que en 2B(FcG 70/30), la diferencia es menor. En los dos casos, se puede ver que las temperaturas interiores de los módulos (tSust, tPost) son menores a las temperaturas de la superficie, sin embargo, la posición tSup en el sustrato 1B (FcG 70/30) registró mayores temperaturas, superando también la de la temperatura ambiente.

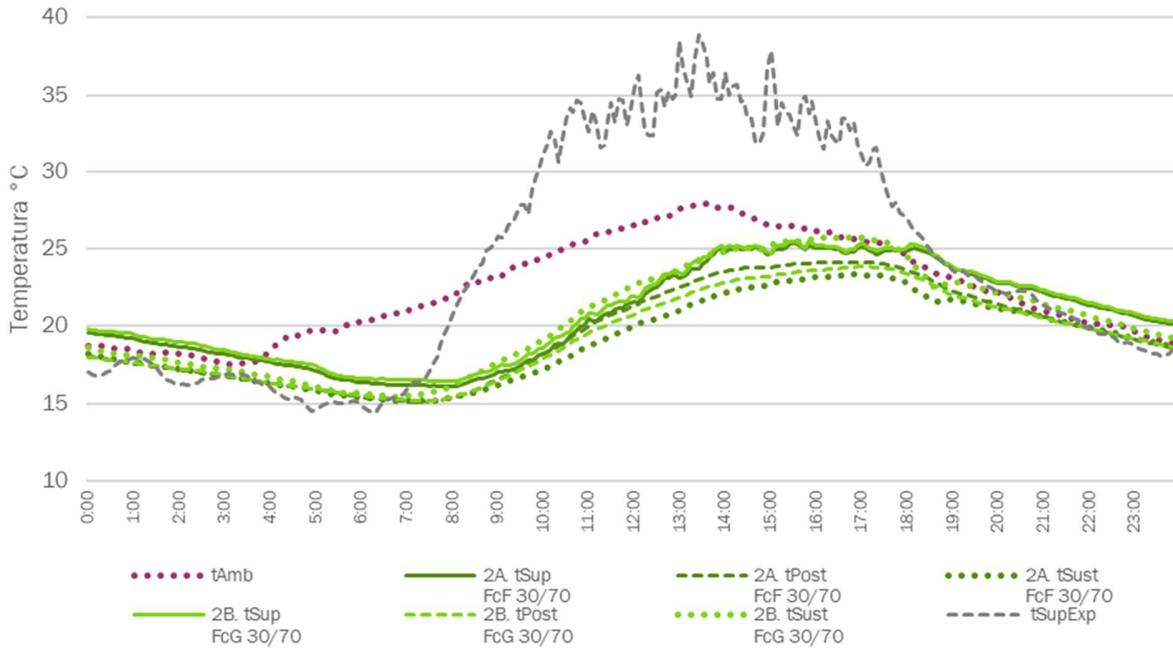
ABRIL - Comparación Desempeño Térmico entre 1A y 1B
 Comparativo entre tamaños fino y grande en proporción 70/30



Gráfica 34. Comparación 1A y 1B - abril. Elaboración propia.

En la gráfica 35 se muestra el comportamiento térmico entre los diferentes tamaños de fibra de coco, en la proporción 70/30. Se puede ver una similitud en el comportamiento de los dos casos sobre la superficie (tSup) y en la parte posterior del sustrato (tSust). El sustrato en 1A (FcF 70/30) se mantiene con una temperatura inferior a la del sustrato de 1B (FcG 70/30), sin embargo, sobre la superficie de módulo 1B (FcG 70/30), se alcanzan mayores temperaturas, superando la temperatura ambiente antes que 1A (FcF 70/30). En la parte posterior del módulo, los dos sustratos tienen un comportamiento casi que similar. En 1B (FcG 70/30), se aprecia una amplitud mayor entre los sensores, mientras que en 1A (FcF 70/30), la amplitud o variación entre las diferentes posiciones es relativamente baja.

ABRIL - Comparación Desempeño Térmico entre 2A y 2B
 Comparativo entre tamaños fino y grande en proporción 30/70



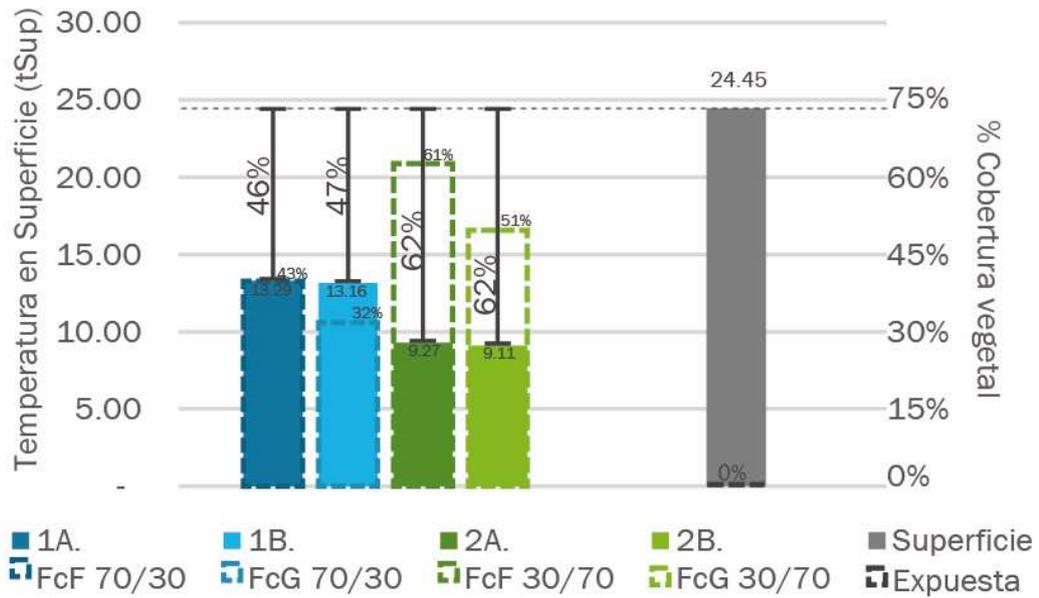
Gráfica 35. Comparación 2A y 2B – abril. Elaboración propia.

En la gráfica 36 se muestra el comportamiento térmico entre los diferentes tamaños de fibra de coco, en la proporción 30/70. Se puede ver que los dos casos tienen un comportamiento muy similar. El sustrato en 2B (FcG 30/70), logra temperaturas muy similares a las obtenidas en la superficie, mientras que el sustrato 2A (FcF 30/70), mantiene temperaturas más bajas. En los dos casos, se evidencia un buen desempeño térmico al comparar las temperaturas logradas sobre la superficie comparadas con las temperaturas sobre la superficie expuesta, con una diferencia de hasta 10°C, y podría decirse que no hay una diferencia notable entre los dos tamaños de fibra de coco.

Durante el día cálido se puede ver un diferencial de temperaturas mayor entre la temperatura ambiente (t_{Amb}), las temperaturas interiores de los módulos (t_{Post} y t_{Sust}), las temperaturas de la superficie cubierta (t_{Sup}) y la temperatura de la superficie expuesta (t_{SupExp}). En este caso, el comportamiento térmico de los módulos varía según la proporción de fibra de coco en la mezcla, mas no, según el tamaño de fibra de coco. Los sustratos con mayor cantidad de fibra de coco (70/30) se mantienen inferiores a la temperatura ambiente en horas de la mañana, pero en las horas más cálidas del día, superan la temperatura ambiente hasta por 3°C. Los sustratos con menor cantidad de fibra de coco (30/70) se mantienen inferiores a la temperatura ambiente a lo largo del día hasta por 6°C y solo la sobrepasan entrada la noche. A diferencia de la fibra de coco fina (FcF), la fibra de coco grande (FcG), presenta mayor diferencial entre las posiciones. En todos los casos, la temperatura de la superficie (t_{Sup}) es superior a la temperatura posterior del módulo (t_{Post}), y este a su vez, es en algunos casos, es levemente superior a la temperatura interior del sustrato (t_{Sust}). El módulo con mejor desempeño durante el día cálido fue el módulo 2A (FcF 30/70) y el de más bajo desempeño fue el 1B (FcG 70/30). El módulo 2B (FcG 30/70), también tuvo un excelente desempeño en el día cálido y en el día frío.

5.4.9. ABRIL – FLUCTUACIÓN TÉRMICA VS COBERTURA VEGETAL

ABRIL - % REDUCCIÓN FLUCTUACIÓN TÉRMICA VS COBERTURA VEGETAL



Gráfica 36. Comparación entre la reducción en la fluctuación térmica sobre la superficie de la envolvente con la cobertura vegetal lograda en el mes de abril.

En la gráfica 37 se puede ver claramente que la superficie expuesta llega a tener una fluctuación térmica hasta de 24°C en el día más cálido del año, mientras que la superficie en la que se instaló el sistema logra una fluctuación de 13°C y 9°C, reduciendo hasta un 62% la fluctuación de la temperatura sobre la superficie de la envolvente. Esto se debe tanto a la composición del sustrato, como a la cobertura vegetal lograda; Se puede ver que los sustratos con misma proporción de fibra de coco llegan a una fluctuación térmica muy similar, y, adicionalmente, aquellos con mayor porcentaje de cobertura vegetal logran una disminución de la fluctuación de hasta 20% más que aquellos con menor cobertura vegetal.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La fibra de coco es un material vegetal, residuo de la industria agroalimentaria, más específicamente de la industria del coco. Su alta porosidad y estabilidad permiten una gran variedad de aplicaciones. En arquitectura, se ha venido implementando como parte de la composición de aislantes térmicos y algunos tipos de mallas sin tener un alto impacto medio ambiental durante su extracción o posterior eliminación (Gosálbez, 2012).

Una de las mayores dificultades que afrontan los sistemas de naturación en vertical es contrarrestar el efecto de la gravedad sobre el medio de crecimiento de la vegetación. Diversas soluciones se han dado a esta problemática, proponiendo sistemas hidropónicos, en los que la vegetación crece en un medio inerte y sus nutrientes son proporcionados mediante fertirrigación. Sin embargo, el alto costo energético generado por la necesidad de una constante circulación de agua y fertilizantes, limitan la sostenibilidad de estos sistemas.

Gracias a sus características, la fibra de coco tiene un alto potencial para aumentar la eficiencia y la eficacia de sistemas de naturación vertical, proporcionando no solo una ventaja a nivel técnico, debido a su bajo peso, sino también pudiendo funcionar como un regulador térmico de las temperaturas incidentes sobre la envolvente de la edificación. Por tal motivo, se realizó un modelo experimental factorial en el que se evaluó un sistema de naturación vertical con contenedores de sustrato, incorporando fibra de coco en una mezcla de sustrato evaluada y probada anteriormente en diversas investigaciones. De este modo, se evaluó el efecto del tamaño de la fibra de coco y la proporción incorporada al sustrato, sobre el desarrollo vegetal, y, en consecuencia, el desempeño térmico de los diferentes módulos. Con la intención de comprobar si al agregar fibra de coco a una mezcla de sustrato para sistemas de naturación vertical con contenedores de sustrato, éste permitirá obtener más del 60% de la cobertura vegetal por cada módulo, y a su vez, aumentar la capacidad de regulación térmica medida en una disminución de hasta 50% de la fluctuación térmica sobre la superficie de la envolvente de la fachada sur, en un periodo de diciembre a abril del año 2020.

El modelo experimental incluyó 10 módulos contenedores de sustrato, ubicados sobre la fachada sur de una edificación⁴⁷ a los que se les tomaron mediciones de temperatura en diferentes planos de los módulos y se realizó un seguimiento quincenal a la cobertura vegetal, apoyado de mediciones en laboratorio que permitieron caracterizar y evaluar a composición química y física de cada sustrato. A continuación, se muestran unas fichas en las que se resumen los resultados obtenidos:

MÓDULOS SUSTRATO 1A FcF 70/30

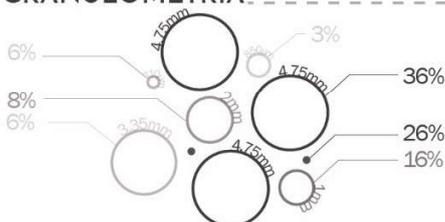
PESO VOLUMÉTRICO



DESCRIPCIÓN

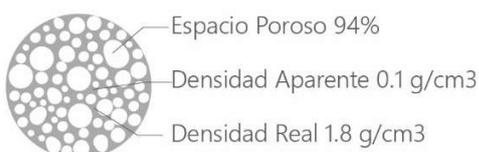
La Fibra de coco fina en proporción 70/30 con la mezcla de referencia, obtuvo el menor de los pesos con 106 kg/m³; un peso volumétrico **muy deseable**.

GRANULOMETRÍA



No hay un equilibrio claro en la proporción de partículas, ya que predominan las partículas más grandes y las más pequeñas.
 66% Partículas \geq a 1mm
 35% Partículas $<$ a 1mm

DENSIDAD AP, R, ESPACIO POROSO



Densidad aparente **apropiada**.
 Densidad real **apropiada**.
 Espacio poroso **alto**.
 Sustrato con la densidad mas baja y mayor cantidad de espacio poroso.

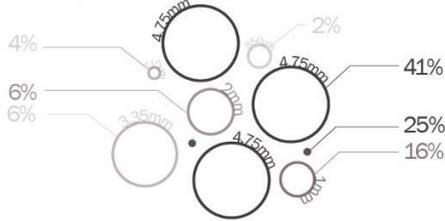
MATERIA ORGÁNICA Y pH

MÓDULOS SUSTRATO 1B FcG 70/30

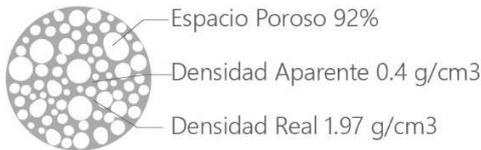
PESO VOLUMÉTRICO



GRANULOMETRÍA



DENSIDAD AP, R, ESPACIO POROSO



MATERIA ORGÁNICA Y pH

6-7 pH
45% Materia orgánica

DESCRIPCIÓN
La Fibra de coco grande a 70/30 con la mezcla de referencia, obtuvo un peso un 63% menor al de solo mezcla de referencia, con 107 kg/m³; un peso volumétrico **muy deseable**.

No hay un equilibrio claro en la proporción de partículas, ya que predominan las partículas más grandes y las más pequeñas.
69% Partículas ≥ a 1mm
31% Partículas < a 1mm

Densidad aparente **apropiada**.
Densidad real **apropiada**.
Espacio poroso **alto**.
Sustrato con densidad muy baja y adecuada cantidad de espacio poroso.

Sustrato **ligeramente ácido**
Alto contenido de materia orgánica
El segundo sustrato con mayor contenido de materia orgánica.

COBERTURA VEGETAL

* Para esta conclusión se eligió la muestra del sustrato 1B con mejor cobertura vegetal.

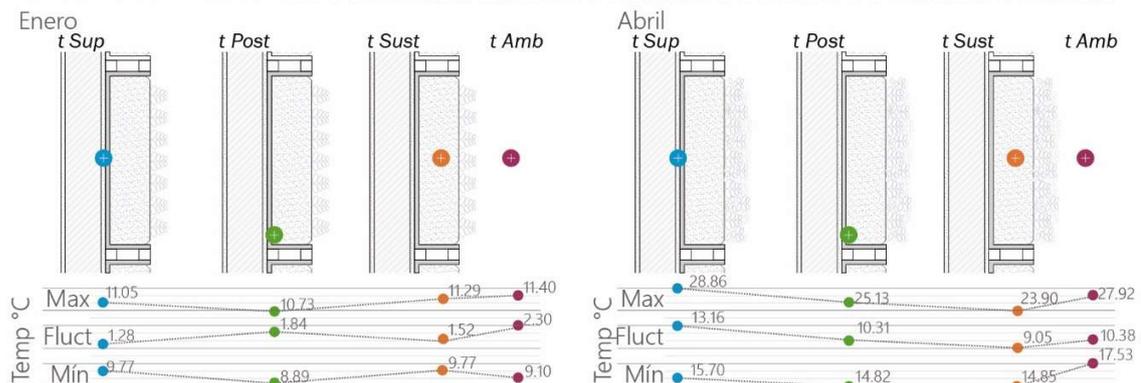


31% de cobertura vegetal
34% de vegetación en excelente estado



Cobertura vegetal baja y comportamiento **regular**.

DESEMPEÑO TÉRMICO



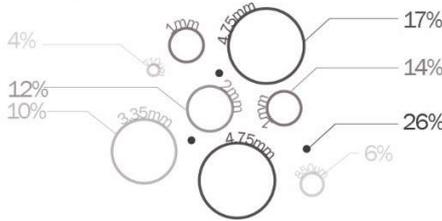
Durante el día frío las temperaturas al interior del sustrato y sobre la superficie fueron muy similares a la temperatura ambiente registrada (tAmb). En el día cálido, la temperatura de la superficie logró un máximo mayor que la temperatura ambiente, mientras que el interior del módulo se mantuvo por debajo. Debido a estos dos comportamientos, se podría inferir que hay una alta transmisión térmica y los cambios de temperatura del exterior afectan considerablemente el comportamiento sobre la superficie.

MÓDULOS SUSTRATO 2A FcF 30/70

PESO VOLUMÉTRICO



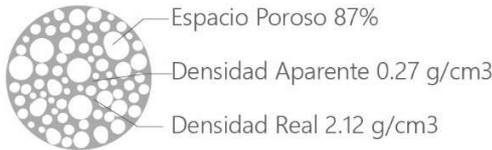
GRANULOMETRÍA



DESCRIPCIÓN
La Fibra de coco fina en proporción 30/70 con la mezcla de referencia, duplicó el peso de los módulos con proporción 70/30 con 210kg/m³

Hay **muy buena** variedad en las proporciones de tamaños de partículas. Esto se refleja en una buena aireación y retención hídrica.
53% Partículas ≥ a 1mm
47% Partículas < a 1mm

DENSIDAD AP, R, ESPACIO POROSO



Densidad aparente **apropiada**.

Densidad real **apropiada**.

Espacio poroso **alto**.

Se mantiene una densidad y espacio poroso adecuado a pesar de tener menor cantidad de fibra de coco.

MATERIA ORGÁNICA Y pH

6-7 pH

33% Materia orgánica

Sustrato **ligeramente ácido con tendencia a neutro**.

Dada la proporción 30/70, se disminuye el contenido de materia orgánica, sin embargo, el resultado sigue siendo **muy adecuado**.

COBERTURA VEGETAL

* Para esta conclusión se eligió la muestra del sustrato 2A con mejor cobertura vegetal.



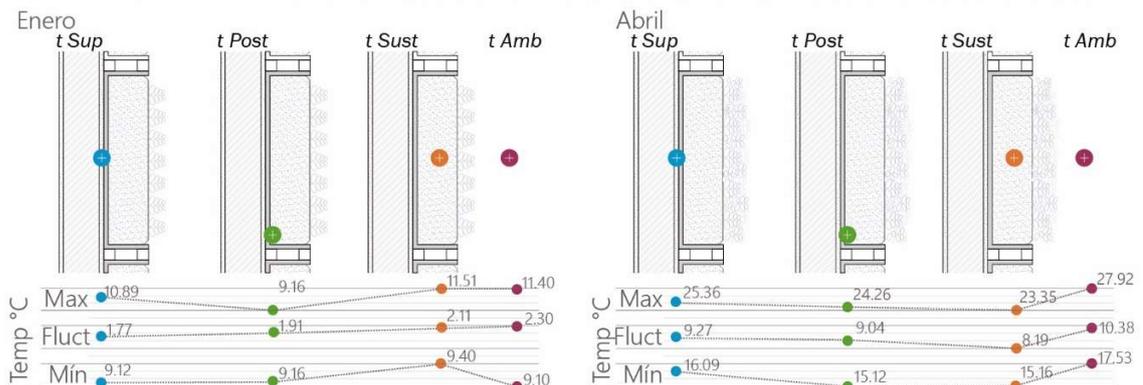
61% de cobertura vegetal
75% de vegetación en excelente estado



Muy Alta cobertura y **muy buen** desempeño vegetal.

El mejor sustrato con fibra de coco en los dos aspectos.

DESEMPEÑO TÉRMICO



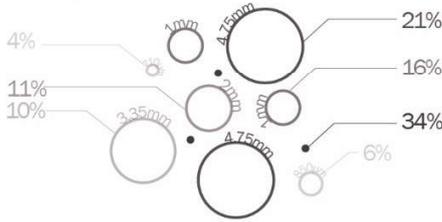
Durante el día frío no hay una amplia variación en las diferentes posiciones respecto la temperatura ambiente. Por el contrario, durante el día cálido, se puede ver claramente la regulación térmica sobre la superficie de la envolvente (tSup) con una disminución de hasta 3°C con respecto al máximo en la temperatura ambiente (tAmb).

MÓDULOS SUSTRATO 2B FcG 30/70

PESO VOLUMÉTRICO



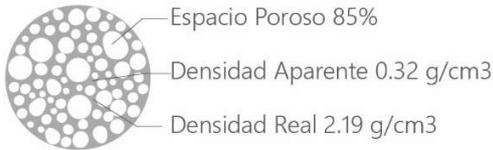
GRANULOMETRÍA



DESCRIPCIÓN
La Fibra de coco grande en proporción 30/70 con la mezcla de referencia, obtuvo un peso un 23% menor al módulo de solo mezcla de referencia, con 222kg/m³.

Se presenta un **buen** equilibrio en la proporción entre los diferentes tamaños de partículas.
58% Partículas ≥ a 1mm
41% Partículas < a 1mm

DENSIDAD AP, R, ESPACIO POROSO



Densidad aparente **apropiada**.
Densidad real **apropiada**.
Espacio poroso **alto**.

MATERIA ORGÁNICA Y pH

6-7 pH
27% Materia orgánica

Sustrato **ligeramente ácido con tendencia a 6**.
Presenta el menor contenido de materia orgánica, sin embargo, sigue siendo **muy adecuado**.

COBERTURA VEGETAL

* Para esta conclusión se eligió la muestra del sustrato 2B con mejor cobertura vegetal.

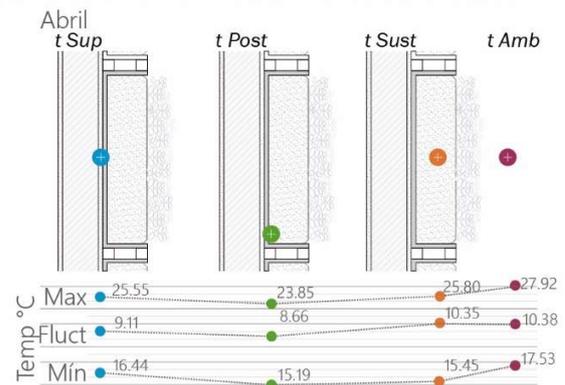
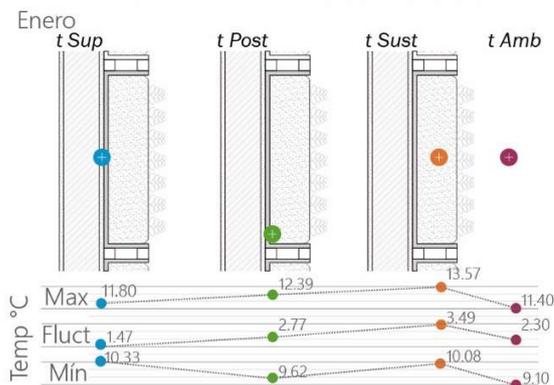


51% de cobertura vegetal
70% de vegetación en excelente estado



Alta cobertura y **buen** desempeño vegetal.

DESEMPEÑO TÉRMICO



Durante el día frío se buscaría mantener mayores temperaturas sobre la superficie. En este caso, se logra ese objetivo, obteniendo temperaturas mas altas que en la temperatura ambiente y una oscilación térmica menor. Durante el día cálido se obtienen temperaturas inferiores que las del ambiente en todas las posiciones y unas temperaturas sobre la superficie hasta 3°C por debajo de la temperatura ambiente máxima. De esta forma, se pudo obtener un buen resultado tanto en el día cálido como en el día frío con la fibra da coco grande en proporción 30/70.

MÓDULOS SUSTRATO 3R 00/100 MR

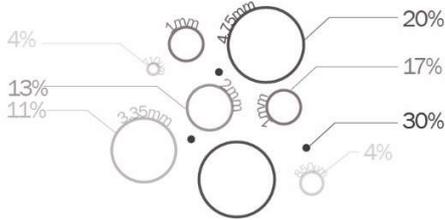
PESO VOLUMÉTRICO

DESCRIPCIÓN



La mezcla de referencia obtuvo el peso volumétrico más alto, con 290kg/m³.

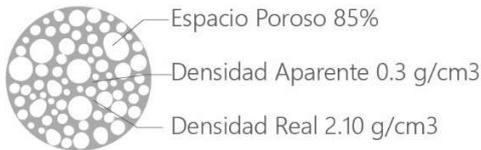
GRANULOMETRÍA



Se presenta un **buen** equilibrio en la proporción entre los diferentes tamaños de partículas.

61% Partículas \geq a 1mm
39% Partículas $<$ a 1mm

DENSIDAD AP, R, ESPACIO POROSO



Densidad aparente **apropiada**.

Densidad real **apropiada**.

Espacio poroso **alto**.

Se mantiene una densidad y espacio poroso adecuado a pesar de tener menor cantidad de fibra de coco.

MATERIA ORGÁNICA Y pH

6-7 pH
27% Materia orgánica

Sustrato **ligeramente ácido con tendencia a neutro**.

Dada la proporción 30/70, se disminuye el contenido de materia orgánica, sin embargo, el resultado sigue siendo **muy adecuado**.

COBERTURA VEGETAL

* Para esta conclusión se eligió la muestra del sustrato 3R con mejor cobertura vegetal.



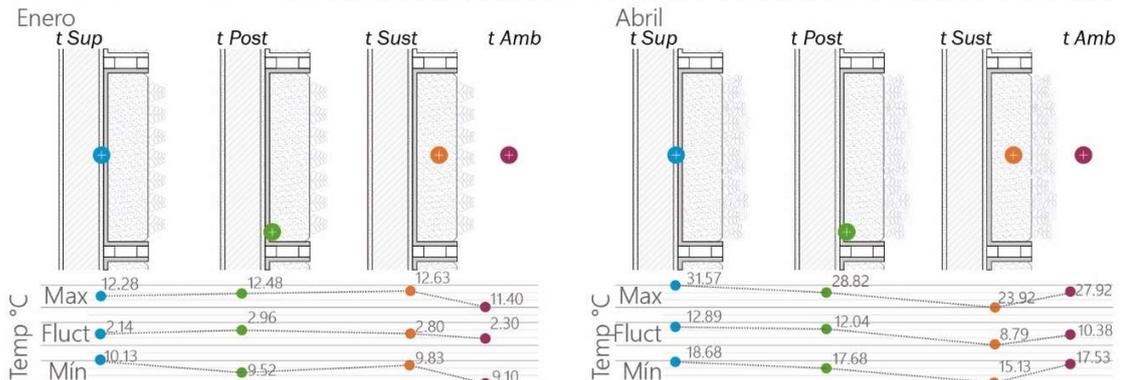
68% de cobertura vegetal
90% de vegetación en excelente estado



Densa cobertura y **muy buen** desempeño vegetal.

De todos, el módulo con mayor cobertura vegetal.

DESEMPEÑO TÉRMICO



Durante el día frío se logra mantener la temperatura posterior del módulo hasta 2°C por encima de la temperatura ambiente. Durante el día cálido en el sustrato (tSust) se obtienen temperaturas inferiores a la temperatura ambiente a lo largo del día, sin embargo, en la parte posterior del módulo, las temperaturas continúan aumentando a lo largo del día, superando por poco la temperatura ambiente máxima.

TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS

CARACTERÍSTICAS	MÓDULOS					
	1A FcF 70/30	1B FcG 70/30	2A FcF 30/70	2B FcG 30/70	3R 00Fc/100MR	
PESO VOLUMÉTRICO	106 Kg/m ³	107 Kg/m ³	210 Kg/m ³	222 Kg/m ³	290 Kg/m ³	
GRANULOMETRÍA	<710µ 710µ 850µ 1mm 2mm 3.35mm 4.75mm	<710µ 710µ 850µ 1mm 2mm 3.35mm 4.75mm	<710µ 710µ 850µ 1mm 2mm 3.35mm 4.75mm	<710µ 710µ 850µ 1mm 2mm 3.35mm 4.75mm	<710µ 710µ 850µ 1mm 2mm 3.35mm 4.75mm	30% 04% 04% 17% 13% 11% 20%
DENSIDAD APARENTE	DA 0.1 g/cm ³	DA 0.4 g/cm ³	DA 0.27 g/cm ³	DA 0.32 g/cm ³	DA 0.32 g/cm ³	
DENSIDAD REAL	DR 1.8 g/cm ³	DR 1.97 g/cm ³	DR 2.12 g/cm ³	DR 2.12 g/cm ³	DR 2.12 g/cm ³	
ESPACIO POROSO	EP 94%	EP 92%	EP 87%	EP 85%	EP 85%	
MATERIA ORGÁNICA	56%	45%	33%	27%	27%	
Ph	6-7	6-7	6-7	6-7	6-7	
COBERTURA VEGETAL	43%	31%	61%	51%	68%	
% VEGETACIÓN CLASIFICADA	42%	34%	75%	70%	90%	
COMO EXCELENTE ESTADO						
FLUCTUACIÓN TÉRMICA	T ENE:°C 11.40 T ABR:°C 27.90	T ENE:°C 11.05 T ABR:°C 28.86	T ENE:°C 10.89 T ABR:°C 25.36	T ENE:°C 11.80 T ABR:°C 25.50	T ENE:°C 12.28 T ABR:°C 31.57	
TEMPERATURA MÁXIMA	2.30 10.38	1.28 13.16	1.77 9.27	1.47 9.11	2.14 12.89	
TEMPERATURA MÍNIMA	9.10 17.53	9.77 15.70	9.12 16.09	10.33 16.44	10.13 18.68	

1A FcF 70/30 – Fibra de Coco Fina 70% / Mezcla de Referencia 30%
1B FcG 70/30 – Fibra de Coco Gruesa 70% / Mezcla de Referencia 30%

2A FcF 30/70 – Fibra de Coco Fina 30% / Mezcla de Referencia 70%
2B FcG 30/70 – Fibra de Coco Gruesa 30% / Mezcla de Referencia 70%
3R MR100 – Fibra de Coco 0% / Mezcla de Referencia 100%

AUMENTO EN LA PROPORCIÓN DE FIBRA DE COCO - 70% FC / 30% MEZCLA DE REFERENCIA

Se obtuvo como resultado que, al aumentar la cantidad de fibra de coco, sin importar su tamaño (sustratos 1A FcF 70/30, 1B FcG 70/30), se logran características físicas muy favorables: Peso volumétrico muy favorecedor, logrando hasta un 50% menos que el peso obtenido por los módulos con menor cantidad de fibra de coco y que la mezcla de referencia, en las densidades los rangos estuvieron dentro de lo aceptable y muy alto espacio poroso, mayor al 90%. Sin embargo, a pesar de estas características, el resultado de cobertura vegetal y de desempeño térmico, no fue favorable. El alto resultado en el espacio poroso es contraproducente, ya que el esqueje no encuentra material donde enraizarse y la lenta degradación de la fibra de coco aporta beneficios en cuanto a la estabilidad del medio de crecimiento, evitando de esta forma el asentamiento y compactación del sustrato en contenedor, sin embargo, esto podría implicar en una baja disponibilidad de nutrientes.

De esta manera, a pesar de tener un muy buen resultado en la caracterización física y química, según los resultados obtenidos durante la experimentación, la proporción 70% fibra de coco 30% mezcla de referencia no es suficiente para tener adecuado desarrollo vegetal y, por ende, una cobertura vegetal densa.

Del mismo modo, se vio afectado el desempeño térmico de estos módulos; teniendo en cuenta que, durante el mes de enero, la cobertura vegetal seguía siendo muy incipiente, todos los módulos estaban en "las mismas condiciones" a nivel vegetal, por lo que, el efecto de regulación térmica se diferenciaría básicamente por la composición del sustrato. Los sustratos con mayor cantidad de fibra de coco 1A (FcF 70/30), 1B (FcG 70/30), registraron temperaturas en sus posiciones muy similares a la temperatura ambiente. Se controlan adecuadamente las más bajas temperaturas, pero no se logra conservar sobre la superficie una temperatura superior a la temperatura ambiente.

Durante el día cálido, a pesar de que es notoria una reducción térmica sobre la superficie de la envolvente, a comparación de la superficie expuesta (en el caso de estos sustratos la diferencia con respecto a la superficie expuesta fue de 15°C en el de fibra de coco fina y 13°C en el de fibra de coco grande), estos dos fueron los que presentaron más altas temperaturas sobre la superficie. Al considerar que los módulos con estos dos sustratos fueron aquellos con más bajo rendimiento a nivel vegetal, se puede entonces determinar que la vegetación tiene una influencia prominente sobre el comportamiento térmico del sistema. Adicionalmente, es necesario agregar que, estos dos módulos están ubicados en la parte superior del sistema, por lo que, la respuesta térmica sobre la superficie pudo haber sido afectada levemente a comparación de aquellos que están en la parte inferior. Sin embargo, esto no se consideró de gran impacto, ya que, de ser una variable que afectara rotundamente el desempeño del experimento, el resultado en la superficie adyacente a todos los módulos ubicados en la parte superior hubiera sido idéntica. Y, por el contrario, sí se presentaron diferencias entre los dos tipos de sustratos (el 1A FcFy el 1B FcG) y se encontró una similitud casi idéntica en las muestras por sustrato.

DISMINUCIÓN EN LA PROPORCIÓN DE FIBRA DE COCO - 30%FC / 70%MR

Los sustratos con menor cantidad de fibra de coco (2A FcF 30/70, 2B FcG 30/70) resultaron con un peso volumétrico aceptable para un sistema de naturación en contenedor. La composición de 30% fibra de coco y 70% mezcla de referencia, obtuvo tanto para la fibra de coco fina como para la fibra de coco grande, un peso de 210 kg/m³ y 222kg/m³.

En cuanto a la caracterización física y química, también se obtuvieron resultados muy positivos; la proporción en partículas fue muy equilibrada en estos dos sustratos

y se mantuvo una proporción ideal de espacio poroso, junto con densidades dentro de los rangos aceptables. Vale la pena aclarar, que esta proporción permite obtener una mezcla relativamente homogénea. Adicionalmente, los componentes orgánicos de fácil descomposición y disposición para la planta promovieron una cobertura vegetal densa y con un buen desarrollo vegetal, permitiendo mantener un carácter estético y saludable en la vegetación. Sumado a esto, el resultado del desempeño térmico en estos módulos fue muy positivo. Durante el día frío, el sustrato con menor cantidad de fibra de coco 2A (FcF 30/70), obtuvo temperaturas muy similares a la temperatura ambiente, pero pudo mitigar los picos más bajos de temperatura durante este día. El sustrato 2B (FcG 30/70), registró en la superficie de la envolvente hasta 2°C más que la temperatura ambiente y se mantuvo superior a esta a lo largo del día. Por lo que, la fibra de coco grande logró conservar temperaturas superiores durante el día frío, acercándose a temperaturas adecuadas para un confort térmico al interior de la edificación.

Durante el día cálido, los sustratos 2A (FcF 30/70) y 2B (FcG 30/70), presentaron más bajas temperaturas sobre la superficie a lo largo del día. Estuvieron por debajo de la temperatura ambiente hasta 6°C. En ambos, se presenta un periodo de latencia en el que, teniendo como referencia la temperatura ambiente, estos, tanto la temperatura al interior de los sustratos, como en la superficie adyacente, tardan en incrementar y lo hacen de forma más paulatina. Se puede ver una diferencia con respecto a la superficie expuesta, que incrementa su temperatura de forma súbita. En este caso, no se presenta una diferencia considerable entre los diferentes tamaños de fibra de coco, y en ambos casos, los resultados a nivel vegetal fueron muy positivos.

SIN FIBRA DE COCO - 30%FC / 70%MR

Comparando el desarrollo vegetal entre los diferentes sustratos con fibra de coco y el de únicamente mezcla de referencia, se pudo ver que, la mezcla de referencia tuvo el mejor comportamiento vegetal en una de sus muestras, y una cobertura un poco menor en la otra (68% y 51% respectivamente). De esta manera se puede ver que, una proporción mayor de mezcla de referencia tiene un mejor resultado. Sin embargo, el aporte de la fibra de coco es fundamental, ya que, la segunda muestra de la mezcla de referencia es el ejemplo claro del efecto de la compactación y el asentamiento del sustrato. Esto se pudo contrarrestar con la aplicación de la fibra de coco, manteniendo a nivel general una superficie cubierta por la vegetación. Adicionalmente, los sustratos 2A (FcF 30/70) y 2B (FcG 30/70), tiene características físicas y químicas muy similares al sustrato 3R, con la ventaja de que son hasta un 25% más livianos, posibilitando tener una cobertura vegetal densa a lo largo de la experimentación.

CONCLUSIONES

Al agregar fibra de coco fina a la mezcla de referencia previamente estudiada, en proporción 30%FC / 70%MR, al final del periodo experimental, se obtuvo una cobertura vegetal mayor al 60%, y a su vez, se redujo la fluctuación térmica sobre la superficie hasta un 62%.

Tomando como referencia estudios previos en sistema de naturación vertical, en los que se encontró que los sistemas, dependiendo del tipo, logran reducir hasta un 50% la transmisión de calor al interior del espacio, para efectos de esta investigación, se evaluó la posibilidad de reducir la fluctuación térmica sobre la superficie hasta 50% sin considerar la materialidad de la edificación o la transmisión de calor al interior.

- Se comprueba la hipótesis principal, ya que la fibra de coco sí posee características que posibilitan un buen desarrollo vegetal en muros verdes y se obtienen beneficios térmicos dada la disminución de la fluctuación térmica sobre la envolvente.
- Al agregar fibra de coco de manera proporcional a una mezcla de sustrato con igual contenido de materia orgánica, mineral y drenante, se logra mantener la vegetación en buen estado. En el momento en que la cantidad de fibra de coco supera en mayor medida el contenido de materia orgánica disponible para la planta, no se logra un buen desarrollo vegetal, afectando de igual manera el desempeño térmico del sistema.
- Los módulos con mayor cantidad de fibra de coco lograron controlar adecuadamente los picos más bajos de temperatura, pero fueron los que indicaron un pobre desarrollo vegetal, a su vez, que indicaron los picos más altos de temperatura en el día cálido. Se concluye entonces que en sistemas de naturación vertical, el sustrato y la vegetación deben actuar en conjunto para que, se puedan obtener resultados favorables en términos de desarrollo vegetal, y a su vez, de desempeño térmico.
- Se comprueba la última hipótesis. A mayor cobertura vegetal, mejor fue el desempeño térmico tanto en los días cálidos como en los días fríos.

Se puede determinar entonces que, a partir del uso de la fibra de coco, sin importar su tamaño, en proporciones homogéneas con materiales que aporten nutrientes a la vegetación, se logra obtener ventajas en el desarrollo vegetal, ya que, a diferencia de los muros verdes hidropónicos, este sistema proporciona los elementos necesarios para el crecimiento de la vegetación, mientras se obtienen beneficios térmicos dada la disminución de la fluctuación térmica sobre la

envolvente, resultante de: la cobertura vegetal, el espesor y la composición del sustrato.

Se recomienda su uso para sistemas de naturación vertical de muros en edificaciones. Así entonces, se vuelve viable la integración y fomento de estos sistemas de naturación vertical como sistemas constructivos, con el fin de aprovechar superficies sin utilizar para la reposición del suelo ocupado por las edificaciones y como medida de desarrollo de la infraestructura vegetal de los centros urbanos.

POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN A SEGUIR.

Vista la naturación de envolventes como un sistema arquitectónico, el desarrollo de nuevas investigaciones basadas en los elementos que lo constituyen y materiales que lo componen, llevarían a optimizar su diseño para reducir costos, disminuir el riesgo a fallos, aumentar esperanza de vida de la vegetación y de esta forma promover una arquitectura que permita la generación y conservación de la vida.

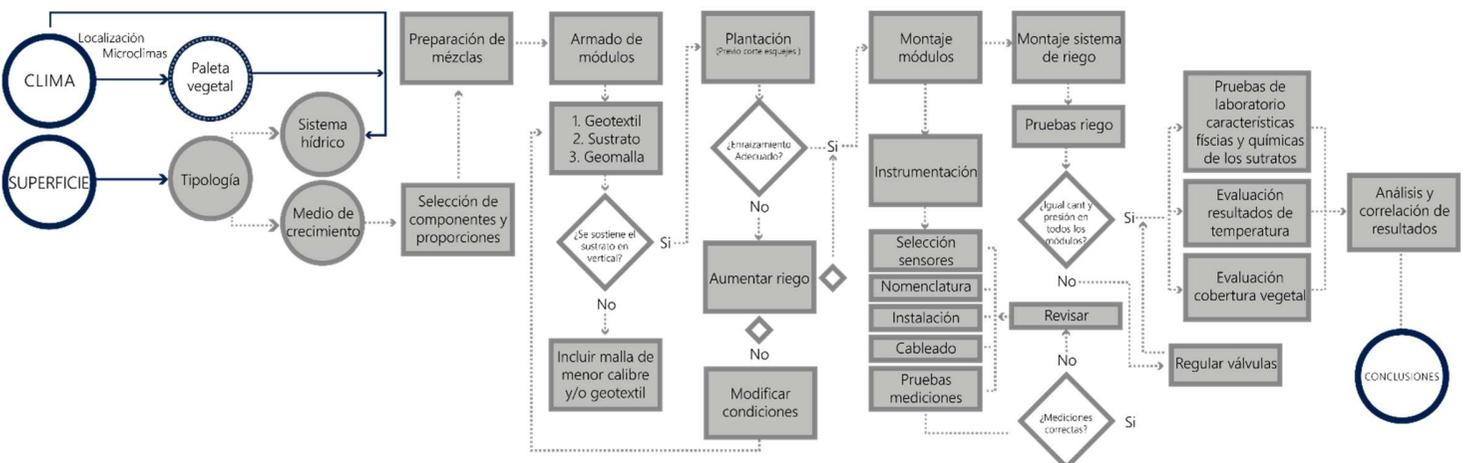
A continuación, se citarán algunas líneas de investigación que complementarían enormemente este trabajo:

- Evaluación del comportamiento de la fibra de coco en contenedores de naturación vertical por un periodo mayor a 1 año.
- Implementación de nuevos materiales como medios de crecimiento para sistemas de naturación vertical.
- Diseño de un módulo que permita conservar las propiedades del sustrato como material arquitectónico a la vez que disminuye su peso y permite un adecuado crecimiento de la vegetación.

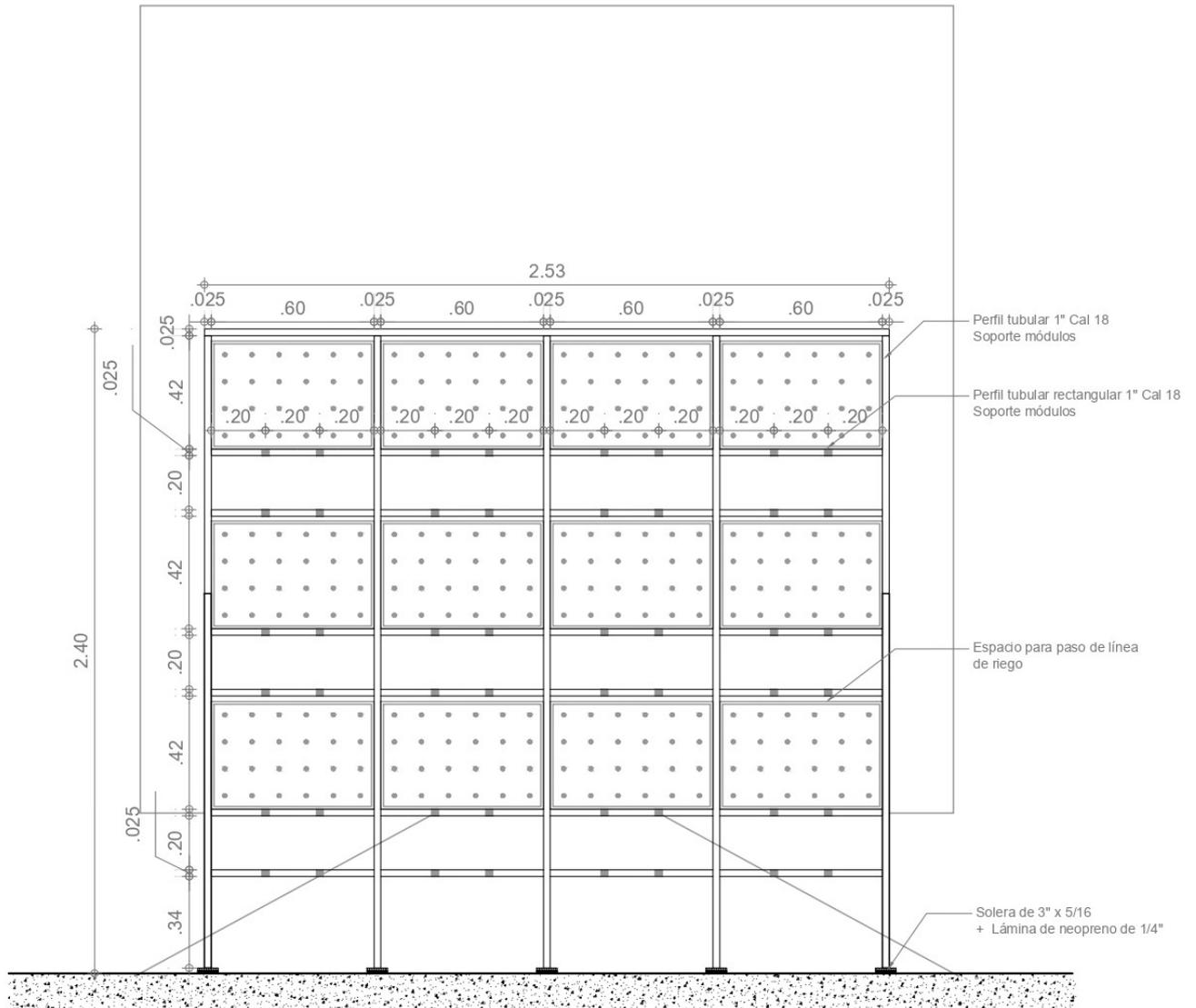
- Análisis de desempeño hídrico de sistemas de naturación vertical en contenedor y búsqueda de nuevas formas para aumentar su capacidad de asimilación de agua lluvia.
- Fachada de la edificación como sistema de naturación: evitar elementos superpuestos.
- Reducción de CO2 de un sistema de naturación vertical en contenedor.
- Comparación del desempeño térmico de un sistema de naturación hidropónico y un sistema de naturación con contenedores de sustrato.
- Evaluación de impacto ambiental de sistemas de naturación en vertical.

ANEXOS

ANEXO 1. DIAGRAMA DE FLUJO MODELO EXPERIMENTAL.



ANEXO 2. VISTA FRONTAL MODELO EXPERIMENTAL



ANEXO 4. CONSOLIDADO TÉRMICO - ENERO.

ENERO - COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL SISTEMA

	tAmb	tSupExp	1A				1B				2A				2B				tSup - tAmb				tSup - tSupExp						
			1A.tSup FcG 70/30	1A.tPost FcG 70/30	1A.tSust FcG 70/30	1A.tSust 1A.tSust	1B.tSup FcG 70/30	1B.tPost FcG 70/30	1B.tSust FcG 70/30	1B.tExp FcG 70/30	1B.tExp 1B.tExp	2A.tSup FcG 70/30	2A.tPost FcG 70/30	2A.tSust FcG 70/30	2A.tExp FcG 70/30	2A.tExp 2A.tExp	2B.tSup FcG 70/30	2B.tPost FcG 70/30	2B.tSust FcG 70/30	2B.tExp FcG 70/30	2B.tExp 2B.tExp	1A.t Sup - tAmb	1B.t Sup - tAmb	2A.t Sup - tAmb	2B.t Sup - tAmb	1A.t Sup - tSupExp	1B.t Sup - tSupExp	2A.t Sup - tSupExp	2B.t Sup - tSupExp
12:00:00 a. m.	9.80	10.55	10.79	10.56	11.00	-0.21	10.94	10.49	11.29	10.46	0.48	10.89	10.75	11.20	10.85	0.04	11.67	11.27	12.33	10.55	1.19	0.99	1.04	1.09	0.24	0.40	0.35	1.19	
12:30:00 a. m.	9.80	10.47	10.74	10.69	10.89	-0.15	10.76	10.39	11.20	10.46	0.31	10.77	10.63	11.10	10.75	0.02	11.49	11.18	12.17	10.46	1.04	0.94	0.99	1.04	0.27	0.29	0.30	1.02	
1:00:00 a. m.	9.70	10.26	10.58	10.53	10.76	-0.18	10.52	10.26	11.10	10.26	0.28	10.51	10.47	10.98	10.65	-0.14	11.15	11.01	11.97	10.36	0.79	0.83	0.81	0.32	0.26	0.25	0.89		
1:30:00 a. m.	9.60	10.26	10.61	10.34	10.63	-0.02	10.62	10.14	10.98	10.16	0.48	10.57	10.34	10.87	10.55	0.02	11.14	10.88	11.78	10.26	0.89	0.91	0.87	0.36	0.37	0.32	0.89		
2:00:00 a. m.	9.60	10.25	10.55	10.27	10.53	0.02	10.62	10.05	10.89	10.06	0.58	10.52	10.23	10.75	10.55	-0.03	11.03	10.78	11.63	10.16	0.89	0.91	0.87	0.30	0.37	0.37	0.78		
2:30:00 a. m.	9.60	10.18	10.51	10.20	10.43	0.08	10.61	9.96	10.81	10.06	0.59	10.48	10.13	10.66	10.46	-0.09	11.00	10.67	11.51	10.16	0.89	0.91	0.87	0.33	0.48	0.30	0.79		
3:00:00 a. m.	9.60	10.19	10.52	10.08	10.36	0.05	10.66	9.90	10.73	10.06	0.69	10.46	10.07	10.58	10.55	-0.09	11.00	10.67	11.40	10.16	0.89	0.91	0.87	0.34	0.48	0.38	0.82		
3:30:00 a. m.	9.60	10.15	10.46	10.12	10.31	0.05	10.55	9.85	10.66	9.97	0.59	10.34	10.02	10.49	10.46	-0.12	10.90	10.64	11.32	10.06	0.89	0.91	0.87	0.32	0.41	0.30	0.76		
4:00:00 a. m.	9.60	10.13	10.42	10.05	10.25	0.07	10.51	9.78	10.60	9.97	0.59	10.27	9.95	10.42	10.46	-0.19	10.86	10.60	11.25	10.06	0.89	0.91	0.87	0.29	0.38	0.44	0.78		
4:35:00 a. m.	9.60	10.15	10.39	9.89	10.18	0.01	10.55	9.73	10.52	9.97	0.59	10.26	9.90	10.34	10.46	-0.20	10.81	10.55	11.16	10.06	0.79	0.89	0.86	0.25	0.41	0.42	0.67		
5:00:00 a. m.	9.60	10.08	10.32	9.89	10.15	0.07	10.46	9.69	10.48	9.97	0.50	10.15	9.86	10.29	10.46	-0.31	10.70	10.53	11.11	9.97	0.79	0.89	0.86	0.24	0.38	0.07	0.62		
5:30:00 a. m.	9.60	10.06	10.29	9.79	10.08	0.01	10.50	9.64	10.42	9.87	0.63	10.19	9.81	10.22	10.36	-0.17	10.71	10.47	11.05	9.97	0.79	0.89	0.86	0.23	0.45	0.44	0.65		
6:00:00 a. m.	9.60	10.06	10.26	9.68	10.03	0.03	10.46	9.59	10.37	9.87	0.59	10.05	9.76	10.15	10.36	-0.31	10.66	10.44	10.99	9.97	0.79	0.89	0.86	0.21	0.41	0.00	0.61		
6:30:00 a. m.	9.70	10.04	10.17	9.67	9.98	0.00	10.29	9.53	10.32	9.87	0.42	9.90	9.70	10.09	10.36	-0.46	10.51	10.41	10.92	9.97	0.79	0.89	0.86	0.20	0.13	0.25	0.44	0.47	
7:00:00 a. m.	9.70	10.05	10.12	9.67	9.95	0.07	10.26	9.49	10.26	9.87	0.39	9.82	9.65	10.03	10.36	-0.54	10.43	10.39	10.87	9.97	0.47	0.42	0.56	0.12	0.73	0.07	0.22	0.33	0.39
7:30:00 a. m.	9.80	10.13	10.09	9.71	9.91	0.08	10.18	9.48	10.22	9.97	0.21	9.84	9.62	9.99	10.36	-0.52	10.42	10.37	10.84	9.97	0.86	0.29	0.38	0.04	0.62	0.04	0.05	0.29	0.39
8:00:00 a. m.	9.90	10.50	10.02	9.70	9.92	0.10	10.17	9.45	10.18	10.26	-0.09	9.73	9.59	9.95	10.65	-0.99	10.38	10.38	10.84	10.16	0.72	0.12	0.27	-0.17	0.48	-0.48	-0.33	-0.97	-0.12
8:30:00 a. m.	10.10	12.11	9.98	9.90	10.03	-0.05	10.12	9.46	10.16	11.14	-1.02	9.74	9.59	9.99	11.72	-1.98	10.36	10.45	10.96	11.14	-0.78	-0.12	0.02	-0.36	-0.26	-2.13	-1.99	-2.17	-1.41
9:00:00 a. m.	10.70	12.69	9.95	10.26	10.33	-0.38	10.02	9.54	10.20	12.30	-2.78	9.75	9.67	10.14	12.88	-3.19	10.42	10.67	11.30	12.21	-1.79	-0.75	-0.68	-0.95	-0.28	-2.74	-2.67	-2.94	-2.72
9:30:00 a. m.	11.10	14.52	10.00	10.58	10.59	-0.59	10.02	9.66	10.27	13.56	-3.54	9.79	9.80	10.30	14.04	-4.25	10.58	10.98	11.65	13.27	-2.69	-1.10	-1.08	-1.31	-0.52	-4.52	-4.50	-4.73	-3.44
10:00:00 a. m.	11.20	12.56	10.07	10.60	10.73	-0.66	9.99	9.76	10.35	12.88	-2.89	9.74	9.95	10.38	13.17	-3.43	10.78	11.26	11.88	12.50	-1.72	-1.13	-1.21	-1.46	-0.42	-2.49	-2.57	-2.82	-1.98
10:30:00 a. m.	10.90	12.78	10.07	10.32	10.57	-0.50	9.92	9.80	10.35	12.50	-2.58	9.70	10.02	10.32	12.79	-3.09	10.91	11.29	11.75	12.11	-1.70	-0.83	-0.98	-1.20	-0.01	-2.71	-2.86	-3.08	-1.87
11:00:00 a. m.	10.80	12.35	10.03	10.12	10.51	-0.48	9.86	9.79	10.32	12.21	-2.35	9.63	10.03	10.29	12.40	-2.77	10.95	11.24	11.71	11.72	-0.70	-0.77	-0.94	-1.17	-0.15	-2.82	-2.94	-2.72	-1.90
11:30:00 a. m.	10.90	13.55	10.11	10.52	10.80	-0.69	10.03	9.89	10.37	13.65	-3.62	9.85	10.09	10.46	13.85	-4.00	10.87	11.33	12.02	13.17	-2.87	-0.79	-0.87	-1.05	-0.03	-3.44	-3.52	-3.70	-2.68
12:00:00 p. m.	10.90	14.35	10.28	10.87	11.08	-0.80	10.24	10.05	10.45	14.33	-4.09	10.09	10.24	10.63	14.42	-4.39	11.06	11.57	12.37	13.75	-2.69	-0.62	-0.66	-0.81	-0.16	-4.07	-4.11	-4.26	-3.29
12:30:00 p. m.	10.70	12.85	10.64	11.16	11.35	-0.71	10.55	10.24	10.59	14.42	-3.87	10.30	10.47	10.84	14.61	-4.31	11.27	11.73	12.75	13.85	-2.58	-0.06	-0.15	-0.40	0.57	-2.21	-2.30	-2.55	-1.88
1:00:00 p. m.	10.60	14.52	10.74	11.65	11.65	-0.91	10.68	10.42	10.70	15.66	-4.98	10.43	10.64	11.08	16.14	-5.71	11.29	11.89	13.06	15.28	-3.99	-0.14	-0.08	-0.17	0.69	-3.78	-3.84	-4.09	-3.23
1:30:00 p. m.	10.80	12.08	10.84	11.24	11.40	-0.56	10.70	10.49	10.82	12.88	-2.18	10.38	10.76	11.01	13.27	-2.89	11.56	11.97	12.91	12.59	-1.03	0.04	-0.10	-0.42	0.76	-1.04	-1.88	-1.70	-0.51
2:00:00 p. m.	10.70	14.06	10.79	10.92	11.31	-0.52	10.69	10.48	10.83	13.65	-2.96	10.32	10.76	10.98	13.94	-3.62	11.57	11.85	12.72	13.27	-1.70	0.09	-0.01	-0.38	0.87	-3.27	-3.37	-3.74	-2.49
2:30:00 p. m.	11.30	16.72	10.80	11.72	11.88	-1.08	10.75	10.56	10.96	16.52	-5.77	10.42	10.81	11.36	16.81	-6.39	11.65	12.01	13.29	15.86	-4.21	-0.50	-0.55	-0.88	0.35	-5.92	-5.97	-6.30	-5.07
3:00:00 p. m.	11.30	16.07	10.94	11.89	12.02	-1.08	10.85	10.66	11.14	15.76	-4.91	10.51	10.96	11.49	16.24	-5.73	11.75	12.32	13.56	15.28	-3.53	-0.36	-0.45	-0.79	0.45	-5.13	-5.22	-5.86	-4.82
3:30:00 p. m.	11.40	12.76	11.05	11.38	11.76	-0.71	10.94	10.72	11.18	13.46	-2.52	10.63	11.06	11.38	13.94	-3.31	11.77	12.36	13.31	13.27	-1.50	-0.35	-0.46	-0.77	0.37	-1.71	-1.82	-2.13	-0.98
4:00:00 p. m.	11.40	12.25	11.08	10.95	11.48	-0.40	10.95	10.69	11.14	12.59	-1.64	10.62	11.05	11.24	13.17	-2.55	11.66	12.16	12.98	12.40	-0.74	-0.32	-0.45	-0.78	0.26	-1.77	-1.80	-1.83	-0.59
4:30:00 p. m.	11.40	12.08	11.16	10.81	11.28	-0.12	11.01	10.63	11.09	12.21	-1.70	10.74	10.94	11.11	12.69	-1.95	11.69	11.95	12.70	12.01	-0.82	-0.24	-0.39	-0.66	0.29	-0.92	-1.07	-1.04	-0.39
5:00:00 p. m.	11.30	11.95	10.90	10.58	11.16	-0.26	10.52	10.52	11.05	12.01	-1.49	10.48	10.84	11.02	12.50	-2.02	11.46	11.76	12.51	11.82	-0.96	-0.40	-0.78	-0.82	0.16	-1.05	-1.43	-1.47	-0.48
5:30:00 p. m.	11.30	11.62	10.92	10.65	11.05	-0.13	10.76	10.44	11.01	11.82	-1.06	10.54	10.73	10.97	12.30	-1.76	11.49	11.66	12.37	11.63	-0.14	-0.38	-0.54	-0.76	0.19	-0.70	-0.86	-1.08	-0.13
6:00:00 p. m.	11.30	10.47	10.97	10.58	10.89	0.08	10.91	10.36	10.95	11.14	-0.23	10.64	10.63	10.86	11.53	-0.89	11.49	11.55	12.14	10.94	0.95	-0.33	-0.39	-0.66	0.19	0.59	0.45	0.78	1.08
6:30:00 p. m.	10.70	9.98	10.72	10.11	10.65	0.07	10.02	10.21	10.87	10.36	-0.34	10.44	10.51	10.71	10.85	-0.41	11.45	11.36	11.83	10.26	1.19	0.02	-0.68	-0.26	0.75	0.70	0.46	0.76	1.44
7:00:00 p. m.	10.20	9.91	10.65	9.99	10.47	0.08	10.23	10.06	10.77	10.16	0.07	10.35	10.34	10.58	10.55	-0.20	11.40	11.18	11.61	10.06	1.19	0.45	0.03	0.15	0.70	0.75	0.33	0.45	1.50
7:30:00 p. m.	10.30	10.04	10.46	9.93	10.47	0.02	10.17	9.98	10.65	10.16	0.01	10.22	10.25	10.48	10.65	-0.43	11.22	11.06	11.46	10.06	1.19	0.16	-0.13	-0.08	0.22	0.43	0.14	0.19	1.19
8:00:00 p. m.	10.30	10.29	10.36	9.96	1																								

ANEXO 5. CONSOLIDADO TÉRMICO - ABRIL

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL SISTEMA - ABRIL

	tAmb	tSupExp	1A				1B				2A				2B				tSup - tAmb				tSup - tSupExp			
			1A. tSup FcF 70/30	1A. tPost FcF 70/30	1A. tSust FcF 70/30	1A. tSup - 1A. tSust	1B. tSup FcG 70/30	1B. tPost FcG 70/30	1B. tSust FcG 70/30	1B. tSup - 1B. tSust	2A. tSup FcF 30/70	2A. tPost FcF 30/70	2A. tSust FcF 30/70	2A. tSup - 2A. tSust	2B. tSup FcG 30/70	2B. tPost FcG 30/70	2B. tSust FcG 30/70	2B. tSup - 2B. tSust	1A. tSup - tAmb	1B. tSup - tAmb	2A. tSup - tAmb	2B. tSup - tAmb	1A. tSup - tSupExp	1B. tSup - tSupExp	2A. tSup - tSupExp	2B. tSup - tSupExp
12:00:00 a.m.	18.747	17.07	19.52	17.298	17.57	0.96	19.32	17.736	18.18	1.14	19.59	18.053	18.19	1.40	19.78	18.001	18.61	0.77	0.78	0.87	0.88	1.00	2.49	2.27	2.59	2.74
12:30:00 a.m.	18.64	17.16	19.3	17.003	17.19	1.11	19.03	17.39	17.85	1.18	19.37	17.803	17.89	1.48	19.64	17.803	18.27	0.47	0.56	0.59	0.70	1.00	2.18	2.22	2.38	2.49
1:00:00 a.m.	18.402	17.925	19.08	16.766	16.96	1.12	18.85	17.147	17.59	1.26	19.19	17.579	17.67	1.52	19.46	17.62	18.1	0.58	0.58	0.45	0.79	1.00	1.18	0.98	1.27	1.58
1:30:00 a.m.	18.247	17.25	18.69	16.604	16.78	0.91	18.54	17.021	17.36	1.18	18.88	17.375	17.45	1.43	19.14	17.434	17.93	0.21	0.24	0.29	0.63	0.80	1.44	1.29	1.63	1.88
2:00:00 a.m.	18.247	16.225	18.44	16.415	16.5	0.94	17.99	16.731	17.12	0.87	18.66	17.189	17.22	1.44	18.94	17.269	17.64	0.30	0.19	0.26	0.41	0.69	2.22	1.77	2.43	2.78
2:30:00 a.m.	17.9615	16.52	18.18	16.165	16.21	0.97	17.86	16.478	16.85	1.01	18.43	16.99	1.7	1.43	18.74	17.089	17.39	0.35	0.22	0.30	0.47	0.79	1.69	1.39	1.99	2.22
3:00:00 a.m.	17.605	16.905	17.93	15.94	16.04	0.89	17.75	16.335	16.52	1.13	18.19	16.758	16.78	1.41	18.45	16.844	17.21	0.24	0.32	0.35	0.59	0.89	1.09	0.84	1.29	1.59
3:30:00 a.m.	17.605	16.75	17.66	15.781	15.83	0.83	17.58	16.219	16.4	1.18	17.93	16.528	16.55	1.38	18.12	16.576	16.99	0.13	0.06	0.02	0.38	0.59	0.99	0.88	1.18	1.39
4:00:00 a.m.	18.4375	16.095	17.43	15.606	15.61	0.82	17.32	16.01	16.18	1.14	17.68	16.295	16.3	1.38	17.89	16.312	16.7	0.19	0.01	0.02	0.76	0.55	1.38	1.29	1.59	1.88
4:35:00 a.m.	19.425	15.335	17.14	15.394	15.32	0.82	16.99	15.761	15.9	1.09	17.39	16.079	16.02	1.37	17.65	16.093	16.35	0.29	0.29	0.44	0.79	0.78	1.88	1.69	2.09	2.38
5:00:00 a.m.	19.747	14.61	16.86	15.182	15.1	0.76	16.5	15.479	15.71	0.78	17.14	15.909	15.83	1.31	17.42	15.946	16.11	0.31	0.29	0.25	0.61	0.23	2.29	1.88	2.59	2.88
5:30:00 a.m.	19.7955	15.03	16.21	14.879	14.97	1.24	16.07	15.231	15.41	0.59	16.59	15.643	15.56	1.03	16.82	15.713	15.76	0.06	0.59	0.73	0.71	0.28	1.18	1.09	1.59	1.79
6:00:00 a.m.	20.298	14.825	16.11	14.737	14.81	1.30	16.05	15.09	15.21	0.80	16.38	15.415	15.39	0.99	16.64	15.505	15.64	0.00	0.19	0.25	0.32	0.36	1.29	1.29	1.59	1.88
6:30:00 a.m.	20.659	15.17	15.94	14.605	14.59	1.35	15.79	14.907	15.09	0.74	16.25	15.246	15.23	1.02	16.58	15.343	15.49	0.09	0.72	0.87	0.41	0.48	0.87	0.69	1.18	1.49
7:00:00 a.m.	20.9255	15.85	15.86	14.545	14.61	1.25	15.71	14.822	14.89	0.82	16.19	15.13	15.18	1.03	16.52	15.218	15.52	0.00	0.07	0.22	0.74	0.41	0.01	0.31	0.61	0.69
7:30:00 a.m.	21.383	17.085	15.84	14.683	14.8	1.04	15.76	14.937	14.85	0.91	16.14	15.137	15.18	0.96	16.46	15.2	15.69	0.77	0.54	0.52	0.94	0.91	1.18	0.95	0.95	0.69
8:00:00 a.m.	22.066	20.705	15.92	15.16	15.3	0.62	16.01	15.39	14.39	1.08	16.14	15.355	15.37	0.77	16.49	15.408	16.16	0.32	0.15	0.06	0.59	0.59	0.79	0.79	0.97	0.79
8:30:00 a.m.	22.797	23.345	16.18	16.091	16.09	0.09	16.76	16.329	15.24	1.52	16.52	15.863	15.71	0.80	16.87	15.876	16.87	0.00	0.62	0.64	0.28	0.38	0.77	0.69	0.68	0.68
9:00:00 a.m.	23.3505	25.83	16.45	17.231	16.99	0.54	17.21	17.504	15.59	1.52	17.06	16.546	16.2	0.86	17.34	16.482	17.61	0.27	0.31	0.15	0.30	0.30	0.82	0.38	0.77	0.49
9:30:00 a.m.	24.0095	27.81	17.17	18.331	17.85	0.68	18.54	18.576	16.21	2.33	17.43	17.33	16.67	0.76	17.79	17.161	18.32	0.53	0.84	0.47	0.58	0.62	1.06	0.92	1.08	1.02
10:00:00 a.m.	24.419	31.015	18.15	19.377	18.78	0.63	19.57	19.631	16.85	2.72	18.22	18.188	17.18	0.04	18.57	17.883	19.08	0.51	0.27	0.485	0.20	0.85	1.287	1.145	1.28	1.245
10:30:00 a.m.	25.105	33.465	19.27	20.63	20	0.73	21.33	20.825	17.57	3.66	19.04	19.102	17.93	1.11	19.53	18.735	20.11	0.58	0.84	0.78	0.67	0.58	1.470	1.214	1.44	1.394
11:00:00 a.m.	25.745	32.67	20.71	21.667	21.09	0.38	22.75	21.869	18.55	4.20	20.46	20.007	18.72	1.74	20.83	19.557	21.19	0.36	0.86	0.82	0.51	0.74	1.195	0.92	1.21	1.184
11:30:00 a.m.	26.11	34.52	21.46	22.17	21.73	0.27	23.14	22.435	19.3	3.84	20.84	20.758	19.35	1.49	21.33	20.199	21.88	0.55	0.65	0.97	0.57	0.78	1.305	1.138	1.38	1.319
12:00:00 p.m.	26.536	35.51	22.02	22.718	22.53	0.51	23.27	23.007	20.6	3.66	21.55	21.319	19.99	1.56	21.91	20.767	22.63	0.72	0.52	0.82	0.49	0.43	1.349	1.179	1.39	1.360
12:30:00 p.m.	26.9965	35.21	22.22	23.246	23.04	0.18	26.31	23.504	20.71	5.00	22.55	21.939	20.49	2.06	22.79	21.324	23.06	0.27	0.78	0.69	0.45	0.42	0.99	0.89	1.26	1.242
1:00:00 p.m.	27.574	38.495	25.33	23.731	23.81	1.52	26.53	24.106	21.39	5.94	23.11	22.479	21.04	2.07	23.48	21.839	23.63	0.15	0.24	0.04	0.46	0.49	1.317	1.197	1.39	1.362
1:30:00 p.m.	27.917	38.27	26.24	24.452	24.67	1.57	27.94	24.83	22.11	5.69	24.04	23.097	21.69	2.85	24.43	22.429	24.39	0.04	0.68	0.02	0.38	0.49	1.202	1.038	1.425	1.384
2:00:00 p.m.	27.666	36.42	27.29	24.638	25.09	2.20	28.26	25.08	22.72	5.94	24.79	23.568	22.14	2.85	25.02	22.83	24.79	0.23	0.38	0.09	0.28	0.49	0.712	0.815	1.165	1.140
2:30:00 p.m.	27.186	33.475	28.69	24.742	25.31	0.99	28.85	25.104	23.16	5.07	25.02	23.769	22.51	2.91	25.15	23.12	25.04	0.11	0.30	0.09	0.24	0.47	0.66	0.845	0.845	0.845
3:00:00 p.m.	26.5905	37.9	27.1	24.602	25.28	2.02	27.33	24.866	23.4	4.93	24.71	23.788	22.73	2.98	24.74	23.275	25.2	0.46	0.11	0.04	0.18	0.18	0.66	0.66	0.785	0.785
3:30:00 p.m.	26.461	32.985	28.65	24.847	25.57	0.98	28.52	25.075	23.86	4.86	25.36	24.021	23.01	2.85	25.5	23.465	25.52	0.02	0.29	0.29	0.18	0.18	0.47	0.47	0.785	0.749
4:00:00 p.m.	26.186	33.285	27.4	24.939	25.67	0.73	27.79	25.127	23.82	4.97	25.09	24.119	23.17	2.92	25.26	23.624	25.73	0.47	0.21	0.19	0.18	0.18	0.47	0.47	0.80	0.80
4:30:00 p.m.	25.803	31.915	28.54	24.897	25.62	0.92	27.79	24.963	23.88	3.91	24.97	24.13	23.25	1.72	25.06	23.726	25.65	0.59	0.29	0.19	0.18	0.18	0.47	0.47	0.80	0.80
5:00:00 p.m.	25.567	31.025	27.64	24.886	25.65	0.99	27.22	24.931	23.4	3.32	25.14	24.155	23.31	1.83	25.38	23.844	25.69	0.31	0.29	0.19	0.18	0.18	0.47	0.47	0.80	0.80
5:30:00 p.m.	25.23	29.23	26.91	24.551	25.22	1.69	26.38	24.548	23.76	2.62	24.88	24.032	23.29	1.59	25.01	23.769	25.49	0.48	0.28	0.18	0.18	0.18	0.47	0.47	0.80	0.80
6:00:00 p.m.	24.4715	26.915	26.06	23.699	24.45	1.61	25.75	23.836	23.44	2.31	24.49	23.624	22.71	2.18	25.16	23.994	24.49	0.67	0.29	0.18	0.18	0.18	0.47	0.47	0.80	0.80
6:30:00 p.m.	23.609	24.98	24.97	22.73	23.69	1.28	24.81	22.971	22.75	2.06	24.69	23.033	21.77	2.92	24.86	22.754	22.74	0.21	0.36	0.18	0.18	0.18	0.47	0.47	0.80	0.80
7:00:00 p.m.	23.124	23.635	24.1	21.985	22.6	1.50	23.84	22.212	22.15	1.69	23.79	22.292	21.7	2.09	23.86	22.03	22.83	0.03	0.38	0.18	0.18	0.18	0.47	0.47	0.80	0.80
7:30:00 p.m.	22.5355	23.215	23.64	21.481	21.94	1.70	23.47	21.77	21.64	1.83	23.32	21.852	21.4	1.92	23.47	21.585	22.52	0.95	0.38	0.18	0.18	0.18	0.47	0.47	0.80	0.80
8:00:00 p.m.	22.199	22.27	23.09	21.097	21.4	1.69	22.8	21.342	21.19	1.61	22.79	21.425	21.16	1.63	22.89	21.217	22.18	0.71	0.39	0.18	0.18	0.18	0.47	0.47	0.80	0.80
8:30:00 p.m.	21.5385	22.27	22.64	20.738	21.08	1.56	22.42	20.951	20.86	1.56	22.52	21.044	20.97	1.55	22.64	20.898	21.88	0.76	0.38	0.18	0.18	0.18	0.47	0.47	0.80	0.80
9:00:00 p.m.	20.9995	21.36	22.31	20.247	20.53	1.78	22.08	20.49	20.5	1.58	22.18	20.618	20.58	1.60	22.34	20.525	21.4	0.94	0.38	0.18	0.18					

GLOSARIO

Cobertura vegetal - Capa de vegetación que ocupa un área determinada. Está relacionada con la densidad vegetal sobre un área específica.

Construcción sustentable - Construcción con un sentido de responsabilidad ambiental que hace un uso racional de los recursos con el gasto mínimo de energía posible en todas las etapas relacionadas.

Capacidad de campo - Es la capacidad máxima de absorción hídrica que tiene el suelo antes de que haya un escurrimiento.

Desarrollo vegetal - Evolución, desarrollo y crecimiento de la planta que está determinado por condiciones ideales del entorno

Endémico - Que vive y proviene únicamente en una región específica.

Envolvente - Es la parte de la edificación en contacto permanente con el exterior, que limita y protege el interior del exterior.

Escorrentía - La cantidad de agua que no se infiltra en el suelo fluyendo sobre la superficie y llevando todo tipo de contaminantes en su paso hacia los afluentes hídricos.

Fachadas vegetales - Sistemas de naturación vertical de envolventes donde la fachada de la edificación sirve como medio de soporte y crecimiento de la vegetación, mientras que tienen sus raíces en el suelo.

Fertiirrigación - La introducción de nutrientes y fertilizantes al agua por medio del sistema de riego.

Filtro - Geotextil compuesto de fibras de polipropileno, poliéster o poliamidas, utilizado como medio de crecimiento para sistemas hidropónicos.

Fibra geotextil - Material sintético plano formado por fibras poliméricas cuya función es separar materiales, filtrar y controlar el drenaje.

Hidropónico - Es una forma de agricultura en la que las raíces reciben una solución de agua con nutrientes para el desarrollo de las plantas sin necesidad de suelo.

Irrigación - Regar una superficie

Isla de calor urbana - Fenómeno que se produce al interior de las ciudades que consiste en el aumento de la temperatura debido a comportamiento térmico de los

materiales que predominan en las zonas urbanas.

Lixiviación - Proceso de disolución de elementos sólidos en contacto con un disolvente líquido.

Mantenimiento – Conservación de un elemento en buen estado, con el fin de preservar sus condiciones y evitar su degradación.

Medio de crecimiento – Elemento en el que vive y se desarrolla un ser vivo, en este caso una planta.

Muro vegetal – estructura adosada a la fachada de la edificación, que sirve como sustento y medio de crecimiento para las plantas

Naturación – Es la incorporación de vegetación como sistema constructivo tanto en superficies horizontales como verticales e inclinadas.

Nutrientes – Alimento y componentes químicos necesarios para un adecuado desarrollo de la planta.

Sistema constructivo – Conjunto de elementos, técnicas o procesos que le dan forma a una edificación.

Sostenibilidad – Preservar y satisfacer las necesidades actuales y de las generaciones venideras con el uso eficiente de los recursos naturales, mientras se da un desarrollo económico y social, viable y equitativo.

Suelo orgánico – Suelos turbosos con un 16% o más de materia orgánica en todo el perfil del suelo. NOM-021-RECNAT-2000

Suelo mineral - Suelos desarrollados a partir de rocas minerales con bajo contenido de materia orgánica. NOM-021-RECNAT-2000

Sustrato – Medio artificial compuesto de material mineral, orgánico y drenante, que posibilita el desarrollo vegetal.

Vegetación urbana – Parte del sistema ambiental de las ciudades que se encuentra en amenaza por la exponencial densificación de las zonas urbanas.

REFERENCIAS

- Acosta, A. C. (2011). *Sistemas vegetales verticales*. Madrid.
- Alvarez, T. M. (2015). Ebenezer Howard y la Ciudad Jardín. *Revista digital de artes y humanidades*.
- Ansorena, M. (1994). *Sustratos. Propiedades y caracterización*.
- Arup GmbH. (2016). Envoltantes vegetales en edificios. *Cities Alive*.
- Burés, S. (1997). Sustratos. *Madrid: Ediciones agrotécnicas*.
- Checa-Artasu, M. M. (2016). Las áreas verdes en la Ciudad de México. Las diversas escalas de una geografía urbana.
- Comisión Del Cambio Climático. (2016). *Dictamen de la comisión de cambio climático de la iniciativa que reforma los artículos 3° y 34 de la ley general de cambio climático*. Ciudad de México.
- Dr. Sam C. M. HUI, & Zhao, Z. (s.f.). Thermal regulation performance of green living walls in buildings.
- European Climate Adaptation Platform. (2016). Obtenido de <https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/case-studies/four-pillars-to-hamburg2019s-green-roof-strategy-financial-incentive-dialogue-regulation-and-science>
- Flores, B. E. (2017). *La integración de Humedales Artificiales con Muros Verdes para contribuir al cumplimiento de la norma NMX-AA-164-SCFI-2013 y el PAAS. Un sistema de tratamiento descentralizado de agua gris para la vivienda de interés social*. Nezahualcóyotl, Estado de México.
- Florian, P., & Roca, D. (2011). Sustrato para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo.
- García, V. I. (2011). *La vegetación como sistema térmico en la naturaleza extensiva de cubiertas*. Ciudad de México.
- García, V. I. (2018). *El desempeño térmico e hídrico del sustrato en los sistemas de naturaleza extensiva de cubiertas*.
- González, J. (06 de Julio de 2017). *¿Por qué siempre se inunda la Ciudad de México?* Obtenido de Nación 3 2 1: <http://www.nacion321.com/ciudadanos/por-que-siempre-se-inunda-la-ciudad-de-mexico>
- Gosálbez, C. (2012). *¿Qué es la fibra de coco?* *Planeta Huerto*.
- Green Roof Technology. (s.f.). *German FLL Guideline for Green Roofs introduced in 2002 at ASTM Subcommittee E06.71*. Obtenido de <http://www.greenrooftechnology.com/fll-green-roof-guideline>
- Green, S. (s.f.). *Urban Arbolismo*. Obtenido de Fachada vegetal. Sistemas constructivos.: <https://www.urbanarbolismo.es/blog/fachada-vegetal-sistemas-constructivos/#a>
- Green, S. (s.f.). *Urban Arbolismo*. Obtenido de Comparativa entre sistemas constructivos de jardines verticales.: <https://www.urbanarbolismo.es/blog/comparativa-entre-sistemas-constructivos-de-jardines-verticales/#celdas>
- Growing Green. (2014). *Growing Green Guide: A guide to green roofs, walls and facades in Melbourne and Victoria, Australia*. Melbourne, Australia.
- Guzman, S. (11 de Septiembre de 2017). *¿Por qué se inunda la Ciudad de México?* Obtenido de La silla rota: <https://lasillarota.com/metropoli/por-que-se-inunda-la-ciudad-de-mexico/175609>

- Hernández, R. A. (2015). *Fachada vegetal: Desarrollo de un panel prefabricado como elemento constructivo para mejorar las condiciones térmicas en edificaciones*. Ciudad de México.
- Islas Luna, M., Reyes Santiago, J., & González Zorzano, O. (s.f.). *Guía práctica de propagación y cultivo de las especies del género Echeveria*.
- López Benítez, T. (s.f.). *Jardines verticales*. Universidad Politécnica de Valencia.
- López, R. (1998). *La vegetación en el diseño de los espacios exteriores*.
- López, R. (2015). *Manual de técnicas de análisis: materiales ecológicos y constructivos*. Ciudad de México: Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, Facultad de Arquitectura UNAM.
- Manso, M., & João P. , C. (2016). Thermal analysis of a new modular system for green walls. *Journal of Building Engineering*.
- Núñez, C. (20 de Marzo de 2018). *¿Por qué se inunda tanto la Ciudad de México?* Obtenido de Noticias Televisa: <https://noticieros.televisa.com/especiales/por-que-se-inunda-ciudad-mexico/>
- Palomino, B. J. (2012). *Aplicaciones paisajísticas del género sedum para el aligeramiento de sustratos sobre azoteas verdes*.
- Riley, B. (2016). The state of art of livingwalls: Lessons learned. *Building and Environment, El Sevier*.
- Rodea, F. (11 de Agosto de 2016). *Drenaje de CDMX a punto del Colapso advierte Sacmex*. Obtenido de El financiero: <http://www.elfinanciero.com.mx/nacional/drenaje-de-la-cdmx-a-punto-de-colapso-advierte-sacmex>
- Rodríguez, G. L. (2016). *Estudio comparativo de sustratos de cultivos sostenibles en sistemas de naturación urbana: Jardinería vertical y cubierta vegetal*. Madrid.
- Sánchez, B. R. (2017). *Diseño y caracterización de espacios experimentales*.
- Sanchez, R. (2017). *Diseño y caracterización de espacios experimentales*.
- Secretaría Del Medio Ambiente. (s.f.). *Secretaría del medio ambiente. CDMX sustentable*. Obtenido de <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sedema/index.php/boletines/730-implementa-gobierno-de-la-ciudad-de-mexico-incentivo-fiscal-por-creacion-de-azoteas-verdes>
- Tamayo, J. L. (2016). *Análisis de las principales dinámicas territoriales, económicas y sociales del Distrito Federal y la ZMCM, con énfasis en sus tendencias a futuro*. Ciudad De México: Centro de investigación en Geografía y Geomática y Conacyt.