

**Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California.**



---

**Maestría en Ciencias  
en Ciencias de la Vida  
con orientación en Biología Ambiental**

---

**Comparación de plantas con diferente metabolismo en el  
desempeño térmico de techos verdes extensivos**

Tesis  
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el título de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

**Diana Verónica López Silva**

Ensenada, Baja California, México  
2020

Tesis defendida por  
**Diana Verónica López Silva**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dra. Ivett Zavala Guillén**  
Codirectora de tesis

---

**Dr. Rodrigo Méndez Alonzo**  
Codirector de tesis

Miembros del comité

**Dra. Liliana Noemí Sánchez Campos**

**Dr. Daniel Saucedo Carvajal**

**Dr. Marco Antonio de León Nava**



---

**Dra. Patricia Juárez Camacho**  
Coordinadora del Posgrado en Ciencias de la Vida

---

**Dra. Rufina Hernández Martínez**  
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Diana Verónica López Silva** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Vida con orientación en Biología Ambiental.

### **Comparación de plantas con diferente metabolismo en el desempeño térmico de techos verdes extensivos**

Resumen aprobado por:

---

**Dra. Ivett Zavala Guillén**  
Codirectora de tesis

---

**Dr. Rodrigo Méndez Alonzo**  
Codirector de tesis

Debido a los efectos negativos del cambio climático y la urbanización sobre el bienestar humano, se requiere la implementación de tecnologías sostenibles para reducir la huella ecológica de las ciudades y mejorar la calidad de vida urbana. Un ejemplo de estas tecnologías son los techos verdes, que consisten en colocar plantas y sustrato sobre el techo para lograr múltiples beneficios. Hasta el momento no existen cuantificaciones de la eficiencia térmica de esta tecnología, ni investigación sobre el empleo de materiales regionales y plantas nativas en techos verdes para las condiciones climáticas del Noroeste de México. Para cuantificar el efecto de los techos verdes sobre el amortiguamiento térmico, se construyeron e instrumentaron seis módulos experimentales en las instalaciones de CICESE con diferentes coberturas de techo: concreto sin recubrimientos, impermeabilizante reflectivo, sustrato seco, sustrato húmedo, *Sedum acre* y *Salicornia pacifica*. Las últimas dos coberturas corresponden a plantas con flor, con diferente metabolismo para la fijación del carbono: *Salicornia pacifica* es una especie  $C_3$  de humedales, que requiere de suelos permanentemente inundados y cuyas hojas transpiran durante el día. *Sedum acre* es una especie con metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM), que presenta transpiración durante la noche y es comúnmente utilizada en techos verdes. Se monitorearon los valores de temperatura del ambiente ( $T_{amb}$ ), del sustrato, de la superficie externa del techo del módulo y de la temperatura del aire al interior del módulo ( $T_{int}$ ), durante una semana con  $T_{amb}$  promedio de  $12.8^{\circ}C$  (3-10/02/2020) y otra de  $17.5^{\circ}C$  (22-29/02/2020) durante el invierno de 2020 en Ensenada, B.C., una ciudad con clima semiárido mediterráneo. En conjunto, se pudo cuantificar que las superficies cubiertas de sustrato y vegetación reducen hasta en  $12.07^{\circ}C$  la temperatura de la superficie interna de la losa y en  $9.3^{\circ}C$  la  $T_{int}$  respecto al techo de concreto sin recubrimientos, funcionando como eficientes reguladores térmicos al proveer un efecto aislante al techo. Debido a que *S. acre* no logró sobrevivir el periodo experimental, y por el contrario *S. pacifica* completó su ciclo de vida, bajo las duras condiciones ambientales que se presentan en el techo, se recomienda emplear especies nativas para minimizar el mantenimiento del techo verde, maximizar su desempeño térmico y adicionalmente proporcionar servicios ecosistémicos. Se concluyó que los sistemas de techos verdes disminuyen las fluctuaciones de temperatura del techo y del interior de los módulos, por lo que son estrategias útiles para disminuir la energía requerida para enfriar y calentar edificios en la ciudad de Ensenada y ciudades con climas semejantes. Se requiere continuar con la investigación de estos sistemas para emitir recomendaciones que maximicen los beneficios que proporcionan y promuevan su uso.

**Palabras clave:** Ecosistema mediterráneo, sustentabilidad, techos verdes, transferencia de calor.

Abstract of the thesis presented by **Diana Verónica López Silva** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Life Sciences with orientation in Environmental Biology

**A comparison of plants with different metabolism on the thermal performance of extensive Green roofs**

Abstract approved by:

---

**Dra. Ivett Zavala Guillén**  
**Codirectora de tesis**

---

**Dr. Rodrigo Méndez Alonzo**  
**Codirector de tesis**

Due to the negative effects of climate change and urbanization on human welfare, it is necessary to implement sustainable technologies to diminish the ecological footprint and to improve the quality of life within cities. An example of such technologies are green roofs, which consist of placing plants and substrate on top of roofs to achieve multiple benefits. However, there are no quantifications of the thermal efficiency of this technology, nor research on the use of regional materials and native plants in green roofs, for the climatic conditions of Northwest Mexico. To quantify how green roofs mitigate thermal variability, six experimental modules were built and instrumented on CICESE property, each module with different types of roof cover: concrete, reflective coating, dry soil, wet soil, *Sedum acre*, and *Salicornia pacifica*. These last two types of cover used flowering plants with different carbon assimilation metabolism: *Salicornia pacifica* is a wetland C<sub>3</sub> species, that transpires during the day and grows atop permanently flooded soils. *Sedum acre* is a CAM species, with transpiration during night-time and is commonly used in green roofs. Environment air ( $T_{amb}$ ), soil, upper layer of concrete and module interior air ( $T_{int}$ ) temperatures were monitored during a week where the average  $T_{amb}$  was 12.8°C (3-10/02/2020) and other one with a value of 17.5°C (22-29/02/2020) during the Winter of 2020 in Ensenada, B.C., a city with semiarid mediterranean climate. We found that vegetated covers were able to reduce the temperatures of the inner layers of roofs by up to 12.07 °C and  $T_{int}$  by 9.3 °C compared to the untreated concrete roof, working as efficient thermal regulators by providing an insulating effect to the roof. Since *S. acre* didn't survive the experimental period and *S. pacifica* completed its life cycle under the harsh conditions of the roof, the use of native species is recommended to reduce green roof, improve its thermal performance and provide ecosystem services. It was concluded that green roof systems are thus able to diminish temperature variation on the roof and interior of the experimental modules, and are useful strategies to diminish the amount of energy required to cool and warm buildings in the city of Ensenada and other cities with similar climatic conditions. Further research of these systems is needed to provide recommendations that maximize the benefits that they provide and promote their use.

**Keywords:** Green roofs, heat transfer, Mediterranean ecosystems, sustainability.

## Dedicatoria

*A mi familia,  
especialmente a Eric,  
Emma, Samantha y Lucía.*

## Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), al Posgrado en Ciencias de la Vida y al Departamento de Biología de la Conservación, por permitirme formar parte de esta institución y otorgarme una educación integral de alto nivel.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por su apoyo económico durante mi maestría (número de becario 724899).

Al proyecto CONACyT: “Ecofisiología y ecología funcional de plantas de ambientes estresados” (681117) otorgado al Dr. Rodrigo Méndez Alonzo.

A mi director de tesis, el Dr. Rodrigo Méndez Alonzo por darme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto, por sus ideas, su asesoría, su paciencia, sus consejos, su guía y su gran apoyo, por ser un excelente mentor y persona.

A mi directora de tesis, la Dra. Ivett Zavala Guillén por su asesoría, su paciencia, sus enseñanzas, su dedicación, sus consejos, su guía y gran apoyo, por estar siempre al pendiente y disponible en todas las etapas del proyecto.

A los integrantes de mi comité, el Dr. Daniel Saucedo Carvajal por sus enseñanzas sobre transferencia de calor, su apoyo, sus comentarios y observaciones, a la Dra. Liliana Noemí Sánchez Campos por su gran apoyo y ánimos durante mi estancia en CICESE, y al Dr. Marco Antonio de León Nava por sus observaciones, paciencia y su apoyo.

Al equipo técnico del Departamento de Biología de la Conservación, el Oc. Eulogio López Reyes por su apoyo en la construcción y monitoreo térmico de los módulos experimentales y el Biol. Jesús Mario Salazar Ceseña, por su apoyo en la construcción de los módulos, las salidas por las plantas, el monitoreo del estado de las plantas, por compartir su experiencia, por sus consejos y seguimiento al proyecto.

Al personal del departamento de Obras y Mantenimiento de CICESE, en especial a Carlos Aguiñaga de León y su equipo de trabajo (David, Salvador y los demás) por su disponibilidad y apoyo en la instalación y construcción de los módulos experimentales.

A mi esposo, M. C. Eric Sigala Meza por su invaluable apoyo en todas las etapas del proyecto y nuestra vida, por sus comentarios y contribuciones, su tiempo, su dedicación y su amor incondicional.

A Joselito Pérez Murrieta, por su apoyo en la construcción de los módulos, el armado e instalación de sensores y la extracción de datos, por su disponibilidad y atención.

Al técnico del Departamento de Oceanografía Física, Santiago Higareda Cervera por proporcionarnos los datos de la estación meteorológica del CICESE.

A mis suegros, Ernestina Meza y Jesús Sigala por su gran apoyo en diferentes etapas del proyecto, por sus ánimos y su cariño.

Al M. C. Ramiro Santos por su apoyo en la construcción de los módulos y la salida por las plantas.

A la Dra. Coral Moctezuma por su atención, su amabilidad y su apoyo académico y personal.

A Elizabeth Avilés Becerril por su apoyo en la pronta revisión del documento de tesis.

Al personal docente, administrativo y técnico del posgrado, la Dra. María Clara, el Dr. Bullock, la Dra. Sara Ceccarelli, Eva Robles, Linda Lomelí, Yadira Romero, Lupita Ruiz y todas las demás personas que tuve la dicha de conocer, por sus enseñanzas, sus observaciones, sus consejos y su apoyo académico y personal.

A mis compañeros en CICESE, Carlo Germán, Moisés Montes, Rocío Osorio, Samantha Díaz de León, Ariadna Juárez, Monserrat Rentería, Alberto López, Carmen Delgado, Ketzaly Munguía, Anela Sánchez, Carolina Medina, Víctor Aguilera, Sarahí Martínez, Cindy Manríquez, Jimena Rábago, Diego González, Tonancy Rodríguez, Juan Ramos, Celeste Cervantes, Luis Duarte, Misael Acosta, Farid Zavala, y demás personas que afortunadamente formaron parte de mi experiencia en CICESE, por su convivencia y apoyo académico y personal.

A mis amigas Delia Pérez, Adriana Romero y Andrea España, por estar al pendiente siempre y por su gran aliento.

A mis padres Verónica Silva y Marco López, a mis hermanas y hermano, Cecilia, Sandra y Marco, y a mis abuelos Estela, Benito, Emilia y José, porque aun estando lejos, siempre me han apoyado y alentado, y por su gran amor.

Y muy especialmente a mis hijas, Emma, Samantha y Lucía, por su paciencia, por su gran amor y por alegrar mi vida.

## Tabla de contenido

---

Resumen en español .....	i
Resumen en inglés .....	ii
Dedicatoria .....	iii
Agradecimientos .....	iv
Lista de figuras .....	viii
Lista de tablas.....	x
Capítulo 1. Introducción.....	1
Capítulo 2. Marco teórico .....	4
2.1 Los sistemas de techos verdes .....	4
2.2 Investigación sobre techos verdes .....	8
2.3 Techos estanque .....	10
2.4 Metabolismo vegetal.....	11
2.5 Conceptos básicos de transferencia de calor.....	14
2.5.1 Transferencia de calor entre las plantas y el ambiente .....	17
2.5.2 Control de intercambios de energía entre las plantas y el ambiente .....	21
2.6 Confort térmico .....	22
2.7 Justificación .....	23
2.8 Hipótesis.....	24
2.9 Objetivos .....	24
2.9.1 Objetivo general.....	24
2.9.2 Objetivos específicos.....	24
Capítulo 3. Materiales y métodos .....	25
3.1 Sitio de estudio.....	25
3.2 Diseño experimental .....	25
3.2.1 Descripción de los módulos experimentales.....	25
3.2.2 Instrumentación y monitoreo .....	26
3.2.3 Tratamientos .....	27
3.2.4 Descripción de las especies de plantas seleccionadas .....	28
3.2.5 Descripción de los techos verdes .....	29
3.2.6 Procesos de transferencia de calor en los techos .....	32
3.2.7 Variables analizadas .....	35
3.2.7.1 Variables biológicas.....	35
3.2.7.2 Variables de transferencia de calor (variables térmicas) .....	35
Capítulo 4. Resultados y discusión .....	37

4.1 Variables biológicas.....	37
4.1.1 Altura de plantas .....	37
4.1.2 Cobertura .....	39
4.1.3 Biomasa .....	41
4.1.4 Densidad volumétrica del sustrato .....	42
4.2 Variables térmicas.....	44
4.2.1 Semana fría.....	44
4.2.1.1 Comportamiento térmico .....	44
4.2.1.2 Flujos de calor y cargas térmicas.....	49
4.2.1.3 Efecto de las plantas sobre el techo.....	53
4.2.2 Semana cálida (22 al 29 de febrero del 2020).....	58
4.2.2.1 Comportamiento térmico .....	59
4.2.2.2 Flujos de calor y cargas térmicas.....	62
4.2.2.3 Efecto de las plantas sobre el techo.....	65
Capítulo 5. Conclusiones .....	70
Literatura citada.....	73
Anexos.....	81

## Lista de figuras

Figura	Página
1 Comparación de rutas de fijación de carbono en plantas.....	13
2 Módulos experimentales y sus dimensiones, (a) el interior del módulo y (b) el costado.....	26
3 Diagrama de las termopilas en la placa de concreto.....	27
4 <i>Sedum acre</i> (a) y <i>Salicornia pacifica</i> (b).....	29
5 Diagrama de los componentes de un techo verde con sustrato seco y <i>Sedum acre</i> (a) y un techo verde con sustrato húmedo y <i>Salicornia pacifica</i> (b).....	30
6 Diagrama de los módulos con techos verdes con sustrato seco y <i>Sedum acre</i> (a) y con sustrato húmedo y <i>Salicornia pacifica</i> (b).....	31
7 Diagrama con el balance de energía en un techo sin recubrimientos.....	33
8 Diagrama con el balance de energía en un techo verde.....	34
9 Plagas en el techo con <i>S. acre</i> (TSe), a) Mosca del sustrato (Sciaridae) y b) <i>Planococcus citri</i> .....	39
10 Cobertura de <i>S. acre</i> (izq) y <i>S. pacifica</i> (der) al inicio (a, b), a la mitad (c, d) y al final (e, f) del periodo experimental.....	40
11 Los techos TSa (a) y TSe (b) durante la semana fría.....	45
12 Comparación de $T_{s,int}$ , $T_{int}$ , $T_{amb}$ , G y V entre tratamientos durante la semana más fría.....	47
13 Comparación de temperaturas ( $T_{amb}$ , $T_{s,ext}$ , $T_{s,int}$ , $T_{int}$ ) durante la noche anterior al día más frío (12:00 a 00:00 h), el día más frío (00:00 a 00:00 h) y la noche posterior (00:00 a 12:00 h), para los módulos con a) TSa, b) TC y c) TSe.....	48
14 Comportamiento del flujo de calor por unidad de área para todos los techos estudiados.....	50
15 Comparación entre las $T_{s,int}$ , $T_{int}$ y la $T_s$ de los techos TH y TSa en la semana más fría.....	55
16 Comparación entre las $T_{s,int}$ , $T_{int}$ y la $T_s$ de los techos TS y TSe en la semana más fría.....	56
17 Comparación entre $T_{s,int}$ , $T_{int}$ y la $T_s$ de los techos TSa, TC y TSe en la semana más fría.....	58
18 Los techos TSa (a) y TSe (b) durante la semana cálida.....	58
19 Comparación de $T_{s,int}$ , $T_{int}$ , $T_{amb}$ , G y V entre tratamientos durante la semana más cálida.....	60
20 Comparación de temperaturas ( $T_{amb}$ , $T_{s,ext}$ , $T_{s,int}$ , $T_{int}$ ) durante la noche anterior al día más cálido (12:00 a 00:00 h), el día más cálido (00:00 a 00:00 h) y la noche posterior (00:00 a 12:00 h), para los módulos con a) TSa, b) TC y c) TSe.....	61

21	Comportamiento del flujo de calor unidad de área para todos los techos estudiados.	63
22	Comparación entre las $T_{s,int}$ , $T_{int}$ y la $T_s$ de los techos TH y TSa en la semana más cálida.....	66
23	Comparación entre las $T_{s,int}$ , $T_{int}$ y la $T_s$ de los techos TS y TSe en la semana más cálida.....	67
24	Comparación entre $T_{s,int}$ , $T_{int}$ y la $T_s$ de los techos TSa, TC y TSe en la semana más cálida.....	69
25	El espectro solar y su relación con el espectro de absorción de clorofila.....	81
26	Propiedades espectrales de una hoja típica en las longitudes de onda visibles y cerca del infrarrojo.....	82
27	Comparación de los intercambios energéticos de un techo verde seco o húmedo con un techo tradicional, comenzando con 100 unidades de radiación solar incidente en verano.....	82

## Lista de tablas

Tabla		Página
1	Clasificación de techos verdes con factores de construcción y requerimientos de mantenimiento. Adaptado de Raji <i>et al.</i> (2015).....	6
2	Datos de $T_{amb}$ , radiación solar (Q), velocidad del viento (V) y lluvia de la estación meteorológica del CICESE durante el periodo de monitoreo de los techos verdes.....	25
3	Propiedades térmicas de los principales materiales que componen los módulos experimentales.....	26
4	Costo de los materiales de los techos verdes. La cantidad indicada como sin plantas incluye la barrera a prueba de agua y raíces, sustrato y capa de polietileno negro (roof pond) o capa de drenaje + filtro de tela (techo verde); la cantidad indicada como con plantas representa el costo total del sistema por $m^2$ .....	30
5	Alturas máximas y mínimas de las plantas por especie, en 3 meses del periodo experimental.....	38
6	Porcentaje de cobertura mensual de <i>S. acre</i> y <i>S. pacifica</i> .....	40
7	Biomasa aérea, subterránea y total por especie.....	42
8	Densidad volumétrica del suelo ( $g/cm^3$ ) en los techos verdes con tierra seca (TS), tierra húmeda (TH), <i>Salicornia pacifica</i> (TSa) y <i>Sedum acre</i> (TSe).....	44
9	Cargas térmicas ( $KW h/m^2$ ) de los 6 tratamientos en el día más frío.....	52
10	Cargas térmicas ( $KW h/m^2$ ) de los 6 tratamientos durante la semana más fría.....	53
11	Cargas térmicas ( $KW h/m^2$ ) por hora de los 6 tratamientos en el día más cálido.....	64
12	Cargas térmicas ( $KW h/m^2$ ) de los 6 tratamientos durante la semana cálida.....	65

## Capítulo 1. Introducción

---

El rápido crecimiento urbano en las ciudades se ha convertido en una preocupación, pues contribuye al cambio climático (Azeñas *et al.*, 2018) y tiene un importante efecto negativo en el ambiente en cuanto a la isla urbana de calor, el agotamiento de recursos, y la contaminación del aire y agua (Raji *et al.*, 2015). Las edificaciones son el sector económico que consume la mayor cantidad de energía en el mundo, utilizando el 50% de la energía primaria y de la electricidad global y generando un tercio de las emisiones de CO<sub>2</sub> del planeta (Xamán *et al.*, 2017). Además, las personas pasan el 90% de su vida en interiores, por lo que no es sorprendente que la mayor cantidad de energía consumida en edificaciones se atribuye a calefacción, enfriamiento y ventilación (Sharifi & Yamagata, 2015).

Un fenómeno importante que se presenta en las ciudades es la isla urbana de calor, en la cual la temperatura urbana es entre 1 y 10°C más alta comparada con los alrededores, debido, entre otras causas, a la reducción de las áreas verdes (menor dosel de árboles y transpiración) (Vijayaraghavan, 2016) y a los materiales de construcción con mayor capacidad de almacenamiento de calor y menor albedo (reflejo de la radiación) (Saadatian *et al.*, 2013).

Este fenómeno ocasiona que la radiación solar quede atrapada en las ciudades por la reducción de las superficies reflectantes y la presencia de contaminantes como CO<sub>2</sub>, partículas, aerosoles, etcétera, en la atmósfera, incrementando así la temperatura de las áreas urbanas (Kenai, *et al.*, 2017); además de que tiene efectos negativos en la salud humana, el confort al exterior, el consumo energético en interiores y amplifica los problemas por contaminación (Moonen *et al.*, 2012; Santamouris, 2014; Tan *et al.*, 2017). Según el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2017), las alteraciones climáticas derivadas de la actividad humana amplificarán progresivamente los problemas en la isla urbana, pues se espera que las temperaturas incrementen de 0.1 a 0.4°C por década a escala global, hecho que indica la necesidad de buscar estrategias más sustentables de mitigación de los problemas ambientales urbanos (Van Mechelen, 2015; Bevilacqua *et al.*, 2016).

En la actualidad, los techos verdes (vegetados, eco o vivos) representan un sistema de construcción que puede incrementar la sustentabilidad de edificios y ciudades (Oberndorfer *et al.*, 2007; Berardi *et al.*, 2014; Bevilacqua *et al.*, 2016). Estos sistemas consisten en plantar la superficie del techo con vegetación sobre un medio de crecimiento o sustrato (Vijayaraghavan, 2016), disminuyendo la energía consumida por las construcciones además de proveer servicios ecosistémicos (Lundholm *et al.*, 2010). La implementación de techos verdes es una posible solución para mitigar los efectos de la urbanización,

porque los techos constituyen el 20-25% de las superficies urbanas (Yaghoobian & Srebric, 2015), representan el elemento de recubrimiento más expuesto a la radiación solar directa y son responsables de hasta el 50% de la carga térmica en edificaciones (Sharifi & Yamagata, 2015).

La evaluación de la eficiencia térmica de los techos verdes en los edificios requiere el estudio de los procesos de transferencia de calor y la fisiología de las plantas (Jaffal *et al.*, 2012). En un techo verde, las plantas representan el elemento necesario para llevar a cabo el sombreado radiativo y la transpiración, que es crucial para el efecto de enfriamiento en verano, y proveen un efecto aislante en invierno (Castleton *et al.*, 2010), también pueden actuar como una fuente de calor, liberándolo hacia el ambiente durante la tarde y noche (He *et al.*, 2016).

Debido a que el bienestar de las plantas determina el buen funcionamiento de cualquier techo verde (Vijayaraghavan, 2016), los techos verdes extensivos típicamente están equipados con especies autosostenibles y nativas que requieren poca irrigación y están bien adaptadas a las condiciones climáticas locales (Bevilacqua *et al.*, 2016). El tipo de plantas más popular en los techos verdes son las suculentas como *Sedum spp.* por su habilidad de limitar la transpiración y almacenar agua para sobrevivir condiciones de sequía debido a su tipo de metabolismo CAM (“crassulacean acid metabolism”), que les permite incrementar la eficiencia del uso del agua al abrir sus estomas y almacenar CO<sub>2</sub> durante la noche, cuando la tasa evaporativa es menor que durante el día (Vijayaraghavan, 2016). En contraste, existen plantas que también presentan suculencia (habilidad de almacenar agua en tallos y hojas) y cuentan con metabolismo C<sub>3</sub> como *Salicornia pacifica*, por lo que llevan a cabo la transpiración a una tasa alta durante el día, con implicaciones en la transferencia de calor entre la planta y el ambiente (Raschke, 1960).

Vijayaraghvan (2016) menciona que existen ciertos obstáculos para la implementación de techos verdes, sobre todo en países en desarrollo debido a que los tomadores de decisiones aún no comprenden los aspectos positivos de los techos verdes para promover su instalación y hay escasez en investigación local. Sin apoyo del gobierno o regulaciones, la justificación de los techos verdes al público en general es un proceso tedioso. Y como resultado de la escasez de investigación, se desconocen componentes apropiados para las localidades geográficas por lo que la importación de materiales lleva a un alto costo y posibles problemas de incompatibilidad en la instalación de techos verdes, suponiendo un obstáculo adicional.

Considerando que cada país tiene diferentes condiciones climáticas y formas de urbanización, la investigación local es de gran importancia para el éxito de los techos verdes, especialmente en cuanto al

uso de materiales disponibles en la región y la búsqueda de plantas nativas. El aprovechamiento de estas características sumado a la promoción de los techos verdes por los tomadores de decisiones mediante incentivos y regulaciones permitirá un mejor entendimiento de esta tecnología (Vijayaraghvan, 2016).

Si se busca crear un ambiente urbano sustentable, se debe reducir el impacto de las ciudades en los ecosistemas y sus servicios ecosistémicos, pues éstos tienen impacto sobre el bienestar humano (Van Mechelen, 2015) y el ambiente en general (Wong y Jusuf, 2008). La Organización de las Naciones Unidas (ONU) aprobó la agenda 2030 de Desarrollo Sostenible que contiene 17 metas para afrontar los retos globales actuales de degradación ambiental, clima, prosperidad, entre otros (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>). Este trabajo se relaciona con los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) 7, 9, 11 y 12 porque es una contribución para disminuir la huella ecológica de las ciudades y proveer herramientas para combatir la isla urbana de calor. El ODS 7, energía limpia y asequible, aborda temas como la eficiencia energética y el uso de energías renovables. El ODS 9, industrias, innovación e infraestructura, aborda temas como la inversión en energía e irrigación y el progreso tecnológico para el incremento en la eficiencia energética. El ODS 11, ciudades y comunidades sostenibles, aborda temas de planeación urbana y prácticas de manejo eficientes para lidiar con los efectos de la urbanización, incluyendo las emisiones de dióxido de carbono por consumo energético. Finalmente, el ODS 12, Consumo y producción responsables, se relaciona con la promoción de la eficiencia energética y de producción, y la mejora de la calidad de vida de las personas, así como la reducción de costos ambientales incluyendo la contaminación del aire.

Este trabajo propone la evaluación de la eficiencia térmica de los techos verdes en el clima particular de Ensenada, Baja California, considerando el metabolismo de las plantas como un factor importante en la transferencia de calor en las edificaciones; constituye una contribución para la implementación de techos verdes, la promoción de un uso sustentable de estos elementos urbanos y del escaso recurso hídrico en regiones semiáridas, y también para la reducción del consumo energético y la huella ecológica de los edificios.

## Capítulo 2. Marco teórico

---

### 2.1 Los sistemas de techos verdes

La tecnología de techos verdes es antigua. Anteriormente se construían jardines en los techos para proveer aislamiento y protección. Uno de los techos verdes antiguos más famosos son los jardines colgantes de Babilonia, construidos cerca del 500 a.C. (Shafique *et al.*, 2018). Se sabe que la ciudad romana de Pompeya tenía terrazas elevadas donde crecían plantas, y la ciudad egipcia medieval de Fustat tenía edificios elevados con jardines de techo en la cima (Dieleman, 2017). Además, en lugares como Suecia, Finlandia, Islandia, Dinamarca, Noruega, Groenlandia, Vinlandia e Islas Feroe, los techos se cubrían con césped durante condiciones climáticas extremas (Shafique *et al.*, 2018).

Los techos verdes modernos iniciaron en Alemania a finales de 1950, con la finalidad de reducir el consumo de energía en los edificios por el surgimiento de crisis energéticas. Y en 1982 la Sociedad Alemana de Paisaje, Desarrollo de Investigación y Construcción publicó los primeros lineamientos sobre el uso de techos verdes (FLL, 2018) y actualmente son considerados líderes mundiales en techos verdes, por el establecimiento de lineamientos y políticas ambientales (Oberndorfer *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2019). A principios de 1980, el mercado de techos verdes se expandió mundialmente y adquirió popularidad (Van Mechelen *et al.*, 2015a; Shafique *et al.*, 2018). Actualmente, países como Estados Unidos de América, Canadá, Singapur, Australia, Japón, China y Corea del Sur están haciendo fuertes iniciativas para la aplicación de techos verdes en edificios nuevos y existentes (Shafique *et al.*, 2018).

Históricamente, se ha asociado a los techos verdes con la mejora del aislamiento de los edificios en climas fríos y con el manejo de agua de lluvia (Bevilacqua *et al.*, 2016). Sin embargo, existen otros beneficios (independientes del clima) asociados a los techos verdes, como la regulación de la temperatura por la vegetación y el sustrato, y por tanto, regulación del clima (Jaffal *et al.*, 2012; Cardinale, *et al.*, 2012) debido a la evapotranspiración y mayor albedo (Dimoudi y Nikolopoulou, 2003; Lundholm *et al.*, 2010; Saadatian *et al.*, 2013), que a su vez contribuye a mitigar los efectos de la isla urbana de calor (Takebayashi & Moriyama, 2007; Jaffal *et al.*, 2012; Santamouris, 2014). La vegetación mejora la calidad del aire y reduce las reacciones fotoquímicas que producen contaminantes como el ozono, disminuyendo las demandas en calefacción y enfriamiento por el menor uso de aire acondicionado (Rowe, 2011).

Además los techos verdes proveen hábitat para flora y fauna local y promueven los procesos de polinización (Colla *et al.*, 2009), por ejemplo, Brenneisen (2006) reporta que los techos verdes de la planta de agua Wollishofen en Suiza, son refugio para 175 especies de plantas, entre ellas algunas amenazadas,

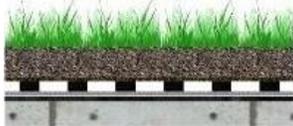
y Madre *et al.* (2013) evaluaron la presencia de artrópodos en techos verdes de Francia y encontraron una relación entre la presencia de especies raras con el nivel de complejidad estructural de la vegetación. Los techos verdes también proveen servicios culturales determinados por su valor estético y de comodidad (Dakin *et al.*, 2013); promueven actividades recreativas y crean oportunidades para agricultura urbana (Shafique *et al.*, 2018), p. ej. Whittinghill *et al.* (2013) cultivaron tomate, ejote, pepino, cebollín y albahaca en un techo verde extensivo en Michigan, EUA. Además, Ackerman *et al.* (2014) resaltan la importancia de la agricultura urbana en techos en relación con la seguridad alimentaria y sustentabilidad en las ciudades.

Así mismo los techos verdes duplican la vida de la membrana del techo al disminuir las fluctuaciones de temperatura y protegerlo de las condiciones ambientales como la radiación ultravioleta (Fioretti *et al.*, 2010; Saadatian *et al.*, 2013); reducen la contaminación por ruido en los edificios (Rowe, 2011) e incrementan el valor de las propiedades (Castleton *et al.*, 2010), además de que el periodo de recuperación de la inversión es corto comparado con su vida útil, p. ej. Cascone *et al.* (2018) reportan un periodo de 13-18 años de recuperación de la inversión y 50 años de vida útil y Ávila-Hernández *et al.* (2020) reportan un periodo de recuperación de la inversión de 8.8 años.

Existen tres categorías de techos verdes de acuerdo con la profundidad del sustrato y el nivel de mantenimiento requerido, estos son: extensivos, semi-intensivos e intensivos (Bevilacqua *et al.*, 2016). Los techos verdes extensivos se caracterizan por poseer un sustrato ligero de profundidad reducida (<12 cm), requieren poco mantenimiento y son diseñados para ser autosostenibles a lo largo del tiempo, este tipo de techos son los más tradicionales y son los de interés en este trabajo; mientras que los intensivos (también llamados jardines de techo) poseen un sustrato pesado y profundo (>20 cm), y requieren mucho mantenimiento (Van Mechelen, 2015); los semi-intensivos se encuentran entre las dos categorías mencionadas anteriormente (Tabla 1).

En general, las capas que constituyen los techos verdes son: barrera antiraíces y barrera a prueba de agua (a menudo combinadas en una sola capa), drenaje y almacenamiento, filtro de tela, y sustrato con vegetación (Theodosiou, 2009; Bevilacqua *et al.*, 2015), aunque la composición de los techos verdes no está estandarizada y existe una amplia variación en el diseño de los techos verdes, dependiendo de la elección de materiales usados en el sustrato, la capa de drenaje y la composición de plantas, así como en el grosor de los diferentes componentes; cada uno de estos componentes tiene un efecto en la habilidad de los techos verdes de proveer beneficios térmicos. Cabe mencionar que las características hidrológicas (sustrato y drenaje) de los techos verdes son un aspecto crítico de su diseño, porque influyen en el balance de energía del techo y son afectadas por la porosidad y profundidad del sustrato.

**Tabla 1.** Clasificación de techos verdes con factores de construcción y requerimientos de mantenimiento. Adaptado de Raji *et al.* (2015).

			
	Techo verde Extensivo	Techo verde Semi-intensivo	Techo verde Intensivo
<b>Mantenimiento</b>	Bajo	Periódicamente	Alto
<b>Irrigación</b>	No	Periódicamente	Regularmente
<b>Comunidades de plantas</b>	Musgos - <i>Sedum</i> - herbáceas y pastos	Pastos - herbáceas y arbustos	Césped o perenes, arbustos y árboles
<b>Altura total del sistema</b>	60 - 200 mm	120 - 250 mm	150 - 400 mm
<b>Peso</b>	60 - 150 kg/m <sup>2</sup>	120 - 200 kg/m <sup>2</sup>	180 - 500 kg/m <sup>2</sup>
<b>Costos</b>	Bajo	Medio	Alto
<b>Uso</b>	Capa protectora ecológica	Techo verde diseñado	Jardín tipo parque

En cuanto a los efectos de la composición de plantas en un techo, estos son el sombreado y la evapotranspiración, que es el proceso combinado de la evaporación de agua del sustrato y la transpiración de las plantas, este último depende de las características del sustrato, el contenido de agua y el tipo de plantas usadas. Los tipos de plantas afectan la evapotranspiración por sus rasgos fisiológicos inherentes, por ejemplo, entre plantas con fotosíntesis tipo CAM y otros tipos de plantas (ver sección 2.4) (Tan *et al.*, 2017). Así mismo, la selección de la vegetación para techos verdes se basa en dos enfoques principalmente: de acuerdo con las características fisiológicas y morfológicas (uso de agua, tasa de transpiración o succulencia) (Rayner *et al.*, 2016), o en la similitud de las características de los hábitats naturales y las condiciones en los techos verdes (suelos poco profundos, con bajo contenido de nutrientes y agua limitada) (Farell, 2013). Además de que muchas veces las plantas en un techo verde (en especial en

los de tipo extensivo) se seleccionan por su potencial para sobrevivir con poca o nula irrigación y no por su habilidad de proveer servicios ecosistémicos (por ejemplo, almacenamiento de carbono, limpieza del agua y aire, etc.), y en consecuencia muchos techos verdes existentes tienen un desempeño deficiente en cuanto al aislamiento en contra de la radiación solar y reduciendo las temperaturas en los edificios (Monteiro *et al.*, 2017).

En cuanto al mantenimiento de los techos verdes extensivos, sobre todo en climas semiáridos, el riego es un aspecto importante debido a que se ha reportado que la humedad del sustrato tiene efectos positivos en la evapotranspiración y mitigación del efecto de isla urbana de calor (Santamouris, 2014; Cascone *et al.*, 2019). En general, los techos verdes extensivos se diseñan para que la precipitación sea suficiente para asegurar la supervivencia de las plantas, sin embargo, en regiones semiáridas, el agua es un recurso limitado; así mismo, las duras condiciones ambientales en techos verdes extensivos constituyen un reto para el desarrollo de la vegetación, especialmente en verano cuando se presentan temperaturas altas y el agua es escasa. Algunos autores han sugerido irrigación adicional durante el establecimiento de las plantas para garantizar su desarrollo y supervivencia, mencionando que la irrigación permanente no es necesaria si el techo verde se diseña apropiadamente en cuanto a la selección de plantas, tipo de sustrato y su profundidad, y si hay suficiente precipitación (Getter & Rowe, 2006; Nagase & Dunnett, 2010; Van Mechelen *et al.*, 2015b).

Por otra parte, el monitoreo de los techos verdes extensivos consiste en una inspección anual (Van Mechelen *et al.*, 2015b), donde se comprueba el buen estado de la capa de drenaje, del sustrato y las plantas. Si la instalación del techo verde se realiza correctamente, no deberá haber problemas por filtraciones (Shafique *et al.*, 2018).

Finalmente, existen algunas desventajas asociadas al uso de techos verdes, como son: el impacto ecológico de la capa de retención de agua, el drenaje y el sustrato, p. ej. la lana mineral de roca, el plástico virgen y la arcilla expandida tienen un impacto ecológico alto de acuerdo con Chenani *et al.*, 2015; la falta de incentivos y regulaciones para la investigación e instalación de techos verdes, sin lo cual las dudas respecto a estos sistemas no serán aclaradas (p. ej. la cuantificación de los beneficios ambientales) y la promoción de estos sistemas es obstaculizada (Vijayaraghvan, 2016); y los costos de instalación y mantenimiento (Castleton *et al.*, 2010), que de acuerdo con Garrison *et al.* (2012) son US \$53.8-215.2/m<sup>2</sup> para la instalación y US \$2.2-13.45/m<sup>2</sup>/año para el mantenimiento, sin embargo, Clark *et al.* (2008) reportan que al final de la vida útil de un techo verde (considerado en 40 años), el valor actual neto es 20.3- 25.2% mayor que un techo convencional, y este valor aumenta al considerar la mejoría en calidad del aire.

## 2.2 Investigación sobre techos verdes

Las diferentes condiciones climáticas y formas de urbanización en las ciudades representan dos factores importantes en el estudio de los techos verdes, de modo que el propósito para el empleo de esta tecnología (aislamiento, regulación de la temperatura, combatir la isla urbana de calor, etc.) así como su configuración, varían de acuerdo con estos dos factores. En países donde la sequía condiciona la aplicación de techos verdes y sus componentes, se requiere consideración especial, pues se debe hacer una selección de plantas que no requieran riego y mejoren la calidad del agua. Algunos países están aplicando techos verdes para mejorar la calidad del agua y reducir la temperatura, e incluso con propósitos de irrigación (Shafique *et al.*, 2018). Múltiples estudios sustentan los efectos de los techos verdes en la reducción de temperatura superficial (Yan, 2011) por ejemplo Karteris *et al.* (2016) revelaron una reducción en el consumo en calefacción y aire acondicionado del 5% y 16%, respectivamente; efectos en el confort térmico en diferentes estaciones del año (He *et al.*, 2017; Morakinyo, *et al.*, 2017; Yeom & LaRoche, 2017); así como la reducción de los costos energéticos (Yan, 2011; Getter *et al.*, 2011) y reducción del efecto de la isla urbana de calor (Carter y Jackson, 2007; Palla *et al.*, 2010) encontrándose un mayor impacto en los climas más cálidos y secos (Alexandri y Jones, 2008).

Existen varios reportes en climas semiáridos o clima mediterráneo, entre ellos, Fioretti *et al.* (2010) evaluaron el desempeño térmico e hídrico de dos techos verdes a escala completa durante el verano, y encontraron que los techos verdes reducen la carga térmica de enfriamiento entre 6 y 49% en todo el edificio, y para el último piso entre 12 y 87%, dependiendo de las condiciones climáticas, la ocupación y las características del edificio. Mencionan que la influencia del sistema de techos verdes en la carga térmica de calefacción es baja, debido a que el comportamiento en el invierno es escasamente afectado. Olivieri *et al.* (2013) analizaron el comportamiento térmico de un techo verde durante el verano de 2010-2012 en una zona costera de Italia para evaluar el efecto de la densidad de la vegetación en el desempeño térmico, y concluyeron que una alta densidad de vegetación reduce la ganancia térmica en un 60% cuando el techo está altamente aislado. Bevilacqua *et al.* (2016) analizaron el desempeño térmico de un techo verde extensivo en Italia, y reportaron una reducción de temperatura en la interfaz con el techo estructural de 12°C en verano y aumento de 4°C en invierno, y una reducción de la energía térmica entrando al ambiente interior del 100% en verano y entre el 30 y 37% en invierno.

En adición a lo anterior, Garrison *et al.* (2012) en un reporte del Consejo de Defensa de Recursos Naturales (NRDC) mencionan que la instalación de techos verdes en el 50% de los techos en el sur de California resultaría en ahorros directos por enfriamiento de 1.6 millones MWh por año, equivalente a

USD \$211 millones en electricidad, además de disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> en hasta 465 mil Mt anualmente, y una reducción de más de 36 mil millones de galones de agua de escorrentía por año. Así mismo, mencionan que aproximadamente 1,000 personas mueren en Estados Unidos por eventos de calor extremos cada año y que, por cada incremento de 10°F, la mortalidad incrementó 4.3% en Los Ángeles y 11.4% en San Bernardino. De modo que los sistemas de techos verdes constituyen un elemento urbano de relevancia ecológica, económica y social.

Sin embargo, la mayor cantidad de investigaciones en techos verdes y sustrato, se han realizado por países Escandinavos y no son aplicables a regiones con otros tipos de clima (Razzaghmanesh *et al.*, 2014), en regiones con climas áridos y cálidos la investigación es mucho menor, debido a que es un reto aplicar el conocimiento acumulado a la construcción de techos verdes en regiones secas, aunque parece que los beneficios térmicos en cuanto a enfriamiento son mayores en este tipo de climas (Jaffal *et al.*, 2012; Ávila- Hernández *et al.*, 2020). Además, Blank *et al.* (2013) identificaron un total de 31 países con publicaciones sobre techos verdes, de los cuales, el 66% de las contribuciones pertenecían a la Unión Europea y Estados Unidos, mientras que el 20% a países asiáticos, predominantemente en ecosistemas templados; cabe mencionar que México no aparece entre estos países (hasta la fecha de publicación de este artículo). Además, la variación de la demanda energética de los edificios y las condiciones dentro del mismo dependen de múltiples factores, como el aislamiento del techo, el clima y la configuración del techo verde (Jaffal *et al.*, 2012), por lo que se requiere mayor investigación de estos factores y de diseños nuevos, de bajo costo e innovadores, que puedan proveer múltiples beneficios a gran escala.

En México, las publicaciones sobre techos verdes son escasas y recientes, aunque con resultados prometedores, ya que los reportes de desempeño térmico de techos verdes redujeron la temperatura del techo en comparación con techos de concreto convencionales en temporadas cálidas. Ordóñez-López y Pérez-Sánchez (2015) hicieron un estudio experimental de casi 3 años donde compararon un techo blanco reflectivo y un techo verde, donde el techo verde permaneció como un mecanismo efectivo en la reducción de la temperatura en Yucatán, México y no presenta efectos de degradación natural por el ambiente comparado con el techo blanco. Chagolla-Aranda *et al.* (2017), hicieron un estudio experimental de 8 días donde reportaron la disminución de 20.5% en la temperatura y 10.3% en consumo eléctrico en una celda experimental de un techo verde comparado con techo de concreto, en Cuernavaca, México. Ávila-Hernández *et al.* (2020) llevaron a cabo simulaciones con el software EnergyPlus donde compararon un techo tradicional y un techo verde extensivo bajo las condiciones climáticas de 8 ciudades. Los resultados mostraron que, en lugares con clima cálido, el techo verde redujo la temperatura del interior de la casa hasta 4.7°C; y en climas templados el techo verde redujo la demanda de enfriamiento hasta 99%

pero también incrementó la demanda de calefacción en 25%. Además, encontraron que el techo verde redujo el CO<sub>2</sub> en 45.7%.

En adición a estos tres reportes, en México existe la Ley General de Cambio Climático (Diario Oficial de la Federación, 2018), que garantiza el derecho a un medio ambiente sano mediante la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación y mitigación al cambio climático, además de algunas normas orientadas al uso eficiente de energía en los edificios: la Nom-008-ENER-200 de eficiencia energética en cubiertas de edificios no residenciales, la NOM-020-ENER-2011 de eficiencia energética en cubiertas de uso residencial, la NOM-018-ENER-2011 de aislantes térmicos para edificaciones, y la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-03-RNAT-2007 (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2008) que establece especificaciones para la instalación de zonas verdes en azoteas y un incentivo fiscal del 10% en el pago del predial en la ciudad de México.

### 2.3 Techos estanque

Un *roof pond* (“estanque de techo o techo estanque”) es una técnica de enfriamiento pasivo basado en el uso de agua como una masa térmica ideal debido a su alta capacidad calorífica volumétrica y a que es barata, no tóxica y ampliamente distribuida (Spanaki, 2007; Sharifi & Yamagata, 2015). Los beneficios de enfriamiento de los *roof ponds* se consiguen a través de enfriamiento evaporativo y/o enfriamiento radiativo, donde el techo funciona como un sumidero de calor que absorbe el calor dentro de la edificación y el calor del ambiente exterior, y el espacio interior se enfría por radiación y convección (Sharifi & Yamagata, 2015).

En general, un *roof pond* se cubre durante el día para evitar el calentamiento y se abre durante la noche para enfriarse (su desempeño mejora si se permite que salgan los vapores), esta operación se revierte en invierno para el calentamiento pasivo de la edificación (Spanaki, 2007). Las funciones térmicas de los *roof ponds* pueden variar de acuerdo con las diferentes configuraciones y la cantidad de tiempo que son usadas durante el día (Sharifi & Yamagata, 2015).

Las ventajas de los *roof ponds* son varias, destacando que existe bastante información sobre diseño y operación de las mismas, son útiles tanto en climas áridos como templados, pueden usarse para almacenar agua de lluvia, no se afecta su desempeño por la orientación del edificio y no incrementan la humedad al interior de la edificación; mientras que las desventajas son que los *roof ponds* incrementan el

peso de la edificación entre 200 y 400 kg/m<sup>2</sup>, afectan la accesibilidad del techo, en caso de mantenimiento inapropiado pueden ocurrir filtraciones y problemas de contaminación del agua, la mayoría de las variantes proveen confort en edificaciones de uno o dos pisos solamente, y que deben combinarse con otras medidas pasivas para eliminar completamente la carga energética en las edificaciones (Spanaki, 2007; Sharifi & Yamagata, 2015).

Una descripción completa de los diferentes tipos de roof ponds, comparando su desempeño y efectividad puede encontrarse en Sharifi & Yamagata (2015). Así mismo, una variante de estos sistemas se empleó en este trabajo en la forma de un techo verde tipo humedal (ver sección 3.2.3).

## 2.4 Metabolismo vegetal

El metabolismo de las plantas se define como el complejo de eventos fisicoquímicos dentro de las células que proveen energía para procesos vitales y para la síntesis de nuevo material orgánico (Kornberg, 2019). La fotosíntesis es el único proceso de importancia biológica que puede recolectar la energía proveniente del sol, de hecho, el término fotosíntesis significa “síntesis usando luz”. Durante este proceso, las plantas utilizan la energía del sol para romper una molécula de agua (H<sub>2</sub>O) en oxígeno e hidrógeno, y transformar hidrógeno y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en azúcares (-CHOH-) para satisfacer sus necesidades energéticas. La serie de reacciones que se producen durante la fotosíntesis se pueden dividir en las **reacciones en los tilacoides** de los cloroplastos y las **reacciones de fijación de carbono** que se producen en el estroma de los cloroplastos (Taiz *et al.*, 2015).

Durante las **reacciones de los tilacoides**, los fotones excitan a las moléculas de clorofila que disponen de esta energía como calor, fluorescencia, transferencia de energía o fotoquímica. La luz (fotones) se absorbe en los complejos antena, que se componen de clorofilas, pigmentos accesorios y proteínas que se ubican en las membranas de los tilacoides del cloroplasto. Los pigmentos antena fotosintéticos transfieren la energía a un complejo especializado clorofila-proteína llamado centro de reacción, que en plantas son los fotosistemas I y II. Estos últimos se encargan de oxidar agua a oxígeno molecular (es el único sistema bioquímico conocido que puede fotooxidar el agua), llevar a cabo el transporte de electrones no cíclico y reducir NADP<sup>+</sup> a NADPH (Nicotinamida adenina dinucleótido fosfato) (Taiz *et al.*, 2015).

Una porción de la energía de los fotones se almacena inicialmente como energía química-potencial, en la forma de diferencia de pH a través de la membrana de tilacoides; esta energía se convierte

rápidamente a energía química durante la fotofosforilación de ADP (adenosín difosfato) por la ATP sintasa. El NADPH y el ATP (adenosín trifosfato) formados por las reacciones de los tilacoides proveen energía para la reducción de carbono (Taiz *et al.*, 2015).

Las plantas absorben el CO<sub>2</sub> a través de los estomas mediante un proceso llamado transpiración, que consiste en el movimiento de agua a través de la planta mediante la apertura de las estomas con pérdida de agua en forma de vapor, y al mismo tiempo absorción de CO<sub>2</sub> (Taiz *et al.*, 2015).

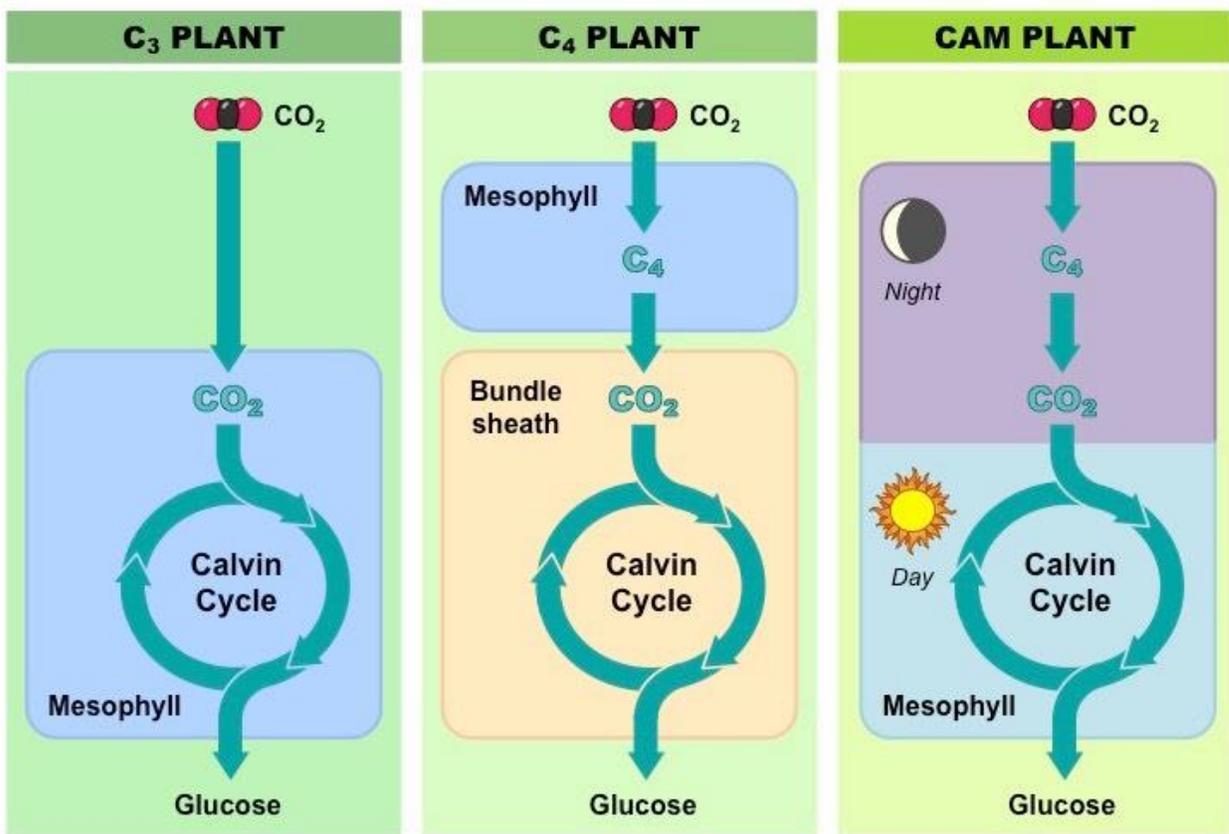
Durante las **reacciones de fijación de carbono**, se reduce el CO<sub>2</sub> por el ciclo de Calvin, en este ciclo se combinan CO<sub>2</sub> y agua con ribulosa-1,5-bisfosfato para formar dos moléculas de 3-fosfoglicerato, que se reducen y se convierten en carbohidratos. La operación continua del ciclo es asegurada por la regeneración de ribulosa-1,5-bisfosfato. El ciclo de Calvin consume dos moléculas de NADPH y tres moléculas de ATP por cada CO<sub>2</sub> fijado y tiene una eficiencia del 90% (Taiz *et al.*, 2015).

Ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa (rubisco), es la enzima que cataliza la carboxilación de ribulosa-1,5-bisfosfato en el ciclo de Calvin, y también actúa como oxigenasa en el proceso que se conoce como fotorrespiración. Cuando reacciona con oxígeno, produce 2-fosfoglicolato y 3-fosfoglicerato de la ribulosa-1,5-bisfosfato, en lugar de dos moléculas de 3-fosfoglicerato, lo que disminuye la eficiencia de la fotosíntesis. Para evitar los efectos de la fotorrespiración por la doble afinidad de rubisco (por CO<sub>2</sub> y oxígeno), algunas plantas concentran el CO<sub>2</sub> y los sitios de carboxilación en el cloroplasto, por mecanismos que incluyen el ciclo fotosintético C<sub>4</sub> y el metabolismo CAM (Taiz *et al.*, 2015); una comparación general de las rutas de fijación de carbono en plantas C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> y CAM se muestra en la figura 1.

Las plantas que utilizan el ciclo del carbón C<sub>4</sub> (también ciclo de Hatch- Slack) son llamadas plantas C<sub>4</sub> y las que fotosintetizan solamente por el ciclo de Calvin son llamadas plantas C<sub>3</sub>. La principal diferencia anatómica entre estos dos tipos de plantas es que las hojas de las plantas C<sub>3</sub> poseen los cloroplastos en las células del mesófilo, donde también ocurre la carboxilación, mientras que las C<sub>4</sub> poseen cloroplastos en el mesófilo y las células del haz vascular son las encargadas de la fijación de carbono. Las plantas C<sub>4</sub> utilizan la enzima fosfoenolpiruvato (PEP) carboxilasa para fijar CO<sub>2</sub> por la carboxilación de PEP en las células del mesófilo, y formar un ácido C<sub>4</sub> (oxaloacetato y posteriormente malato y/o aspartato) que es transportado a las células de la vaina del haz para ser descarboxilado y generar CO<sub>2</sub>, molécula que se reduce a carbohidratos en el ciclo de Calvin, y finalmente transportar el ácido C<sub>3</sub> resultante (piruvato o alanina) al mesófilo y regenerar el PEP. De este modo, las plantas C<sub>4</sub> se aseguran de suprimir la fotorrespiración. El ciclo C<sub>4</sub> se lleva a cabo en 16 familias tanto monocotiledóneas como dicotiledóneas, principalmente en

Gramineae, Chenopodiaceae y Cyperaceae. La energía total requerida para fijar  $\text{CO}_2$  por los ciclos  $\text{C}_4$  y Calvin en las plantas  $\text{C}_4$  es de cinco ATP y dos NADPH por cada  $\text{CO}_2$  fijado (Taiz *et al.*, 2015).

Otro mecanismo para concentrar  $\text{CO}_2$  en el sitio de rubisco se presenta en el metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM) y se lleva a cabo en plantas de la familia Crassulaceae (*Crassula*, *Kalanchoe*, *Sedum*), Cactaceae, Euphorbiaceae, Bromeliaceae (piña), Orchidaceae (vainilla) y Agavaceae (magueyes), entre otras. Este mecanismo permite mejorar la eficiencia en el uso de agua al abrir los estomas durante la noche y cerrándolos durante el día; una planta CAM pierde 50 a 100 g de agua por cada gramo de  $\text{CO}_2$  ganado, mientras que las plantas  $\text{C}_4$  y  $\text{C}_3$  pierden 250 a 300 g y 400 a 500 g, respectivamente. Este mecanismo es similar al  $\text{C}_4$ ; en plantas CAM, la formación de los ácidos  $\text{C}_4$  se encuentra separado espacial y temporalmente. Durante la noche, el  $\text{CO}_2$  es capturado por PEP carboxilasa en el citosol y el malato que se forma es almacenado en la vacuola (acidificación nocturna de las hojas). Durante el día, el malato almacenado es transportado al cloroplasto y descarboxilado por la enzima NADP-málica, el  $\text{CO}_2$  liberado es fijado por el ciclo de Calvin y el NADPH se usa para convertir el piruvato resultante en almidón, que durante la noche se convertirá en PEP para repetir el ciclo (Taiz *et al.*, 2015).



**Figura 1.** Comparación de rutas de fijación de carbono en plantas. Fuente: <https://ib.bioninja.com.au/higher-level/topic-8-metabolism-cell/untitled-2/c3-c4-and-cam-plants.html>

Emplear plantas CAM en un techo verde permite disminuir la cantidad de riego y, por consiguiente, el mantenimiento de éste; con lo que se incrementan las posibilidades de que las plantas sobrevivan condiciones de sequía (Vijayaraghavan, 2016), además de que presentan efectividad en cuanto a eficiencia térmica en climas semiáridos (Farell, 2013; Van Mechelen *et al.*, 2015a). En contraste, las plantas  $C_3$  que llevan a cabo la transpiración a una tasa alta durante el día, pueden enfriarse al evaporar agua de la superficie de las hojas (Raschke, 1960; Taiz *et al.*, 2015), lo que contribuye a amortiguar las fluctuaciones de temperatura en una edificación (Saadatian *et al.*, 2013) y proveen beneficios adicionales como sustentar la biodiversidad local, producción local de alimentos, mitigación de escorrentía y contaminación del aire (Sookhan *et al.*, 2018).

## 2.5 Conceptos básicos de transferencia de calor

El término calor se define como la forma de energía que puede ser transferida de un sistema a otro como resultado de una diferencia de temperatura. Esta transferencia de energía como calor siempre va del medio de mayor temperatura al medio de menor temperatura (segunda ley de la termodinámica) y se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura. El calor se puede transferir por los mecanismos de **conducción, convección y radiación**, y puede cambiar de vehículo al ser transferido de un medio a otro. Para seguir el rastro de las interacciones energéticas en una superficie, se debe aplicar el principio de conservación de energía (primera ley de la termodinámica) mediante un balance energético, donde la energía que entra a un sistema es igual a la energía que sale. Este balance es válido para condiciones estacionarias (no cambian con el tiempo) y transitorias (cambian con el tiempo) (Çengel, 2002).

La **conducción** es la transferencia de energía de partículas más energéticas a las partículas adyacentes menos energéticas. Puede ocurrir en sólidos, líquidos y gases (Jones & Rotenberg, 2016). La tasa de transferencia de calor por conducción depende de la geometría del medio, el espesor, el tipo de material y la diferencia de temperatura, y en capa planas, se puede calcular por la ley de Fourier de conducción de calor, que establece que la tasa de conducción de calor ( $Q_{cond}$ ) en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (1)$$

donde, k es la conductividad térmica, A es el área, dT es la diferencia de temperatura y dx es el espesor.

La conductividad térmica ( $k$ ) de un material se define como la tasa de transferencia de calor a través de una unidad de grosor del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura y es una medida de la habilidad del material para conducir calor, por lo tanto, un valor alto indica que el material es un buen conductor de calor y un valor bajo indica que el material es un conductor pobre o aislante. (Çengel, 2002).

Otra propiedad importante en el análisis de transferencia de calor es la difusividad térmica ( $\alpha$ ), que representa que tan rápido se difunde el calor a través de un material, y puede verse como el cociente del calor conducido a través del material sobre el calor almacenado por unidad de volumen como se muestra en la siguiente relación:

$$\alpha = \frac{\text{Calor conducido}}{\text{Calor almacenado}} = \frac{k}{\rho C_p} \quad \left( \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) \quad (2)$$

donde  $k$  es la conductividad térmica y  $\rho C_p$  es la capacidad calorífica, que representa la capacidad para almacenar calor de un material expresado por unidad de volumen (el calor específico  $C_p$  la expresa por unidad de masa). Un valor alto de difusividad térmica indica que el calor se propaga con mayor rapidez por el medio (por ejemplo, la  $\alpha$  de la plata es  $149 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ), mientras que un valor bajo significa que el calor es absorbido por el material y se conducirá más adelante (por ejemplo, la  $\alpha$  del agua es  $0.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) (Çengel, 2002).

La **convección** es el mecanismo de transferencia de calor entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que se encuentra en movimiento, e involucra los efectos combinados de conducción y movimiento de fluidos. (Jones & Rotenberg, 2016); mientras más rápido sea el movimiento del fluido, mayor será la transferencia de calor. La convección es forzada cuando el fluido es obligado a fluir sobre la superficie por medios externos como un ventilador, bomba o el viento; o es natural o libre cuando el movimiento del fluido es causado por fuerzas de flotabilidad que se inducen por diferencias en la densidad debido a la variación en la temperatura del fluido (Çengel, 2002).

La tasa de transferencia de calor por convección ( $Q_{conv}$ ) es proporcional a la diferencia de temperatura como se expresa por la ley de enfriamiento de Newton:

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (\text{W}) \quad (3)$$

donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor en  $\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $A_s$  es el área de la superficie donde se

presenta convección,  $T_s$  es la temperatura de la superficie, y  $T_\infty$  es la temperatura del fluido lejos de la superficie (flujo libre). El coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ) no es una propiedad del fluido, sino que se determina experimentalmente y su valor depende de la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades del fluido y la velocidad de masa del fluido (Çengel, 2002).

La **radiación** es la energía emitida por la materia en la forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. La transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de ningún medio, es más rápida (se transfiere a la velocidad de la luz) y no es atenuada por el vacío (Çengel, 2002).

La radiación térmica es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura; todos los cuerpos con temperatura mayor a cero absoluto emiten radiación térmica, y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación a diferentes grados. Así mismo, el flujo de radiación incidente en una superficie desde todas las direcciones se llama irradiación ( $G$ ). Cuando la radiación impacta una superficie, parte de ésta es absorbida ( $G_{abs}$ ), parte es reflejada ( $G_{ref}$ ) y el resto es transmitida ( $G_{tr}$ ); la fracción de la irradiación absorbida por la superficie es la absorptividad ( $\alpha = G_{abs}/G$ ,  $0 \leq \alpha \leq 1$ ), la fracción reflejada es la reflectividad ( $\rho = G_{ref}/G$ ,  $0 \leq \rho \leq 1$ ) y la fracción transmitida es la transmisividad ( $\tau = G_{tr}/G$ ,  $0 \leq \tau \leq 1$ ). La suma de  $\alpha$ ,  $\rho$  y  $\tau$  es igual a 1 (Çengel, 2002).

En la práctica, la mayoría de los materiales son opacos a la radiación térmica (por ejemplo, metales o madera) por lo que se considera a la radiación como un fenómeno superficial ( $\tau = 0$ ,  $\alpha + \rho = 1$ ); mientras que otros materiales son semitransparentes (por ejemplo, el vidrio o el agua) por lo que se considera a la radiación como un fenómeno volumétrico ( $\alpha + \rho + \tau = 1$ ).

La emisividad ( $\epsilon$ ) es una propiedad radiativa de la superficie ( $0 \leq \epsilon \leq 1$ ) que mide que tanto se aproxima una superficie real a un cuerpo negro con  $\epsilon = 1$ . Para calcular la tasa de radiación que puede ser emitida por una superficie ( $Q_{emit}$ ) se emplea la ley de Stefan-Boltzmann:

$$Q_{emit} = \epsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (\text{W}) \quad (4)$$

donde  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$  es la constante de Stefan-Boltzmann,  $A_s$  es el área de la superficie donde se presenta radiación, y  $T_s$  es la temperatura absoluta de la superficie (en K) (Çengel, 2002).

El entendimiento de los mecanismos de conducción, convección y radiación nos permite comprender los

procesos de transferencia de calor en los techos, mientras que el entendimiento de los procesos de transferencia de calor entre las plantas y el ambiente (sección 2.5.1) nos permite comprender el papel de las plantas en el balance de energía en el techo verde y cómo pueden modificar sus interacciones energéticas con el ambiente por medio de adaptaciones que les permiten llevar a cabo su ciclo de vida exitosamente, incluso durante condiciones ambientales extremas (sección 2.5.2).

### 2.5.1 Transferencia de calor entre las plantas y el ambiente

La temperatura de una planta es el factor principal que determina que tan eficientemente funciona. Muchos procesos fisiológicos dependen principalmente de la temperatura y no de la luz, por ejemplo, el alargamiento y elongación de las células, e incluso la actividad fotosintética que, aunque depende principalmente de la luz, puede reducirse o detenerse si la temperatura de la planta es demasiado alta o baja, alcanzando un punto óptimo intermedio. El ambiente y las plantas interactúan por medio de transferencias de energía. Estas transferencias determinan la temperatura de las plantas y la temperatura de las plantas afecta su eficiencia fisiológica (Gates, 1965).

Las plantas regulan su temperatura para funcionar con eficiencia fisiológica óptima por medio de los mecanismos de **radiación**, **transpiración** (calor latente) y, **conducción y convección** (calor sensible). Además de la transferencia de energía desde o hacia el calor almacenado en reacciones metabólicas (fotosíntesis, respiración) (Raschke, 1960; Gates, 1965; Jones & Rotenberg, 2016).

La **radiación** es el proceso más importante cuantitativamente y tiene dos formas distintas, la radiación solar, que es la principal fuente de energía externa para todos los procesos físicos y biológicos, y la radiación térmica o térmico infrarrojo, que es la energía emitida por cualquier objeto con temperatura mayor a cero absoluto (Gates, 1965; Jones & Rotenberg, 2016).

La radiación solar (de onda corta) que llega a la atmósfera se conoce como la constante solar y equivale a  $1366.1 \text{ W/m}^2$  (Standard, A. S. T. M., 2006), el espectro solar se divide en la región ultravioleta (0.29- 0.38  $\mu\text{m}$ ) que abarca el 4% de la energía de onda corta, la región fotosintéticamente activa (0.38- 0.71  $\mu\text{m}$ ) que abarca el 21 a 46% de la energía de onda corta, y la radiación cerca del infrarrojo que constituye 50- 70% de la energía solar. La energía solar que impacta una planta incluye la luz solar directa y la radiación difusa, que es la luz solar que es dispersada por la atmósfera (moléculas del aire, nubes y aerosoles o partículas suspendidas) y la que se refleja hacia arriba desde la superficie de la tierra o hacia abajo desde las nubes; esta forma de radiación afecta la superficie de la tierra solamente entre el

amanecer y el atardecer. Las magnitudes de los flujos de onda corta en la superficie cambian considerablemente durante el curso del día y el año. Las propiedades ópticas de las hojas y del follaje determinan la cantidad de energía absorbida (Gates, 1965; Jones & Rotenberg, 2016).

La radiación térmica (de onda larga) siempre está presente, cada parte del ambiente emite energía en longitudes de onda infrarrojas (en el rango espectral entre 3 y 4  $\mu\text{m}$  y 100  $\mu\text{m}$ ). La radiación de onda larga que recibe una planta proviene de la atmósfera, las nubes, de otras plantas y el suelo; y la magnitud de este tipo de radiación depende altamente de la temperatura del emisor de acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann. La irradiancia de onda larga hacia abajo desde el cielo depende de la temperatura del aire (y por ende de la época del año) y en gran medida de la nubosidad; y la emitida hacia arriba varía de acuerdo con la temperatura (Gates, 1965; Jones & Rotenberg, 2016). Cuando la radiación se encuentra con una hoja o tallo, debe ser absorbida, reflejada o transmitida; la probabilidad de que un rayo de luz interactúe con una hoja depende de la arquitectura del dosel (normalmente se asume que el arreglo de hojas es al azar, que la orientación es horizontal y que la forma es plana). La densidad de área de las hojas de un dosel o sus capas se describe usando el **índice de área foliar**, que es el área proyectada por un lado de las hojas por unidad de área en el suelo (Gates, 1965; Jones & Rotenberg, 2016).

La **transpiración** convierte el agua en las hojas de una planta en vapor de agua que se libera al ambiente a través de los estomas que se ubican en la epidermis de las hojas; este proceso se relaciona con el calor latente de vaporización del agua (energía necesaria para llevar las moléculas de fase líquida a fase gaseosa a una temperatura constante), que presenta el valor conocido más alto para cualquier líquido (44 KJ/mol a 25°C) y les permite a las plantas enfriarse al evaporar agua de la superficie de las hojas (Taiz *et al.*, 2015). Otras propiedades térmicas del agua como el calor específico (energía requerida para elevar la temperatura de una sustancia una cantidad específica), que presenta un valor alto comparada con otros líquidos, es importante para las plantas porque les ayuda a amortiguar las fluctuaciones de temperatura (Taiz *et al.*, 2015).

La tasa de transpiración depende de las resistencias del vapor de agua transferido por los estomas, y del vapor de agua y transferencia de calor a través de la capa límite que rodea la hoja (Jones & Rotenberg, 2016). Una tasa de transpiración de 0.0005 g/cm<sup>2</sup>/min ocasiona la pérdida de energía de aproximadamente 0.3 Cal, que es suficiente para disminuir la temperatura de una hoja hasta 15°C (Gates, 1965). Los mecanismos que controlan la transpiración tienen un rol importante en la regulación de la temperatura de la hoja (Jones & Rotenberg, 2016).

El proceso de transpiración se encuentra asociado a la evaporación del agua del suelo por la **evapotranspiración** (ET), que se define como la pérdida de agua de una superficie vegetada por los procesos combinados de evaporación del suelo y transpiración de las plantas. La tasa de ET depende de cuatro factores críticos, de los cuales el más importante es la humedad del suelo, porque determina el efecto de los otros tres, que son el tipo de planta, la etapa de desarrollo de las plantas y el clima. El tipo de planta se refiere a la especie o variedad de planta empleada, y tiene una gran influencia en la tasa de ET; los pastos y plantas no nativas requieren una cantidad de agua considerable cuando crecen, mientras que las plantas nativas están adaptadas y requieren mucha menos agua. La etapa de desarrollo de las plantas abarca la actividad de la planta y su tamaño; Las plantas en dormancia y pequeñas consumen menos agua que las plantas en crecimiento activo y plantas grandes o densas (Brown, 2014).

Las condiciones climáticas dictan la cantidad de energía disponible para la evaporación y determinan la tasa de ET por medio de cuatro parámetros: la radiación solar, la velocidad del viento, humedad y temperatura. La radiación solar contribuye con grandes cantidades de energía y es el parámetro dominante en el balance de energía por radiación. El viento transporta el calor de superficies adyacentes por el proceso de advección e incrementa la transferencia turbulenta de vapor de agua desde la vegetación húmeda a la atmósfera. La humedad y temperatura determinan el poder secante de la atmósfera o déficit de vapor de agua, este parámetro estima el gradiente en la concentración de vapor de agua entre la vegetación y la atmósfera. Por otra parte, la energía radiativa posee un mayor efecto en la ET cuando la temperatura es alta y el viento cuando la temperatura es baja (Brown, 2014).

La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) es la tasa de evapotranspiración en una superficie uniforme de vegetación densa y similar de al menos 100m, con crecimiento activo y con una altura y superficie de resistencia a la transferencia de vapor de agua específicas. La ET<sub>o</sub> se calcula utilizando un modelo meteorológico conocido como la ecuación de Penman-Monteith utilizando los cuatro parámetros de las condiciones climáticas, pues son los únicos valores que varían en el proceso de cálculo (Brown, 2014).

Mientras que la radiación eleva la temperatura de una planta y la transpiración la disminuye, la **convección** puede tanto calentar una planta fría como enfriar una planta caliente con igual facilidad, dependiendo de la temperatura del ambiente respecto al de la planta. La convección actúa sobre una zona atmosférica delgada que rodea todas las superficies en aire estacionario, conocida como la capa límite. La tasa de transferencia de energía transferida a través de la capa límite depende del grosor de la capa y de la diferencia de temperatura entre el objeto y la atmósfera, así como de su estructura. En campo, la

convección forzada (cuando hay corriente de aire en movimiento) domina sobre la convección libre (movimiento del aire por gradientes de temperatura), esta última es significativa cuando la velocidad del viento es muy baja y cuando la temperatura de las hojas excede en 10°C o más a la del aire (Gates, 1965; Jones & Rotenberg, 2016).

Por otra parte, los roles de **radiación**, **transpiración** y **convección** en la planta son diferentes en el día y la noche. Durante el día, las hojas de las plantas absorben el 60% de la radiación solar que incide sobre ellas, y absorben el 100% de la radiación térmica de longitudes de onda infrarrojas (de la atmósfera y del suelo), las hojas entonces balancean el presupuesto energético irradiando un porcentaje de la energía que absorben, la transpiración disipa un porcentaje adicional, y dependiendo del viento, otro porcentaje se disipa por convección (este último puede llegar a ser mayor que la transpiración).

Durante la noche, la transpiración es despreciable porque los estomas están cerrados, el proceso de convección agrega energía a la hoja en lugar de extraerla debido a que la temperatura de la hoja es menor que la de los alrededores, no hay radiación solar, y la radiación térmica se reduce; la entrada de energía por radiación y convección combinadas se balancean por la irradiación de energía por las hojas. Sin embargo, en la naturaleza las cosas no son tan simples, hay días fríos, y noches cálidas, viento, nubes y cielos nublados, por lo que se presentan variaciones en la transferencia de energía y fluctuaciones en la temperatura de las hojas (Gates, 1965).

A pesar de las variaciones ambientales, hay factores que favorecen la eficiencia de las plantas, como el hecho de que las transferencias de energía mantienen las hojas cerca de un rango de temperatura óptimo para las actividades fisiológicas; y que la temperatura óptima para la fotosíntesis, por ejemplo, varía entre diferentes especies de plantas en hábitats distintos, y depende en parte de la historia de vida de la planta, presentando adaptabilidad si creció en condiciones de temperatura bajas o cálidas (Gates, 1965).

El entendimiento del balance de energía de la vegetación es crítico para el desarrollo de modelos climáticos para la predicción del clima y el cambio climático, y para mejorar el rendimiento de los cultivos (Jones & Rotenberg, 2016).

### 2.5.2 Control de intercambios de energía entre las plantas y el ambiente

El *aclimatamiento* de una planta permite comprender las adaptaciones de estos organismos a ambientes con temperaturas altas o bajas. Si una planta está bien aclimatada con el ambiente, los cambios en las condiciones ambientales se reflejan rápidamente en variables como la temperatura de las hojas; mientras que una hoja con poca capacidad de aclimatación responde lentamente a cambios en la temperatura del aire, por ejemplo. Un aclimatamiento pobre se produce cuando hay una gran resistencia al intercambio de calor en la capa límite, como ocurre con hojas grandes o cuando la velocidad del viento es baja (Jones & Rotenberg, 2016).

En la mayoría de los ambientes las plantas están sujetas a temperaturas extremas en algún momento del año, por lo que han evolucionado una serie de mecanismos que les permiten superar las limitaciones que les imponen estos extremos. El mecanismo más general es la periodicidad de crecimiento, en la que las plantas crecen solamente durante el periodo del año donde las temperaturas son favorables, presentando dormancia en el verano o invierno. Sin embargo, existe una variedad de mecanismos que extienden el rango de temperaturas de crecimiento (Jones & Rotenberg, 2016).

En ambientes con temperaturas altas como los desiertos, la reducción de la temperatura de los tejidos es crucial para la productividad y supervivencia. Las plantas favorecen la reducción de la temperatura de los tejidos por una disminución de la entrada de energía (reducción de la absorción de radiación incidente de onda corta) o por consecuencia del aumento de la pérdida de calor (mayor evaporación o pérdida de calor sensible) (Jones & Rotenberg, 2016).

Existen adaptaciones que afectan la resistencia de la capa límite, la capa de aire con baja velocidad de movimiento que rodea a las hojas, a la transferencia de calor, como el tamaño de las hojas o la pubescencia. También existen adaptaciones que minimizan la absorción de radiación solar y limitan el calentamiento, como el aumento de la reflectividad de las hojas por la presencia de una cutícula cerosa reflectiva o por la presencia de una capa de pelos epidérmicos; el poseer una capa de pelos o espinas que sombrean los tejidos más sensibles del mesófilo de las hojas de irradiancias altas y a su vez disipan el calor; o el ajuste del ángulo de las hojas o filoides (peciolos o tallos de hoja modificados) en relación con el haz solar en eucaliptos (*Eucalyptus spp.*) por ejemplo, que presentan hojas en orientación vertical minimizando la intercepción de radiación al medio día, o muchas especies de leguminosas que presentan la capacidad de orientar sus hojas en relación al haz solar (movimientos heliotrópicos) (Jones & Rotenberg, 2016).

Otra adaptación es la maximización de la pérdida de calor al aumentar la tasa de transpiración que involucra una alta conductancia estomática como resultado de estomas amplios o presentar grandes cantidades de estomas; esta adaptación no es universal ya que depende del suministro de agua. Otras adaptaciones amortiguan las oscilaciones de temperatura del aire al poseer una masa térmica alta en algunas especies suculentas, y también las oscilaciones de temperatura del suelo al localizar los meristemas sensibles a la temperatura por debajo del nivel del suelo (Jones & Rotenberg, 2016).

En ambientes fríos, las plantas combinan mecanismos que maximizan la ganancia de calor del sol y mecanismos que minimizan la pérdida del calor ganado. En plantas árticas, es común que las flores actúen como trampas solares o reflectores para elevar la temperatura de sus tejidos. Muchas especies reducen la pérdida de calor por su baja estatura, ya que cerca del suelo la velocidad del viento es baja y la capa límite permanece relativamente sin perturbaciones. En especies de montañas altas en los trópicos es característico que las plantas herbáceas presenten tallo paquicaulo (grueso y relativamente corto), que protege los tejidos sensibles del hielo. Otro mecanismo biofísico que evita que las plantas se congelen es la exotermia de congelamiento, que es el calor latente de fusión liberado cuando se congela un tejido o el agua externa, y retrasa el enfriamiento de algunos tejidos expuestos a temperaturas bajas. Finalmente, las plantas presentan un mecanismo de respiración celular conocido como ruta de la oxidasa alternativa que es menos eficiente en la conversión de carbohidratos en ATP (adenosín trifosfato), liberando más de la energía de los enlaces como calor; este mecanismo es bien conocido en especies de la familia Araceae (Jones & Rotenberg, 2016).

## 2.6 Confort térmico

El confort térmico es esa condición mental que expresa satisfacción con el entorno térmico (ASHRAE Standard 55, 2010). Para definir las condiciones de confort térmico se abordan seis factores principales: 1. Tasa metabólica, 2. Aislamiento de la ropa, 3. Temperatura del aire, 4. Temperatura radiante, 5. Velocidad del aire y 6. Humedad; por lo tanto, el confort (bienestar o comodidad) del cuerpo humano depende de 3 factores ambientales: la humedad relativa, la velocidad del aire y la temperatura del aire, que es el indicador más importante. Una persona promedio (30 años, 70 kg, 1.73 m de altura y 1.8 m<sup>2</sup> área superficial) vestida descansando o realizando trabajo ligero se siente cómoda en un rango de temperatura operativa de 23°C a 27°C, y de 25 a 28°C cuando el ambiente al aire libre es cálido y fresco, respectivamente. La humedad relativa tiene un efecto considerable en el confort debido a que es una medida de la habilidad del aire para absorber humedad y por lo tanto afecta la cantidad de calor que un

cuerpo puede disipar por evaporación; un valor alto de humedad relativa disminuye la evaporación y un valor bajo la aumenta. El nivel deseable de humedad relativa se encuentra en el rango de 30 a 70%, con 50% como el nivel más deseable. El otro factor que tiene un efecto en el confort térmico es el movimiento del aire o corriente de aire, que causa un enfriamiento local no deseado en el cuerpo humano. Un nivel bajo de velocidad del aire es deseable porque remueve el aire caliente y húmedo que se encuentra cerca del cuerpo y lo reemplaza con aire fresco. El movimiento del aire debe ser lo suficiente para remover el calor y la humedad, pero al mismo tiempo pasar inadvertido (para los criterios antes mencionados se consideran valores no mayores a 0.2 m/s) (ASHRAE Standard 55, 2010).

En una habitación, los factores que ocasionan incomodidad térmica son: las corrientes de aire, la radiación térmica asimétrica (por ventanas, paredes y el techo), pisos calientes o fríos y estratificación vertical de temperatura; debido a que exponen las partes del cuerpo a diferentes temperaturas. Sin embargo, aunque se intente proveer un ambiente térmico uniforme, no es posible proporcionar un ambiente confortable para cada habitante de una edificación. La zona de confort térmico se basa en una tasa de aceptación del 90%, es la misma en todo el mundo en cualquier estación y es casi igual entre hombres y mujeres, y a todas las edades. Asimismo, se ha reportado que el nivel de actividad afecta el confort térmico, ya que la tasa metabólica depende del nivel de actividad (Çengel, 2002; ASHRAE Standard 55, 2010).

El confort térmico dentro de las edificaciones puede afectarse positivamente mediante la instalación de techos verdes, con implicaciones en el consumo energético y la salud de sus habitantes (Santamouris, 2014; He *et al.*, 2017; Tan *et al.*, 2017)

## 2.7 Justificación

El consumo energético en las ciudades representa uno de los mayores gastos económicos y contribuye de manera importante en la emisión de gases de efecto invernadero a escala global. En México, son pocos los estudios que exploran alternativas para reducir la huella de carbono de las ciudades mediante tecnologías sostenibles, las cuales pueden mitigar el impacto del cambio climático. Una de las alternativas más efectivas para incrementar la eficiencia energética de los edificios es el uso de techos verdes, sin embargo, es necesario desarrollar tecnologías susceptibles de ser utilizadas en la región Noroeste de México.

En el presente trabajo se propone realizar una comparación de plantas con metabolismo CAM y C<sub>3</sub> en

techos verdes extensivos, evaluando su desempeño térmico utilizando módulos experimentales. El desarrollo de estas tecnologías podría disminuir efectivamente las fluctuaciones de temperatura en techos, disminuyendo potencialmente la energía requerida para enfriar y calentar edificios.

## **2.8 Hipótesis**

Debido a la capacidad de transpirar durante el día, las plantas con metabolismo  $C_3$  de ambientes inundados tienen un mejor desempeño térmico que las plantas con metabolismo CAM en los techos verdes. A su vez, la cobertura vegetal tendrá mejor desempeño térmico que superficies sin cobertura vegetal o de suelo.

## **2.9 Objetivos**

### **2.9.1 Objetivo general**

Evaluar la eficiencia térmica de techos verdes extensivos comparando plantas con metabolismo CAM y  $C_3$  en un clima mediterráneo.

### **2.9.2 Objetivos específicos**

- Evaluar la transferencia de calor en módulos experimentales con diferentes tratamientos de techos verdes.
- Evaluar la eficiencia térmica del techo con plantas con metabolismo CAM,  $C_3$  y sustrato húmedo o seco.
- Identificar la especie de planta que mejore el desempeño térmico del techo y requiera menor mantenimiento.

## Capítulo 3. Materiales y métodos

### 3.1 Sitio de estudio

Los módulos experimentales se colocaron aleatoriamente en el techo del edificio de Física Aplicada del CICESE, Ensenada, Baja California (31°52'16.1"N 116°39'42.1"E). La ciudad se caracteriza por tener clima semiseco o semiárido con lluvias en invierno (BSs) de acuerdo con García (2004), o árido estepario frío (BSk) de acuerdo con el esquema de Köppen- Geiger (Kottek *et al.*, 2006; Peel *et al.*, 2007) con una temperatura promedio anual de 17.74°C, precipitación promedio anual de 251.3 mm y radiación promedio anual de 226.41 W/m<sup>2</sup> (<http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>).

**Tabla 2.** Datos de  $T_{amb}$ , radiación solar (Q), velocidad del viento (V) y lluvia de la estación meteorológica del CICESE durante el periodo de monitoreo de los techos verdes.

	$T_{amb}$ (°C)			Q (W/m <sup>2</sup> )		V (m/s)		Lluvia (mm)	
	Max	Min	Promedio	Max	Promedio	Max	Promedio	Promedio	Total
<b>Enero</b>	27.9	11.1	18.4	825	652.4	15.2	1.6	0.002	16.1
<b>Febrero</b>	27.9	8.2	14.9	1023	185.5	12.1	1.7	0.001	12.0
<b>Marzo</b>	19.7	8.5	14.4	1297	930.8	32.2	3.2	0.012	101.2
<b>Abril</b>	23.9	10.6	16.0	1380	1018.3	13.9	3.1	0.004	36.5

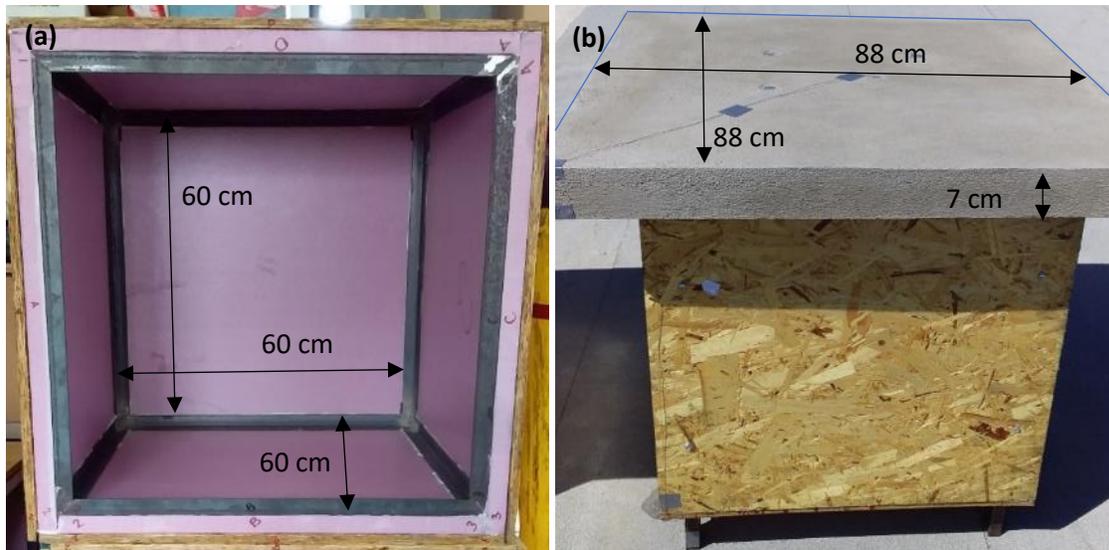
### 3.2 Diseño experimental

#### 3.2.1 Descripción de los módulos experimentales

Los módulos experimentales constan de una estructura cúbica de metal ángulo (de 1 pulgada, 1/8 de espesor y 60 cm de cada lado) que soporta el peso de las placas de concreto; las paredes de los módulos tienen una capa de poliestireno extruido foamular (Owens Corning®) de 1 pulgada de grosor como aislamiento térmico adherida a la estructura de metal, y una capa de madera OSB o petatillo de ½ pulgada recubierta con barniz marino de poliuretano (Valresa®) para protegerla de la humedad; se utilizaron tornillos broca y pegamento de montaje no más clavos para asegurar las paredes a la estructura metálica.

Cada módulo está levantado 15 cm sobre el suelo (con metal tubular) para evitar la transferencia de calor entre el techo del edificio y el módulo. Las bases de los módulos se barnizaron para evitar la corrosión (Esmalte anticorrosivo Comex 100® total).

Sobre cada módulo se colocó una placa de concreto de 88 \* 88 cm y 7 cm de espesor que representa el techo de una edificación. La mezcla que se empleó para las placas tiene las siguientes proporciones: 1.5 cubetas (de 19 L) de grava, 1 cubeta de arena, 0.5 saco de cemento de 50 kg y 0.5 cubeta de agua. Las placas presentan un gotero en la parte inferior para evitar que el agua escurra dentro de los módulos experimentales. Cada módulo está sellado con silicón acrílico DAP para evitar pérdidas de calor adicionales.



**Figura 2.** Módulos experimentales y sus dimensiones, (a) el interior del módulo y (b) el costado.

**Tabla 3.** Propiedades térmicas de los principales materiales que componen los módulos experimentales.

	<b>Conductividad térmica (W/m K)</b>	<b>Calor específico (J/kg K)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Foamular</b>	0.0288		40.27
<b>Madera OSB/ Petatillo</b>	0.117	1594.9	596.32
<b>Concreto (placa)</b>	1.74	880	2240

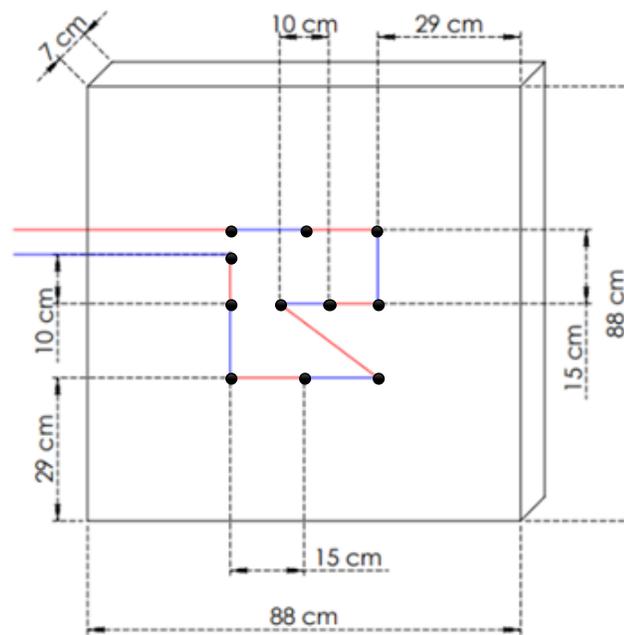
### 3.2.2 Instrumentación y monitoreo

Cada placa de concreto cuenta con una serie de sensores de temperatura tipo “T” (OMEGA Engineering) distribuidos en diferentes puntos de la placa (ver figura 3), que actúan como una termopila para conocer la diferencia de temperatura promedio entre las superficie interior y exterior de la placa; también se

colocaron sensores de temperatura tipo "T" (OMEGA Engineering) (termopares) en la superficie externa de la placa de concreto, y al interior del módulo. En la figura 3 se observa la ubicación de los sensores. Los termopares tipo "T" tienen una incertidumbre de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .

La información proporcionada por los sensores (termopares y termopilas) se registra en una tarjeta de adquisición conectada a un sistema de adquisición de datos Keysight 34972A (Agilent Technologies, EUA), con mediciones cada 5 minutos. Para monitorear la temperatura del sustrato se colocaron sensores de temperatura HOBO que registran mediciones cada 30 min.

Los datos climáticos (radiación solar, temperatura, humedad relativa y precipitación) se tomaron de la estación meteorológica del CICESE ubicada en el edificio de oceanografía física.



**Figura 3.** Diagrama de las termopilas en la placa de concreto.

### 3.2.3 Tratamientos

Los tratamientos que se aplicaron a los seis módulos experimentales se enlistan a continuación:

1. techo verde con sustrato seco y *Sedum acre* (TSe), especie de planta con metabolismo CAM;
2. techo verde con sustrato húmedo y *Salicornia pacifica* (TSa), especie de planta con metabolismo  $C_3$ ;

3. techo con sustrato seco (TS);
4. techo con sustrato húmedo (TH), ambos para evaluar el efecto del sustrato sin vegetación;
5. techo control de concreto (TC), y
6. techo con pintura reflectiva blanca (TI) (Impermeabilizante TOP 7 años fotosensible de COMEX).

El sustrato seco que se utilizó se compone de lombricomposta, tierra cochi, peatmoss, perlita, vermiculita y vitaminas, y se obtuvo del Vivero Valle de Guadalupe (calle Lucio Blanco, Valle de Guadalupe, Baja California).

El sustrato húmedo está compuesto de tierra del humedal La misión, Ensenada, Baja California aproximadamente en un 80% y sustrato seco en un 20%, este sustrato se irrigó semanalmente hasta quedar inundado para evaluar el efecto térmico de un techo verde tipo humedal (*roof pond*).

### 3.2.4 Descripción de las especies de plantas seleccionadas

*Sedum acre* (Lineé, 1753) (figura 4) es una planta herbácea pequeña, suculenta, perenne, tapizante, de hojas alternas, deciduas y tallos florales ascendentes en las puntas, que habita gran parte de Europa, el norte de África y Turquía, desde el nivel del mar hasta  $\pm 2500$  m (Eggl, 2012), se encuentra naturalizada en América del norte, Japón y Nueva Zelanda. Comúnmente se encuentra en grietas de rocas, muros y laderas pedregosas, también se emplea en jardinería. Su floración es durante junio y julio. Las flores son de forma estrellada y se agrupan en corimbos terminales (Encyclopedia of Life). *Sedum acre* es una especie que generalmente posee metabolismo CAM, aunque bajo determinadas situaciones de alto acceso a agua y otros recursos puede ser una especie CAM facultativa (Kluge 1977).

*Salicornia pacifica* (Standl., 1916) (figura 4) [sinónimos: *Salicornia virginica* L. misappl. (= *Sarcocornia pacifica* (Standl.) A.J. Scott); *Salicornia perennis* Mill. (= *S. ambigua* Michx.) misappl.] es una planta herbácea, suculenta, halófito (tolera suelos salinos sin dañarse), perenne, de hojas opuestas reducidas con una flor central y dos laterales, que habita en marismas salados a lo largo de la costa y en valles interiores desde Columbia Británica, Canadá hasta Sonora, México y también sobre la costa atlántica (Standley, 1916; Abrams, 1944). La temporada de crecimiento típica va de abril a agosto, y la floración ocurre a mitad del verano e inicios de otoño (Hansen & Weber, 1975).

El género *Salicornia* está compuesto de especies con alta afinidad a ambientes de humedales costeros y

salinos, donde puede ser el elemento dominante en el paisaje. Estas especies se caracterizan por alta tolerancia a la salinidad y metabolismo  $C_3$  (Ayala & O Leary 1995; Woo & Takekawa, 2012).



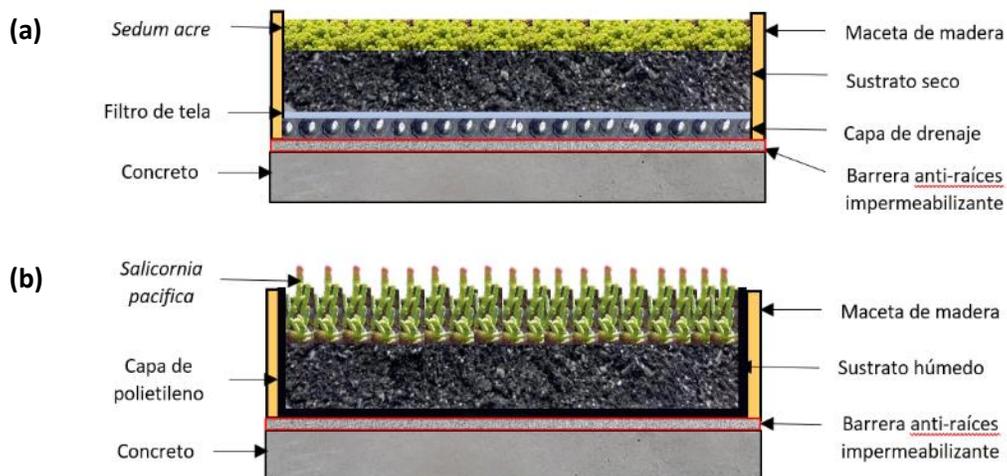
**Figura 4.** *Sedum acre* (a) y *Salicornia pacifica* (b).

### 3.2.5 Descripción de los techos verdes

Los techos verdes se instalaron sobre las placas de concreto dentro de una “maceta” de madera de pino (1 pulgada de espesor) de 15 cm de alto barnizada y pintada de blanco para reflejar la radiación solar.

Los componentes de los techos verdes para *Sedum acre* fueron: barrera a prueba de agua y raíces de cartón antorchable, capa de drenaje, filtro de tela, 10 cm de sustrato seco, y plantas; y para *Salicornia pacifica* fueron: barrera a prueba de agua y raíces de cartón antorchable, capa de polietileno negro de 4 mm (para formar una *roof pond*), 10 cm de sustrato húmedo, y plantas. Esta última configuración es un sistema que combina las propiedades de un techo verde y un *roof pond* porque incluyó plantas y sustrato como un techo verde, y el sustrato se encontraba constantemente inundado como en un *roof pond*. Los componentes de los techos verdes se ilustran en la figura 5 y el costo de los materiales de los techos se presentan en la tabla 4, así mismo, la figura 6 ilustra los componentes de los módulos experimentales, los de los techos verdes y la ubicación de los diferentes sensores utilizados.

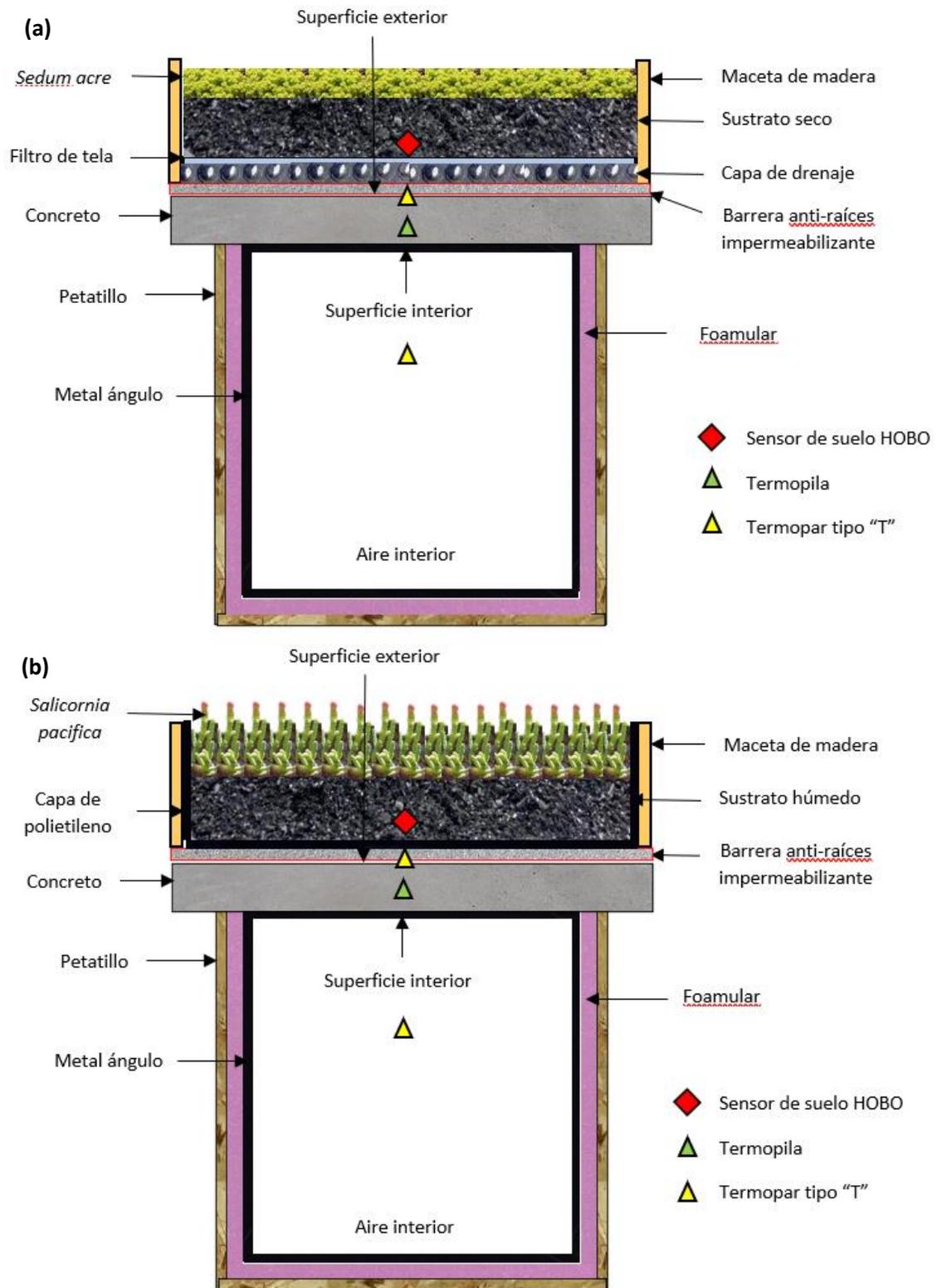
La irrigación se realizó con una manguera cada 7 - 10 días; para TSa y TH cada evento de irrigación se suspendió al alcanzar la capacidad de la *maceta*, mientras que para TSe y TS la irrigación se realizó hasta saturar el sustrato y se suspendió cuando se comenzaba a escurrir el agua. Cabe mencionar que no se les aplicó fertilizante a las plantas durante la investigación.



**Figura 5.** Diagrama de los componentes de un techo verde con sustrato seco y *Sedum acre* (a) y un techo verde con sustrato húmedo y *Salicornia pacifica* (b).

**Tabla 4.** Costo de los materiales de los techos verdes. La cantidad indicada como *sin plantas* incluye la barrera a prueba de agua y raíces, sustrato y capa de polietileno negro (*roof pond*) o capa de drenaje + filtro de tela (techo verde); la cantidad indicada como *con plantas* representa el costo total del sistema por m<sup>2</sup>.

Tipo de techo	Costo por m <sup>2</sup>	
	Sin plantas	Con plantas
<b>Estanque de techo</b>	\$ 271.26	\$ 1,741.26
<b>Techo verde</b>	\$ 511.03	\$ 1,861.03



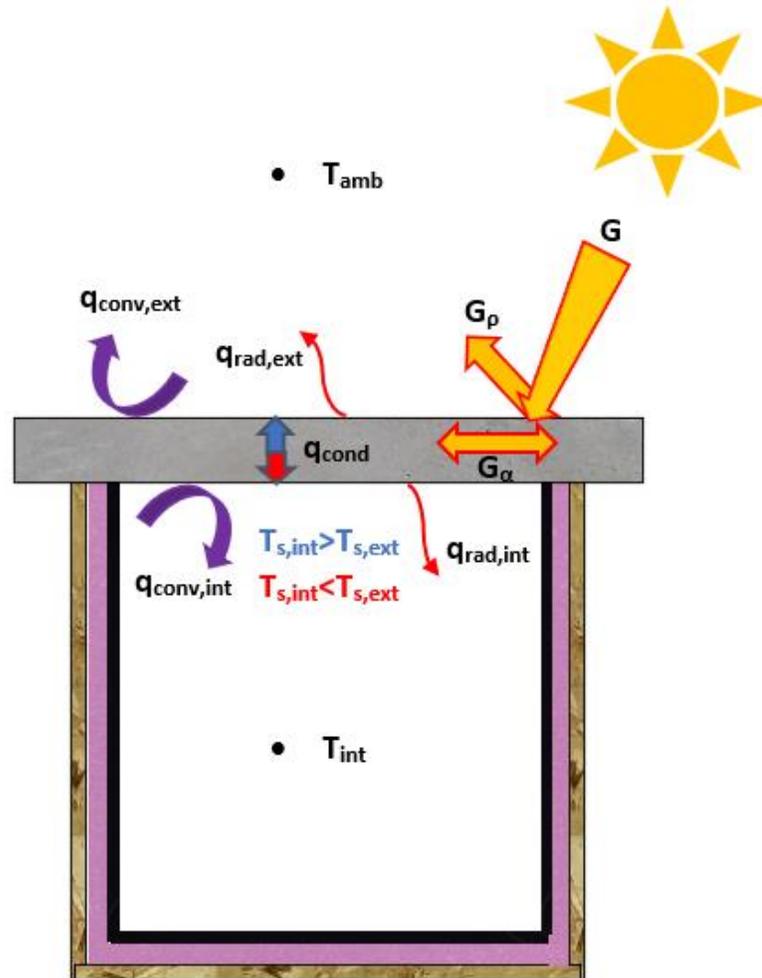
**Figura 6.** Diagrama de los módulos con techos verdes con sustrato seco y *Sedum acre* (a) y con sustrato húmedo y *Salicornia pacifica* (b). Se indica la ubicación de los distintos tipos de sensores que se utilizaron.

### 3.2.6 Procesos de transferencia de calor en los techos

Los techos están expuestos al sol durante el día, un techo sin recubrimiento (figura 7) absorbe una parte de la irradiancia solar ( $G_{\alpha}$ ) en la superficie exterior del mismo y refleja el resto hacia el cielo y sus alrededores ( $G_{\rho}$ ); el calor se transfiere hacia o desde el interior de las edificaciones por conducción ( $q_{\text{cond}}$ ) a través de la losa de concreto, debido a la diferencia entre la temperatura de la superficie exterior ( $T_{s,\text{ext}}$ ) y la temperatura de la superficie interior ( $T_{s,\text{int}}$ ) de la losa. La dirección del flujo de calor va desde la región con mayor temperatura a la de menor temperatura, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica. Al mismo tiempo, se presentan flujos de calor por convección natural ( $q_{\text{conv,int}}$ ,  $q_{\text{conv,ext}}$ ) entre las superficies del techo y el aire alrededor de él, estos flujos pueden ser pérdidas o ganancias de energía de acuerdo sus respectivos valores de temperatura,  $T_{s,\text{ext/int}} > T_{\text{amb}}$  o  $T_{s,\text{ext/int}} < T_{\text{amb}}$ ; asimismo, se presentan pérdidas o ganancias de calor por radiación ( $q_{\text{rad,ext}}$ ,  $q_{\text{rad,int}}$ ) debido a la diferencia de temperatura entre la  $T_{s,\text{ext}}$  y la cúpula celeste, y también debido a la diferencia de temperatura entre la  $T_{s,\text{int}}$  y las demás superficies interiores. Durante la noche, al no recibir radiación del sol, los techos liberan el calor que almacenaron a lo largo del día y/o transfieren parte del calor contenido en el espacio interior por medio de los mecanismos de transferencia de calor antes explicados.

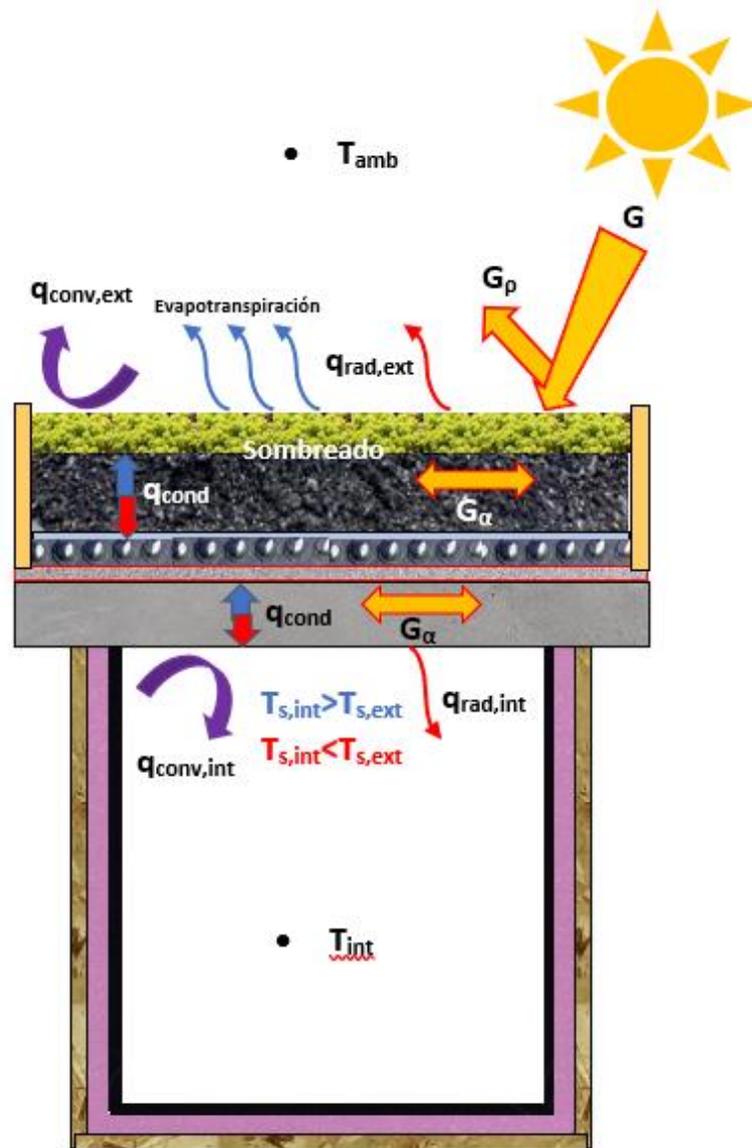
En el caso de los techos verdes (figura 8), se presenta una mayor cantidad de interacciones de energía en el sistema por la cantidad de capas en su composición. En este caso la irradiancia solar incide en su mayoría sobre las plantas (dependiendo de la cobertura), donde se absorbe ( $G_{\alpha}$ ) y refleja ( $G_{\rho}$ ), como se explicó en el apartado 2.5.1; también, se presenta pérdida o ganancia de energía debido a flujos de calor por convección ( $q_{\text{conv,ext}}$ ) y radiación ( $q_{\text{rad,ext}}$ ), así como el flujo de calor por evapotranspiración dependiendo del contenido de agua en el sustrato.

Por lo anterior, la cantidad de irradiancia solar que logra llegar a la superficie del sustrato es mínima y se suma al calor que las plantas en un momento dado pueden suministrarle; tomando en cuenta que el sustrato y el agua tienen alta capacidad para almacenar calor y baja difusividad térmica, y dependiendo del valor de temperatura de los alrededores y los materiales adyacentes, se almacena cierta cantidad de energía y al mismo tiempo se transfiere un flujo de calor por conducción a través del sustrato (húmedo o seco). Tal flujo de calor también se transfiere por conducción a través de las demás capas del techo verde (filtro de tela y drenaje/capa de polietileno, y barrera antiraíces impermeabilizante), con mayor o menor rapidez dependiendo de las difusividad térmica de los materiales, hasta llegar a la losa de concreto. También, en la superficie interior de la losa se presentan flujos por convección ( $q_{\text{conv,int}}$ ) y radiación ( $q_{\text{rad,int}}$ ) que interactúan con el ambiente interior.



**Figura 7.** Diagrama con el balance de energía en un techo sin recubrimientos.  $T_{amb}$  es la temperatura del ambiente,  $T_{int}$  es la temperatura del aire al interior del módulo,  $G$  es la irradiancia solar,  $G_p$  es la radiación solar reflejada,  $G_\alpha$  la radiación solar absorbida, los subíndices int y ext indican que los mecanismos se llevan a cabo al interior y al exterior de los módulos, respectivamente,  $q_{rad}$  es la radiación solar de onda larga,  $q_{conv}$  representa el flujo de calor por convección,  $q_{cond}$  representa el flujo de calor por convección, y  $T_{s,int}$  y  $T_{s,ext}$  son las temperaturas en la superficie inferior y superior de la placa de concreto, respectivamente.

Cabe mencionar que la dirección del flujo a través de la losa puede ser desde o hacia el interior, dependiendo de la distribución de energía en el techo verde. La descripción anterior explica los múltiples mecanismos de transferencia de calor involucrados en el sistema de techo verde; no obstante, es complicado predecir por simple inspección el comportamiento térmico del techo verde debido a que las condiciones climáticas, las ganancias y/o pérdidas de energía, así como la cantidad de energía almacenada en los techos varían a lo largo del tiempo.



**Figura 8.** Diagrama con el balance de energía en un techo verde.  $T_{amb}$  es la temperatura del ambiente,  $T_{int}$  es la temperatura del aire al interior del módulo,  $G$  es la irradiancia solar,  $G_p$  es la radiación solar reflejada,  $G_\alpha$  la radiación solar absorbida, los subíndices int y ext indican que los mecanismos se llevan a cabo al interior y al exterior de los módulos, respectivamente,  $q_{rad}$  es la radiación solar de onda larga,  $q_{conv}$  representa el flujo de calor por convección,  $q_{cond}$  representa el flujo de calor por conducción, y  $T_{s,int}$  y  $T_{s,ext}$  son las temperaturas en la superficie inferior y superior de la placa de concreto, respectivamente. Se indican los procesos de evaporación (calor latente) y el sombreado del sustrato por las plantas.

Es importante tener en cuenta que la transferencia de calor a través de las paredes y la base de los módulos se consideran despreciables debido a que se encuentran bien aisladas y, por lo tanto, el diseño de los módulos permite medir solamente la cantidad de energía a través de los techos propuestos y su efecto sobre el ambiente interior.

### 3.2.7 Variables analizadas

Para cumplir los objetivos del estudio se evaluaron variables biológicas y variables de transferencia de calor (variables térmicas). En cuanto a las variables biológicas, se midieron las alturas, la cobertura vegetal, biomasa total, y densidad del suelo. Las variables de transferencia de calor son las temperaturas en los diferentes puntos de los módulos, el flujo de calor y las cargas térmicas para observar la diferencias del consumo de energía entre los tipos de techos estudiados.

#### 3.2.7.1 Variables biológicas

Las alturas se midieron desde el sustrato hasta la parte aérea más alta utilizando una cinta métrica, se midieron cuatro individuos de cada especie en tres ocasiones: al instalar los techos verdes (octubre), en febrero y en junio. La cobertura vegetal se midió dos veces cada mes desde octubre hasta junio mediante la aplicación móvil Canopy Cover Free, la cual, mediante fotografías calcula el porcentaje de vegetación que ocupa un área y la almacena en un archivo de texto en el teléfono.

Para calcular la biomasa total, se extrajeron dos muestras de 10 cm<sup>3</sup> del TSA y el TSe, se almacenaron en bolsas etiquetadas y se llevaron inmediatamente al laboratorio donde se separó la parte aérea de la parte subterránea, después se pesaron en fresco con una báscula de precisión (Mettler Toledo). Para la parte subterránea se extrajo manualmente la mayor cantidad posible de raíces, las cuales fueron en su mayoría raíces primarias. Una vez que se tuvo el peso fresco, las muestras se colocaron en un horno de secado (Binder) durante 24 y 48 horas y se pesaron nuevamente. La biomasa total se obtuvo de la suma del peso seco de la parte aérea y subterránea de las muestras. Finalmente, para la densidad del suelo se extrajeron dos muestras de cada tratamiento con sustrato (TS, TSe, TH y TSA), y se calculó la densidad de acuerdo con el método descrito por Wilke (2005).

#### 3.2.7.2 Variables de transferencia de calor (variables térmicas)

Los valores de las temperaturas de la superficie exterior de la placa de concreto ( $T_{s,ext}$ ), del interior de los módulos ( $T_{int}$ ) y los valores de las termopilas ( $T_p$ ) se registraron con el sistema de adquisición de datos Keysight. Las  $T_p$  generan una diferencia de voltaje (V) en respuesta a un gradiente de temperatura, por lo tanto, se conoce el gradiente de temperatura medido por la  $T_p$  y, a su vez, éste permite calcular la temperatura de la superficie interior ( $T_{s,int}$ ) de la placa de concreto mediante la siguiente expresión:

$$T_{s,int} = T_{s,ext} - T_p \quad (5)$$

Las temperaturas del suelo ( $T_{suelo}$ ) se registraron directamente en los HOBO y se extrajeron en la laptop utilizando el software HOBOWare.

El flujo de calor por unidad de área ( $q$ ) que atraviesa la placa de concreto se calculó mediante la ley de Fourier de conducción de calor:

$$q_{cond} = k \frac{(T_{s,ext} - T_{s,int})}{dx} \quad (6)$$

donde  $q_{cond}$  es el flujo de calor por conducción,  $k$  es la conductividad del concreto (valor obtenido de Xamán *et al.*, 2017) y  $dx$  el espesor de la placa de concreto.

La carga térmica que aporta el techo es el flujo de calor a través del mismo por unidad de tiempo medido, y se puede expresar como el área bajo la curva de  $q$  en un tiempo finito; por lo tanto, para determinarla se integró numéricamente mediante la regla del trapecio, se considera que este método es preciso para el cálculo ya que una aproximación lineal se ajusta al comportamiento de la curva debido a la cantidad de mediciones (288 por día) e intervalo de tiempo entre ellas (5 min).

## Capítulo 4. Resultados y discusión

---

### 4.1 Variables biológicas

#### 4.1.1 Altura de plantas

Las alturas de *Sedum acre* y *Salicornia pacifica* se muestran en la tabla 5. Se observó que *S. acre* presentó un crecimiento constante desde su colocación en los techos verdes hasta abril, cuando su cobertura se redujo por la presencia de plagas, principalmente por la mosca del sustrato (Sciaridae) y cochinilla algodonosa o piojo harinoso (*Planococcus citri*) (ver figura 9). Además, después de un periodo de 2.5 semanas sin irrigación (debido a la suspensión de actividades en CICESE por la emergencia sanitaria causada por COVID-19), las plantas presentaron una reducción considerable en su cobertura, ocasionando que la mayor parte del módulo quedara sin vegetación superficial (figuras 11e y 11f).

Las moscas del sustrato pertenecen a la familia Sciaridae, que incluye 1,700 especies descritas y en general poco estudiadas. Se conocen por ser plaga en granjas de hongos, plantas ornamentales y cultivos en invernadero y se encuentran comúnmente en material orgánico de compostaje; son moscas pequeñas (1-4 mm), cuyas larvas (2-8 mm) son minadoras y se alimentan de las raíces y las hojas provocando el marchitamiento de las plantas, además de que transmiten patógenos p.ej. hongos del género *Fusarium*, *Pythium*, entre otros. Su ciclo de vida tiene una duración de tres a cuatro semanas e incluye huevecillos, larva, pupa y adulto, y las hembras pueden poner hasta 200 huevecillos (Low, 2002; Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2005). Se observaron aproximadamente 30 individuos adultos en el módulo con *S. acre*, de los cuales 15 fueron capturados en una trampa pegajosa amarilla, mientras que en el módulo con *S. pacifica* se observó 1 individuo adulto solamente, y esto se atribuye al sustrato permanentemente inundado.

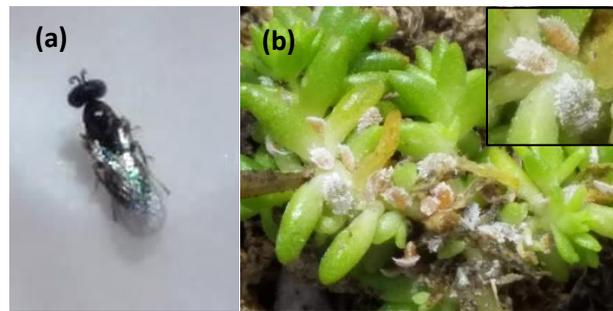
Por otro lado, la cochinilla algodonosa o piojo harinoso (*Planococcus citri*) es una especie cosmopolita y plaga de un gran número y variedad de plantas. Se alimentan de la savia de las plantas en las partes aéreas y pueden transmitir virus nocivos. Su ciclo de vida se completa en 30-35 días e incluye huevo, cuatro instar de ninfa para las hembras y tres para los machos y adulto, los machos son alados y de vida corta (2-4 días, 1.5 mm), mientras que las hembras (2.6-2.8 mm) no poseen alas, su cuerpo está cubierto por ceras y posee una franja gris característica en el dorso, viven de 30 a 40 días y ponen entre 300 y 800 huevos (Kono *et al.*, 2008; Mani & Shivaraju, 2016). Se observaron una gran cantidad de individuos hembras en todas las plantas, un macho y una pupa.

*Salicornia pacifica* también presentó un incremento en su altura desde su colocación en los techos verdes, alcanzando una altura máxima de 48 cm. Además, se observó una suberización de los tallos poco después de la colocación en los techos verdes, esto se atribuye a estrés por el cambio repentino de sustrato (textura y profundidad) y en el contenido iónico del agua (pasó de agua salada a agua dulce), además del estrés generado por las condiciones climáticas en el techo (mayor irradiación solar y viento). Esta suberización se observó en todo el tallo a excepción de las partes apicales, respecto a lo cual, Hansen & Weber (1975) mencionan que en respuesta a estrés por sal o humedad (estrés osmótico), el felógeno produce fibras y células suberizadas para evitar la pérdida de agua y nutrientes, y se incrementa el contenido de sodio y cloruro en los tejidos suculentos como un medio de adaptación osmótica, además de que cada nodo es osmóticamente independiente de los otros para permitirle a la planta sobrevivir condiciones de estrés.

Así mismo, se observó un cambio de coloración de verde a rojo en los nodos no suberizados, respecto a esto, Hansen (1974) menciona que la acumulación en exceso de cloruro reduce el consumo de fosfato y nitrato, resultando en un color rojizo, así mismo, menciona que diferentes especies de *Salicornia* requieren una concentración de entre 50 y 150 mM de NaCl para un crecimiento óptimo, sin embargo, en los techos verdes se observó un reverdecimiento y floración en el mes de junio, con lo cual se asume que las plantas se han adaptado a las condiciones del techo verde. Un análisis más detallado de diferentes parámetros del agua permitiría un mejor entendimiento de la fenología de las plantas.

**Tabla 5.** Alturas máximas y mínimas de las plantas por especie, en 3 meses del periodo experimental.

Especie/Alturas	Octubre	Febrero	Junio
<i>Sedum acre</i>	 2 - 4 cm	 3 - 5.5 cm	 1.5 - 2.6 cm
<i>Salicornia pacifica</i>	 6 - 13.5 cm	 2 - 37.5 cm	 9 - 48 cm



**Figura 9.** Plagas en el techo con *S. acre* (TSe), a) Mosca del sustrato (Sciariidae) y b) *Planococcus citri*.

#### 4.1.2 Cobertura

La cobertura mensual se muestra en la tabla 6. Se observó que desde su colocación en los techos en octubre y hasta diciembre, las dos especies presentaron una disminución en la cobertura, sin embargo, a partir de enero incrementó nuevamente. Esto puede atribuirse al periodo de aclimatación durante el establecimiento de las plantas a las condiciones del techo verde. Varios autores consideran que el periodo de establecimiento presenta una duración de entre 6 semanas (Dvorak & Volder, 2012; Rayner *et al.*, 2016) y 12 semanas (VanWoert *et al.*, 2005), e incluso algunos mencionan un periodo de hasta dos años (Getter & Rowe, 2006) durante el cual la irrigación es necesaria para el éxito del techo verde (Getter & Rowe, 2006; Van Mechelen *et al.*, 2015b), por lo cual las plantas de este estudio estarían durante este período de aclimatación al nuevo ambiente del techo verde.

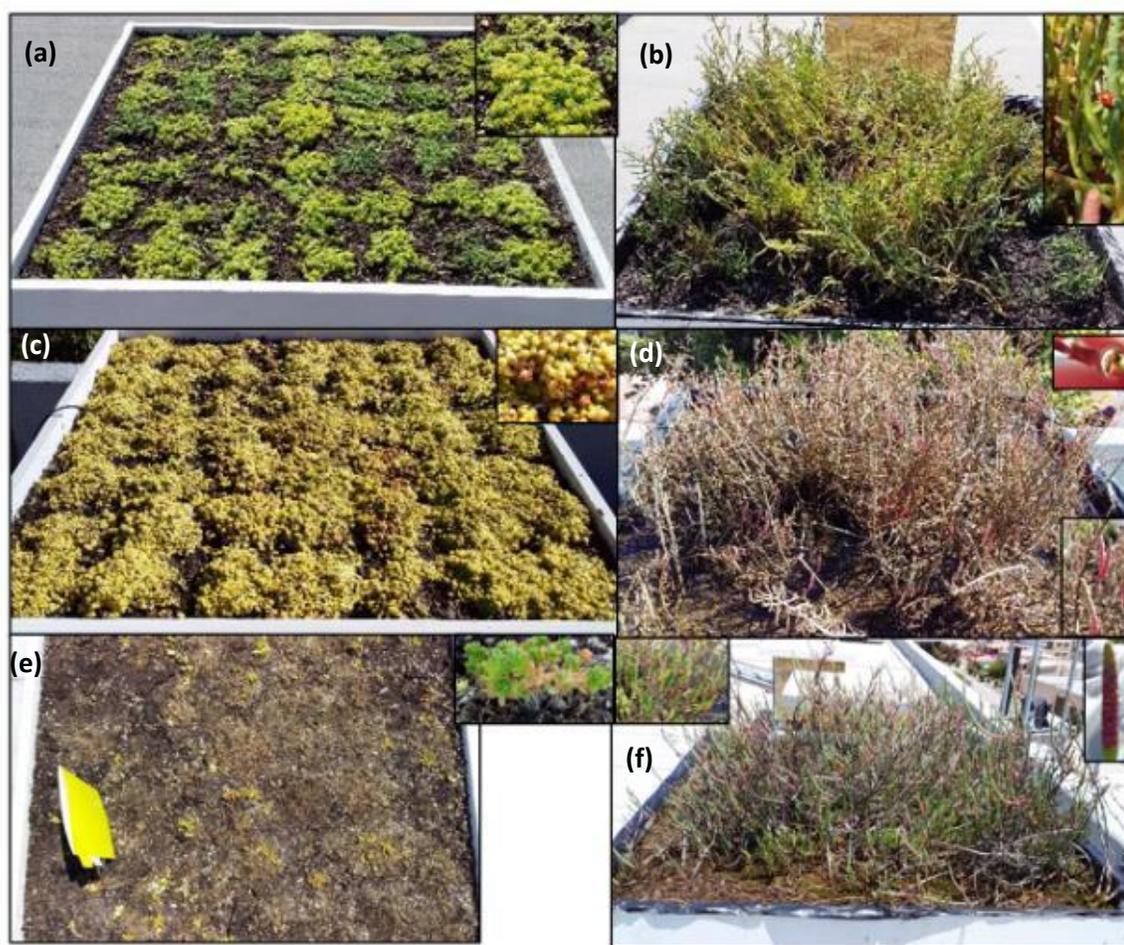
Posteriormente *S. acre*, a pesar de ser una especie tolerante al estrés (Thuring & Dunett, 2019), disminuyó en gran medida su cobertura por las razones mencionadas en la sección 4.1.1.; así mismo, Tan *et al.* (2017) reportan que después de un periodo con irrigación suspendida, las plantas no se recuperan rápidamente en cuanto a cobertura. Dentro de las causas de la mortalidad en plantas, McDowell *et al.* (2008) mencionan una cadena de eventos que comienza con eventos de sequía, causando disfunción hidráulica, seguidos por carencia de carbohidratos y agotamiento de reservas de carbono, que limitan la producción de metabolitos secundarios defensivos, desencadenando susceptibilidad al ataque biótico por patógenos y herbívoros (McDowell *et al.* 2008). Debido al evento súbito de sequía ocasionado por el paro de actividades por la contingencia sanitaria COVID-19 de 2020, es probable que *Sedum acre* haya pasado por esta cadena de eventos.

Por el contrario *S. pacifica* permaneció en buen estado e incluso presentó germinación de semillas, desarrollo de tejidos suculentos y floración, en concordancia con lo reportado en la literatura para esta

especie (ver sección 3.2.3.). Cabe mencionar que la cobertura no alcanzó el 100% durante el periodo experimental, alcanzando su promedio máximo en marzo para *S. acre* (65.39%) y en junio para *S. pacifica* (62.36%); la figura 9 muestra la cobertura de las plantas tras la colocación de los techos verdes, a mitad del experimento en febrero y al finalizar el experimento en junio.

**Tabla 6.** Porcentaje de cobertura mensual de *S. acre* y *S. pacifica*.

Especie / Cobertura mensual(%)	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
<i>Sedum acre</i>	57.18	45.48	39.48	52.18	50.80	65.39	53.40	38.02	11.00
<i>Salicornia pacifica</i>	43.00	35.80	28.88	36.28	39.26	55.05	61.14	56.01	62.36



**Figura 10.** Cobertura de *S. acre* (izq) y *S. pacifica* (der) al inicio (a, b), a la mitad (c, d) y al final (e, f) del periodo experimental.

Es relevante mencionar que la cobertura de las plantas es importante para reducir las fluctuaciones de temperatura de los techos verdes, respecto a lo cual Tan *et al.* (2017) observaron que la diferencia de temperatura en un techo verde con mayor cobertura comparado con un techo verde menos denso fue de 5.4°C. Así mismo, Yaghoobian & Srebric (2015) mencionan que, debido a los efectos de sombreado de las plantas, la radiación solar recibida por la superficie de un sustrato completamente cubierto es hasta 83% menor que en un sustrato sin cobertura dependiendo de la densidad de éstas.

Por otra parte, la inclusión de una capa de retención de agua en el diseño de los techos verdes podría considerarse en un estudio posterior para reducir el estrés hídrico en periodos prolongados sin irrigación, y así mantener una buena cobertura de las plantas. La capa de retención de agua conserva las condiciones de humedad del suelo y es efectiva de acuerdo con Tan *et al.* (2017).

Un punto adicional por considerar es que *Salicornia pacifica* es una especie nativa que aún no es cultivada o domesticada para su producción. Sin embargo, es posible considerar que se puede desarrollar la tecnología para su cultivo masivo, aprovechando que su óptimo de crecimiento es en sitios inundables, con salinidades altas. Por ejemplo, la especie congénérica *S. bigelovii* ya es aprovechada comercialmente para producción de alimentos. Al mismo tiempo, mantuvo su condición a pesar de la presencia de plagas que disminuyeron sustancialmente la cobertura de *Sedum acre*, lo que indica que puede ser un buen candidato para techos verdes extensivos combinados con sustratos inundados como techos estanque.

#### 4.1.3 Biomasa

La biomasa de las plantas se midió en una única ocasión (17 de marzo), y los valores obtenidos se muestran en la tabla 7, donde se observa que cuando las plantas se encuentran hidratadas, *S. pacifica* presenta un valor de 3.62 g/cm<sup>2</sup>, que es ligeramente mayor que el de *S. acre* (3.54 g/cm<sup>2</sup>), así mismo *S. pacifica* presentó un valor de biomasa seca total 5.32 veces mayor que *S. acre*.

También debe mencionarse que las dos especies presentaron diferencias en la traslocación de recursos entre los diferentes órganos. Mientras que *Sedum acre* invirtió principalmente recursos en tejido foliar, *S. pacifica* tuvo una mayor cantidad de inversión en tejidos de soporte, disminuyendo la cantidad de tejido fotosintético. Debido a que *S. pacifica* presentó tejidos suberizados, la producción de biomasa se vio afectada por una disminución en el tejido fotosintético comparado con su estado habitual. Respecto a lo cual Schile *et al.* (2011) mencionan que un incremento en las tasas de inundación puede disminuir la

producción de biomasa en las plantas de humedal, además de las condiciones de estrés osmótico y el estrés en general ocasionado tras su colocación en los techos verdes que causaron la suberización. Así mismo, Warne (1971) menciona que *S. pacifica*, a pesar de ser perenne, no es vigorosa en los meses fríos, que representan parte del periodo experimental.

En cuanto al efecto de la biomasa en los techos verdes, se sabe que la cantidad y complejidad de la biomasa tienen una gran influencia en la disminución de las fluctuaciones de temperatura y el consumo energético (Hashemi *et al.*, 2015). Con base en un estudio experimental, Jim (2012) menciona que la cantidad y complejidad estructural de la biomasa presentan un rol crucial en las funciones de enfriamiento pasivo, así mismo, el tipo de vegetación presenta variaciones en las temperaturas del aire a diferentes alturas y en los efectos obtenidos, donde arbustos y tapizantes presentan una estructura en su biomasa más compleja y crean un enfriamiento pasivo por discontinuidades térmicas en los bordes, mientras que los pastos con estructuras más simples permanecen con temperaturas cercanas a la del aire. El autor concluye que, para reducir la ganancia de calor dentro de los edificios es importante contar con una vegetación continua y vigorosa.

**Tabla 7.** Biomasa aérea, subterránea y total por especie. Los superíndices 1 y 2 indican el peso húmedo y seco, respectivamente.

	Biomasa (g/cm <sup>2</sup> )		
	Aérea	Subterránea	Total
<i>S. acre</i> <sup>1</sup>	3.2350	0.3069	3.5419
<i>S. pacifica</i> <sup>1</sup>	2.6944	0.9339	3.6283
<i>S. acre</i> <sup>2</sup>	0.1944	0.0316	0.2260
<i>S. pacifica</i> <sup>2</sup>	1.0059	0.1963	1.2022

#### 4.1.4 Densidad volumétrica del sustrato

La densidad del sustrato se midió el 4 de marzo y los valores obtenidos se reportan en la tabla 8, donde se observa que el techo con *S. acre* (TSe) presentó el valor más bajo (0.1786 g/cm<sup>3</sup>), mientras que el techo con tierra húmeda (TH) presentó el valor más alto (0.6663 g/cm<sup>3</sup>). Así mismo, los valores del techo con tierra seca (TS) y TSe son similares entre sí, lo cual se atribuye a que ambos poseen en su totalidad un sustrato de propietario (con una composición determinada por una persona en particular) ligero. En relación con esto, Tan *et al.* (2017) mencionan que por su composición los sustratos de propietario tienden

a ser más ligeros que los convencionales y poseen mejor retención de agua y capacidad de aireación, características que les confieren atributos variables en el techo verde comparados con el uso de tierra de jardinería.

Por otro lado, el valor alto en la densidad de TH ( $0.6663 \text{ g/cm}^3$ ) se asoció con la compactación del sustrato, este valor es casi tres veces mayor comparado con el del techo con *S. pacifica* (TSa) ( $0.2507 \text{ g/cm}^3$ ), que posee la misma composición del sustrato, sin embargo, la diferencia se debe a que las raíces de *S. pacifica* poseen la capacidad de oxigenar el sustrato por ser plantas de humedal (Hansen & Weber, 1975), evitando así la compactación. Similarmente, Taiz *et al.* (2015) menciona que la presencia de materia orgánica en el sustrato favorece la formación de agregados en suelos arcillosos mejorando la aireación y la infiltración de agua en el suelo.

Taylor & Brar (1991) mencionan que los cambios en la compactación del suelo afectan indirectamente el desarrollo de las raíces de las plantas a través de los cambios en el arreglo estructural y patrón de agrietamiento, la resistencia del suelo, la porosidad total, número de poros grandes, contenido volumétrico de agua, conductividad hidráulica, espacios de aire y tasa de difusión de gas, los cuales afectan la captación de agua y nutrientes por las raíces.

La densidad y compactación del sustrato afectan la transferencia de calor por que determinan el grado de proximidad de las partículas de suelo entre sí y la cantidad y tamaño de los espacios entre las partículas que son ocupados por aire o agua. Un menor grado de compactación y densidad mejora las propiedades aislantes del sustrato (Del Barrio, 1998), por la conductividad baja del aire ( $0.026 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ , Çengel, 2002). Y un sustrato con mayor grado de compactación o agregación disminuye la capacidad de retención de agua e incrementa la densidad volumétrica y la transferencia de calor, debido a que la difusividad y conductividad térmica incrementan con la compactación (Horn *et al.*, 1994; Tan *et al.*, 2017).

Así mismo, la compactación del suelo se relaciona principalmente con la textura y se produce cuando el contenido de arcilla es mayor al 15%; además de otros factores como son los procesos de secado e hinchazón, las actividades biológicas, y las propiedades del suelo como el pH y la presencia de materia orgánica, óxidos de hierro e hidróxidos de aluminio, que determinan la naturaleza de las fuerzas cohesivas entre los constituyentes del suelo (Horn *et al.*, 1994; Assouline *et al.*, 1997).

**Tabla 8.** Densidad volumétrica del suelo ( $\text{g/cm}^3$ ) en los techos verdes con tierra seca (TS), tierra húmeda (TH), *Salicornia pacifica* (TSa) y *Sedum acre* (TSe).

	Peso húmedo promedio ( $\text{g/cm}^3$ )	Peso seco promedio ( $\text{g/cm}^3$ )
<b>TS</b>	0.7144 $\pm$ 5.44	0.1893 $\pm$ 0.17
<b>TH</b>	1.3627 $\pm$ 6.85	0.6663 $\pm$ 2.3
<b>TSe</b>	0.4445 $\pm$ 4.56	0.1786 $\pm$ 1.3
<b>TSa</b>	1.1386 $\pm$ 5.21	0.2507 $\pm$ 2.51

## 4.2 Variables térmicas

Las variables de transferencia de calor analizadas permiten observar y comparar el comportamiento térmico de los techos ya que, dependiendo de las condiciones ambientales, se presenta un efecto aislante o refrescante en los techos verdes que varía entre temporadas del año y también diariamente. Respecto a estos efectos, Porcaro *et al* (2019) mencionan que los techos verdes disminuyen la pérdida de energía en invierno y mantienen una temperatura interior agradable en verano. Además, He *et al.* (2016) mencionan que los techos verdes actúan como sumideros de calor durante el día y como fuente de calor durante la noche, mientras que en techos tradicionales es lo opuesto.

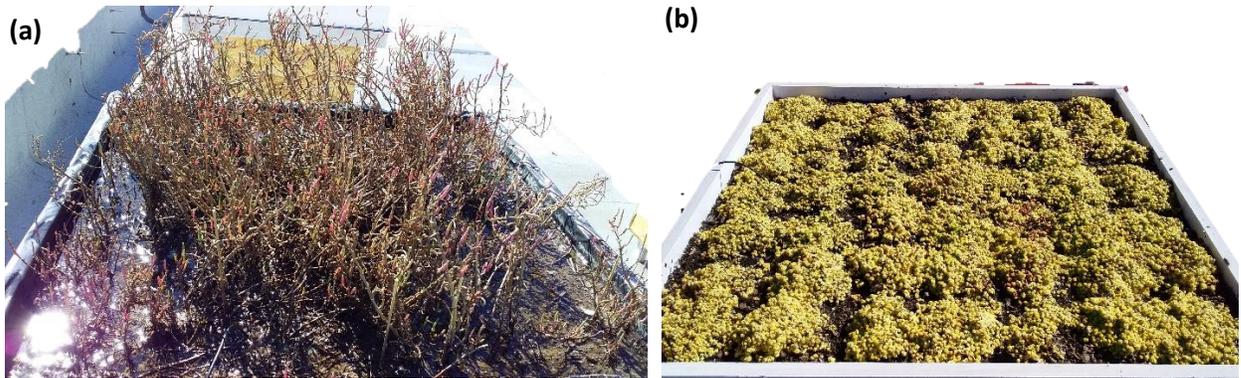
Se monitorearon las temperaturas de los techos desde el 24 de enero hasta el 13 de mayo del año 2020. Se eligieron la semana más fría y la más cálida del periodo muestreado para evaluar el comportamiento térmico de los techos y determinar el tratamiento con mayor eficiencia en cuanto a transferencia de calor. En la tabla 2 se muestra la temperatura y velocidad del aire ambiente, así como la irradiación solar máxima, mínima y promedio de los meses estudiados. En las siguientes secciones se presentan los resultados de la semana más fría, que va del 3 al 10 de febrero, y posteriormente los de la semana más cálida que va del 22 al 29 de febrero.

### 4.2.1 Semana fría

#### 4.2.1.1 Comportamiento térmico

Para evaluar el comportamiento térmico de los techos se presenta una comparación entre la temperatura del aire ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ), las temperaturas promedio en la superficie interna ( $T_{\text{s,int}}$ ) y externa ( $T_{\text{s,ext}}$ ) de la

placa de concreto de los 6 techos y la temperatura al interior de los módulos de prueba ( $T_{int}$ ), así mismo se muestra la radiación solar ( $G$ ) y velocidad del viento ( $V$ ) correspondientes al periodo de prueba.



**Figura 11.** Los techos TSa (a) y TSe (b) durante la semana fría.

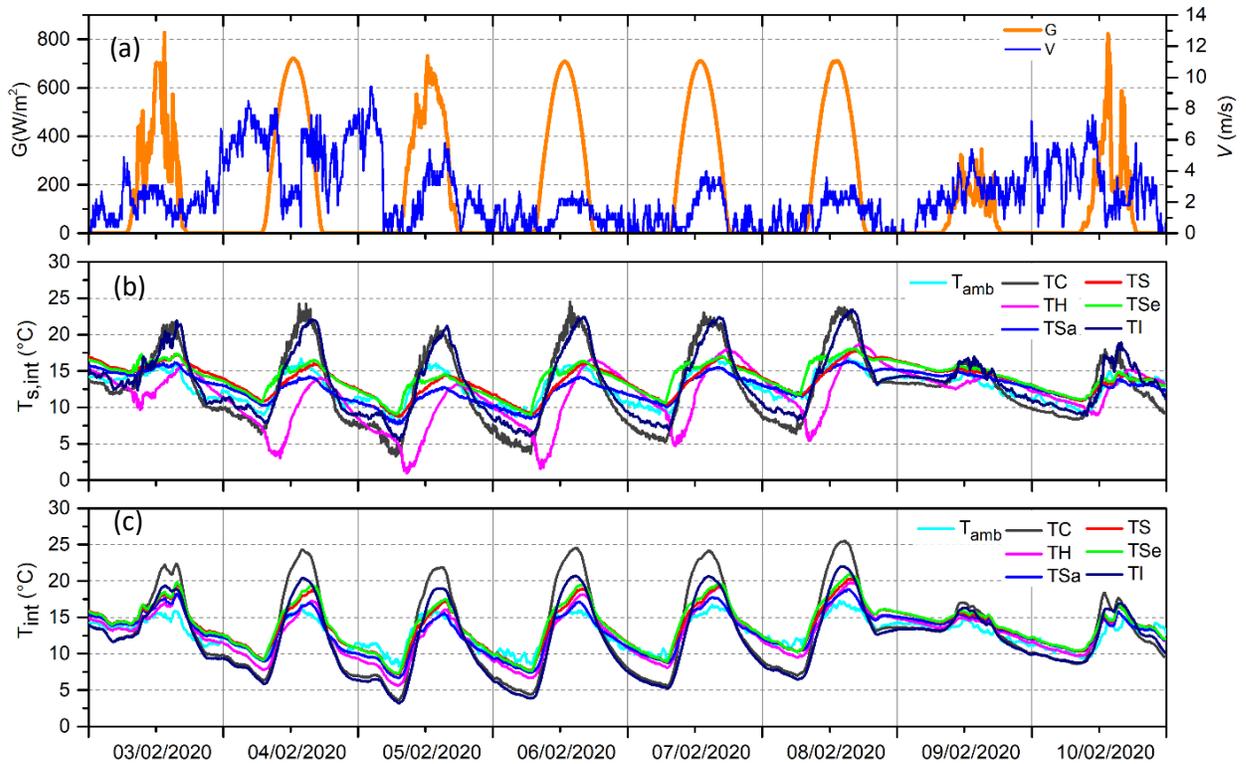
La figura 12 muestra las mediciones de las variables mencionadas en el párrafo anterior para la semana más fría, cabe mencionar que las  $T_{s,ext}$  no se incluyeron en la figura 12 debido a que no proveen información significativa sobre los beneficios térmicos de los techos verdes ya que las tendencias de las curvas son muy parecidas (similar a lo mencionado por Pianella *et al.*, 2017).

En la figura 12a se observa la radiación solar y la velocidad del viento; el valor más alto de irradiancia fue de  $828 \text{ W/m}^2$  el 3 de febrero, mientras que la velocidad del viento presentó su máximo valor el 5 de febrero con un valor de  $9.4 \text{ m/s}$ . Debido a la nubosidad, el día con menor radiación fue el 9 de febrero, por lo tanto, las fluctuaciones de temperatura de los techos fueron menores ese día. Durante este periodo la  $T_{amb}$  se mantuvo en un intervalo entre  $8.3^\circ\text{C}$  y  $17.3^\circ\text{C}$ , y para el día más frío la  $T_{amb}$  máxima fue de  $16^\circ\text{C}$ .

Por su parte, la figura 12b muestra las  $T_{s,int}$  de los 6 módulos experimentales y la  $T_{amb}$ . Se aprecia que el TC presenta  $T_{s,int}$  hasta  $44.5\%$  ( $10.9^\circ\text{C}$ ) más altas que los techos verdes durante el día, con un valor máximo de  $24.5^\circ\text{C}$  alrededor de las  $13:40 \text{ h}$ , aproximadamente en el mismo horario en que la radiación solar se encuentra al máximo; mientras que durante la noche las  $T_{s,int}$  del TC llegan a  $3.2^\circ\text{C}$ , por lo tanto, está hasta  $51.4\%$  ( $5.6^\circ\text{C}$ ) por debajo de los módulos con techos verdes (TSa y TSe). También, se observa que el TI tiene un comportamiento térmico similar a TC, con una  $T_{s,int}$  máxima de  $23.4^\circ\text{C}$  aproximadamente a la misma hora en que se presentan las temperaturas máximas de TC. Además, TI presenta  $T_{s,int}$  hasta  $40.5\%$  ( $8.5^\circ\text{C}$ ) mayores que los techos verdes durante el día y  $40.7\%$  ( $5.6^\circ\text{C}$ ) menores durante la noche. Similarmente,

Gagliano *et al.* (2015) encontraron que, comparado con un techo reflectivo, un techo verde sin y con aislamiento presenta temperaturas menores en la superficie interna del techo. Lo anterior muestra que los techos con menor masa térmica (TC y TI) son más susceptibles a las condiciones climáticas, ya que durante el día sus temperaturas incrementan a medida que incide la radiación solar y por la noche, en ausencia de radiación solar, disminuyen rápidamente. Por otro lado, se observa que la  $T_{s,int}$  de TH y TS muestran valores entre 0.95 y 18.68 °C, lo cual representa una reducción considerable respecto a TC; por lo tanto, los valores máximos de  $T_{s,int}$  para TH y TS son hasta 41.9% (10.1 °C) y 33.9% (8.2 °C) menores que el valor máximo de TC. Además, se observa que los valores máximos de TH y TS están retrasados por hasta 3.41h y 2.67h respecto al valor máximo de TC. Lo anterior se debe a que las diferentes capas que forman TH y TS incrementan la capacidad de almacenar calor de los mismos y, a su vez, disminuyen su difusividad térmica; principalmente la capa de sustrato y agua, que poseen mayor capacidad para almacenar calor e incrementan la masa térmica del sistema de techo verde. Asimismo, la  $T_{int}$  de TH y TS muestra una tendencia similar a  $T_{s,int}$ , de tal manera que el sustrato húmedo o seco disminuye y retrasa el efecto de las condiciones climáticas sobre el interior de los techos, lo cual es acorde a los resultados reportados por otros autores como Porcaro *et al.* (2019) que mencionan que mientras mayor sea el contenido de humedad del sustrato mayor será la reducción en las oscilaciones de temperatura con un retraso de hasta 6.08 h en alcanzar las temperaturas superficiales máximas.

En la figura 12c se muestran las  $T_{int}$  de todos los módulos, las temperaturas máximas de TC, TI, TSa, TSe y  $T_{amb}$  son de 25.4, 22, 18.8, 20.8 y 17.3 °C, respectivamente. Se observa que el TC y el TI presentaron las oscilaciones de temperatura mayores, con una diferencia en sus valores máximos de 47.2% (8.1°C) y 27.1% (4.7°C) respecto a la  $T_{amb}$  durante el día, así como un retraso de 0.83 h y 0.66 h, respectivamente. Por su parte, las  $T_{int}$  de TSa y TSe presentan una diferencia máxima de 8.9% (1.5°C) y 20.6% (3.5°C) respecto a la  $T_{amb}$  durante el día, así como un retraso de 1.5 y 1.75h entre los valores máximos y la  $T_{amb}$ , respectivamente. Estos resultados demuestran que los techos verdes efectivamente reducen y retrasan las fluctuaciones de temperatura, por lo que es evidente que presentan el mejor comportamiento térmico. Resultados similares en clima mediterráneo se reportan por otros autores, como Olivieri *et al.* (2013) y Porcaro *et al.* (2019).



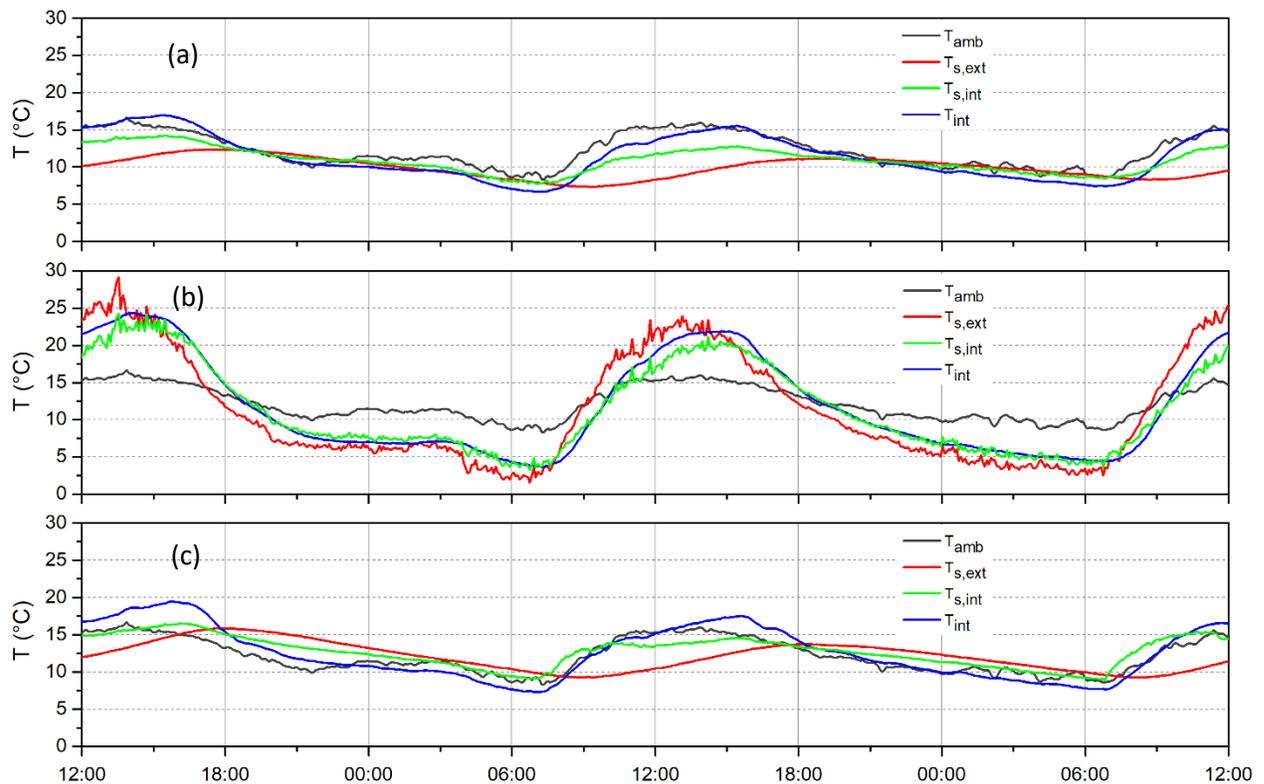
**Figura 12.** Comparación de  $T_{s,int}$ ,  $T_{int}$ ,  $T_{amb}$ ,  $G$  y  $V$  entre tratamientos durante la semana más fría.

Debido a que se observó que los techos verdes presentaron un mejor comportamiento térmico que los demás techos, y con el objetivo de mostrar sus resultados con más detalle, en la figura 13 se presentan las temperaturas de la superficie externa e interna de las losas de concreto ( $T_{s,ext}$ ,  $T_{s,int}$ ), la  $T_{int}$  y la  $T_{amb}$  para a) TSa, b) TC y c) TSe durante el día más frío del periodo muestreado (5 de febrero), también se presenta toda la noche anterior y posterior a este día. A simple vista se observa que la temperatura superficial y las fluctuaciones de temperatura de un techo de concreto se reducen significativamente en la presencia de un techo verde, en concordancia con lo reportado por otros autores (Tan *et al.*, 2017; He *et al.*, 2016).

En la figura 13a se presentan las temperaturas de TSa, se observa que durante las horas en las que la  $T_{amb}$  es más alta ( $16^{\circ}\text{C}$ ), la  $T_{s,ext}$  es hasta  $6.6^{\circ}\text{C}$  menor; además, se aprecia que la  $T_{s,int}$  y la  $T_{int}$  presentan sus valores máximos aproximadamente en el mismo horario ( $\approx 15:20\text{h}$ ), con valores de  $15.5$  y  $12.8^{\circ}\text{C}$  respectivamente, y están desfasados  $1.5\text{h}$  respecto al máximo de la  $T_{amb}$ . Mientras que cuando la  $T_{amb}$  es más baja ( $8.3^{\circ}\text{C}$ ), las  $T_{int}$  de TSa son ligeramente menores ( $1.6^{\circ}\text{C}$ ). El comportamiento observado se atribuye a que el sustrato permanentemente inundado incrementa su capacidad de almacenar energía y, a su vez, reduce la rapidez con la que se difunde el calor a través del techo, debido a que el agua posee una capacidad calorífica alta ( $4,183 \text{ J/kgK}$  a  $20^{\circ}\text{C}$ , Dincer & Zamfirescu, 2016) y difusividad térmica baja ( $0.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $20^{\circ}\text{C}$ , Çengel, 2002).

En la figura 13b se observa que la  $T_{s,ext}$  del TC presenta una diferencia de  $7.2^{\circ}\text{C}$  y  $5.6^{\circ}\text{C}$  respecto a la  $T_{amb}$  en las horas más cálidas y frías del día, respectivamente; además, las  $T_{s,int}$  y  $T_{int}$  presentan sus valores máximos a la misma hora (14:13h) con valores de  $21.8$  y  $21.1^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, y están desfasados 20 min respecto al máximo de la  $T_{amb}$ . Por lo tanto, se aprecia claramente que el concreto expuesto al exterior es más sensible a los flujos de energía del ambiente, principalmente debido a que su baja reflectividad (0.33, Xamán *et al.*, 2017) le permite absorber  $\approx 70\%$  de la radiación solar incidente que, posteriormente, se conduce al interior a través del concreto.

La figura 13c presenta la  $T_{s,ext}$ ,  $T_{s,int}$  y  $T_{int}$  del TSe, es importante mencionar que, a diferencia del TSa, la  $T_{int}$  alcanza valores por encima de la  $T_{amb}$  durante el día ( $T_{int}=17.5^{\circ}\text{C}$ ) y un retraso de 1.67 h entre los valores máximos  $T_{amb}$  y  $T_{int}$ . El retraso de tiempo es mayor que en TSa y se atribuye principalmente a la baja conductividad y difusividad térmica del sustrato del TSe causado por una mayor cantidad de espacios de aire en él (Ochsner *et al.*, 2001; Azeñas *et al.*, 2018), así como a las pérdidas convectivas y radiativas (He *et al.*, 2016).



**Figura 13.** Comparación de temperaturas ( $T_{amb}$ ,  $T_{s,ext}$ ,  $T_{s,int}$ ,  $T_{int}$ ) durante la noche anterior al día más frío (12:00 a 00:00 h), el día más frío (00:00 a 00:00 h) y la noche posterior (00:00 a 12:00 h), para los módulos con a) TSa, b) TC y c) TSe.

#### 4.2.1.2 Flujos de calor y cargas térmicas

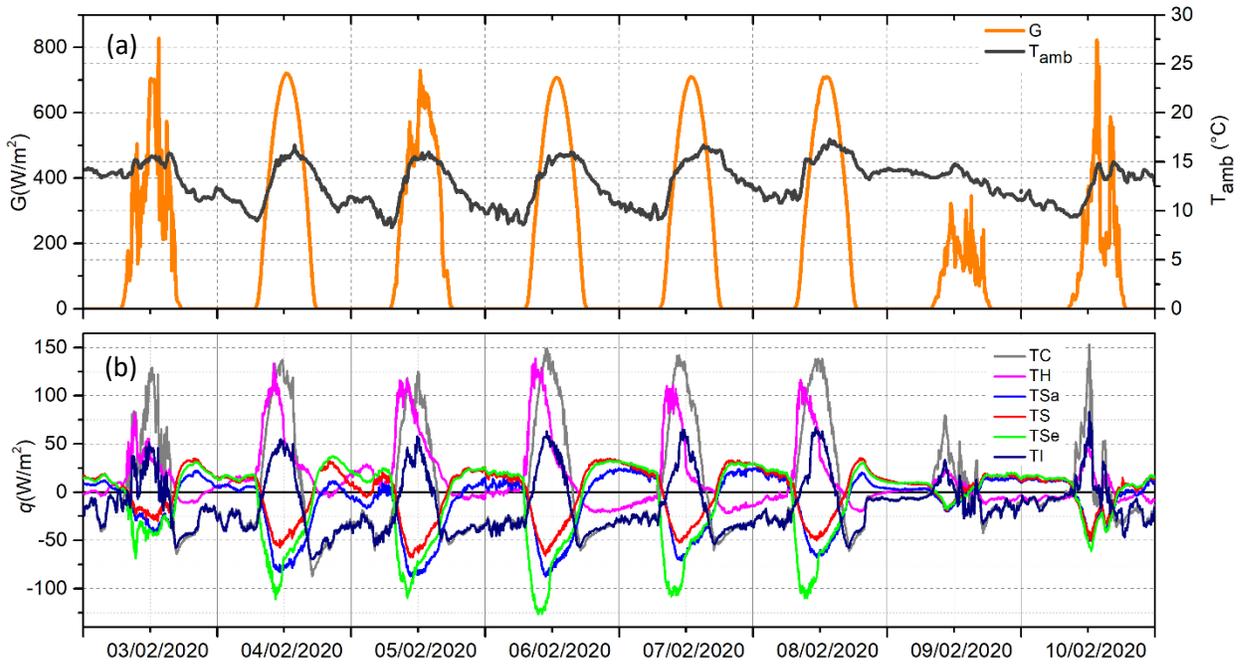
Los valores del flujo de calor representan la ganancia o pérdida de energía a través del componente de la edificación que se está estudiando, que es el techo. Los valores positivos indican que flujo de calor va desde el exterior hacia el interior del módulo experimental, mientras que los valores negativos indican que el flujo va desde el interior del módulo hacia el exterior.

La figura 14 muestra el comportamiento de la  $G$ , la  $T_{amb}$  y el flujo de calor por unidad de área ( $q$ ) a través de los techos estudiados. En general, se aprecia que los valores máximos y mínimos del  $q$  se presentan durante las horas con mayor cantidad de radiación solar incidente (entre las 12:00 y 14:00 h). En la figura 14b se puede observar que cerca del mediodía y durante las horas de radiación solar, los valores del  $q$  en los TC, TI y TH son positivos, por lo tanto, en esos momentos los módulos ganan calor por la radiación solar principalmente (He *et al.*, 2016) y lo conducen a través del techo hacia el interior del módulo; mientras que los TSa, TSe y TS tienen valores negativos, lo cual indica que los módulos están cediendo calor hacia el sustrato, que actúa como un sumidero de calor (He *et al.*, 2016), o hacia el exterior. El sentido del  $q$  cambia en la tarde, cuando cambian las condiciones del ambiente (menor  $G$  y  $T_{amb}$ ) y el sustrato intenta liberar la energía que almacenó, y se mantiene en este sentido durante toda la noche; además de que los valores del  $Q$  son más bajos. Un comportamiento similar en los flujos de calor se reporta por un estudio experimental de Olivieri *et al.* (2013) llevado a cabo en un clima costero mediterráneo. Además, se aprecia que TC presenta valores de  $q$  entre  $-86.9$  y  $153.2$   $W/m^2$ , mientras que para TSe y TSa los valores de  $q$  están entre  $-126.3$  y  $37.1$   $W/m^2$  y entre  $-87.7$  y  $25.3$   $W/m^2$ , respectivamente.

Cabe mencionar que en el TC la magnitud de los valores positivos es mayor que la magnitud de los negativos, por el contrario, en TSe y TSa la magnitud de los valores negativos es mayor que la de los positivos; Olivieri *et al.* (2013) atribuyen este comportamiento a la cobertura de las plantas, donde los valores negativos con mayor magnitud representan techos con mayor cobertura vegetal. Así mismo, TSe presenta valores negativos con mayor magnitud que los de TSa, porque presenta mayor cobertura.

También, se observa que los valores del  $q$  para TH y TS presentan un intervalo entre  $-21.7$  y  $138.7$   $W/m^2$  y entre  $-67.5$  y  $35.2$   $W/m^2$ , respectivamente; no obstante, se aprecia que el TC presenta valores más extremos que TH y TS. En relación con esto y de acuerdo con el análisis de la sección anterior, Pianella *et al.* (2017) mencionan que, comparado con un techo convencional, el sustrato por sí solo reduce considerablemente el flujo de calor a través del techo debido a que una mayor masa térmica provee un mejor efecto de enfriamiento. Por otra parte, se observa que el TI presenta valores entre  $-69.2$  y  $83.1$

$W/m^2$ , que son menores que los valores del TC, por lo que presenta un efecto de enfriamiento del techo, sin embargo, el efecto de enfriamiento de los techos verdes es mayor que el del TI (He *et al.*, 2020).



**Figura 14.** Comportamiento del flujo de calor por unidad de área para todos los techos estudiados.

La carga térmica de una edificación está estrechamente relacionada con el flujo de calor a través de las componentes de la edificación, ya que ésta se refiere a la tasa a la cual se debe eliminar o añadir la energía de un espacio para mantener condiciones de confort térmico en el mismo; por lo tanto, dependiendo de las condiciones del ambiente y la energía a través de la envolvente, la carga térmica puede ser de calefacción o de enfriamiento cuando se añade o elimina energía, respectivamente. Para este estudio, se presenta únicamente la tasa a la cual se transfiere el flujo de calor a través de los techos para conocer el aporte de estos sobre la carga térmica y la diferencia entre ellos.

La tabla 9 muestra los valores de las cargas térmicas por hora y totales que aportan los 6 tratamientos durante el día más frío (5 febrero); cabe señalar que los signos positivo y negativo representan las ganancias y pérdidas de energía que incrementan las cargas térmicas de enfriamiento y de calefacción, respectivamente. En relación con ello, se aprecia que TC, TI y TH presentan ganancias de energía durante las horas de radiación solar, mientras que TSa, TS y TSe presentan un comportamiento contrario debido a la cobertura de las plantas y los espacios de aire en el sustrato que retrasan o atenúan el flujo de calor en los techos. Por el contrario, durante la noche TC, TI y TH presentan pérdidas de energía debido al

enfriamiento radiativo, mientras tanto TSa, TS y TSe muestran ganancias de calor hacia interior debido a la cantidad de energía acumulada en el sustrato; sin embargo, durante la madrugada solamente TH y TSe muestran ganancias de energía hacia el interior.

Por lo tanto, tomando en cuenta la variación de la temperatura ambiente a lo largo del día, TSe es el tratamiento que permite ganancias de energía que pueden ayudar a elevar la temperatura al interior durante la noche y la madrugada, mientras que durante el día podría contribuir con la reducción de la temperatura interior debido a las pérdidas de calor que presenta. Respecto al valor total de carga térmica durante el día, se observa que el TC presenta el valor más alto, 1,156.25 KW h/m<sup>2</sup>, por lo que es el que presenta el mayor aporte de energía; también, se observa que el TS presenta el valor más bajo con 566.30 KW h/m<sup>2</sup>; y respecto a los techos verdes estudiados, el TSa presenta menor aporte energético (697.36 KW h/m<sup>2</sup>). Similarmente, Garrison *et al.* (2007) y Olivieri *et al.* (2013) reportan una disminución en la carga térmica con el empleo de techos verdes. Además, Tan *et al.* (2017) mencionan que la cobertura de plantas en los techos verdes tiene consecuencias en el consumo de energía de las edificaciones porque afecta las propiedades del techo verde mediante la cantidad de sustrato expuesto a radiación solar.

Debido a que la tabla 9 muestra únicamente los valores de carga térmica aportada por los techos durante el día más frío, en la tabla 10 se presentan las ganancias de energía durante todos los días de la semana fría seleccionada. Se aprecia que el comportamiento de los techos durante la semana es similar a la tendencia durante el día más frío, ya que el TC aporta la mayor cantidad de energía (7869.52 KW h/m<sup>2</sup>) y el TS la menor cantidad (4025.86 KW h/m<sup>2</sup>); además, tanto la carga térmica de TH (4075.65 KW h/m<sup>2</sup>) como la de TSa presentan valores similares a la de TS, TSa es el techo verde con menor carga térmica (4201.84 KW h/m<sup>2</sup>). Se observa que TSa disminuye considerablemente la energía a través del techo, incluso en días nublados (03/02/2020, 09/02/2020 y 10/02/2020) cuando la carga térmica de TS es mayor que TSa, mientras que durante los días soleados (04/02/2020-08/02/2020) TSa presenta valores ligeramente por encima de TS; por lo tanto, la tasa de energía a través de TSa es apenas 175.98 KW h/m<sup>2</sup> mayor que la de TS.

**Tabla 9.** Cargas térmicas (KW h/m<sup>2</sup>) de los 6 tratamientos en el día más frío.

<b>T (H)</b>	<b>TC</b>	<b>TH</b>	<b>TSA</b>	<b>TS</b>	<b>TSE</b>	<b>TI</b>
<b>0:00</b>	-35.05	19.08	-6.63	6.60	19.97	-37.00
<b>1:00</b>	-29.08	22.22	-9.50	-2.57	16.70	-32.13
<b>2:00</b>	-24.73	27.13	-14.71	-3.35	11.48	-27.17
<b>3:00</b>	-32.56	24.43	-12.75	-2.00	11.92	-35.35
<b>4:00</b>	-50.81	12.44	-4.02	-10.95	18.35	-51.05
<b>5:00</b>	-44.32	8.64	3.48	-15.68	22.97	-45.61
<b>6:00</b>	-37.42	11.34	3.36	-13.91	21.58	-39.99
<b>7:00</b>	16.54	30.98	-5.58	-5.89	-12.45	-30.15
<b>8:00</b>	39.97	98.62	-29.98	-20.37	-71.59	7.94
<b>9:00</b>	83.71	102.87	-61.24	-46.45	-92.07	23.24
<b>10:00</b>	103.59	101.42	-83.21	-64.13	-99.79	35.64
<b>11:00</b>	97.19	78.25	-82.59	-60.45	-80.56	40.80
<b>12:00</b>	99.64	60.55	-82.77	-57.58	-71.58	42.37
<b>13:00</b>	74.23	46.17	-76.20	-48.42	-61.63	21.90
<b>14:00</b>	35.99	35.00	-67.52	-37.43	-52.14	3.72
<b>15:00</b>	-17.03	27.93	-58.13	-28.71	-42.88	-24.67
<b>16:00</b>	-42.72	13.78	-36.29	-9.87	-18.81	-42.26
<b>17:00</b>	-51.94	-3.60	-19.79	6.11	4.82	-48.42
<b>18:00</b>	-47.02	-3.08	-7.96	16.24	12.29	-44.44
<b>19:00</b>	-42.59	-2.58	-4.63	17.32	15.29	-41.55
<b>20:00</b>	-41.77	-6.21	4.04	23.40	21.48	-39.73
<b>21:00</b>	-36.09	-4.46	5.45	22.67	23.15	-35.74
<b>22:00</b>	-37.25	-4.68	7.02	22.80	23.15	-39.06
<b>23:00</b>	-35.02	-4.78	10.50	23.40	24.27	-36.39
$\int_{00:00}^{24:00}  q(t)  dt$	<b>1156.25</b>	<b>750.26</b>	<b>697.36</b>	<b>566.30</b>	<b>850.92</b>	<b>826.33</b>

**Tabla 10.** Cargas térmicas (KW h/m<sup>2</sup>) de los 6 tratamientos durante la semana más fría.

Día	TC	TH	TSa	TS	TSe	TI
<b>03/02/2020</b>	887.89	367.52	382.02	423.69	559.10	561.91
<b>04/02/2020</b>	1292.10	698.97	625.54	562.52	887.21	876.50
<b>05/02/2020</b>	1156.25	750.26	697.36	566.30	850.92	826.33
<b>06/02/2020</b>	1281.41	699.66	694.14	656.25	1031.63	838.68
<b>07/02/2020</b>	1175.97	604.02	680.72	641.60	972.18	741.90
<b>08/02/2020</b>	1097.27	566.21	599.78	568.59	903.68	666.04
<b>09/02/2020</b>	415.26	161.89	184.76	253.04	256.02	297.94
<b>10/02/2020</b>	563.37	227.12	337.53	353.86	428.12	400.32
$\int_{03/02}^{10/02} q(t) dt$	<b>7869.52</b>	<b>4075.65</b>	<b>4201.84</b>	<b>4025.86</b>	<b>5888.86</b>	<b>5209.62</b>

#### 4.2.1.3 Efecto de las plantas sobre el techo

Para conocer el efecto que tienen las plantas C<sub>3</sub> y CAM sobre el comportamiento térmico del techo se compararon las T<sub>s,int</sub>, T<sub>int</sub> y temperatura del sustrato (T<sub>s</sub>) entre los techos verdes y el techo con el sustrato correspondiente, es decir, se comparó el comportamiento térmico de TH con TSa y TS con TSe; además de las temperaturas de TSa y TSe comparadas con las del TC.

Se observó que el sustrato es un componente importante en los techos verdes debido a que es la capa con mayor espesor, además de que tiene influencia en el balance hidrológico, evapotranspiración, temperatura superficial y en las propiedades aislantes del techo verde, como mencionan Tan *et al.* (2017). Así mismo, las plantas proveen una importante reducción de la temperatura en días cálidos y aislamiento en los días fríos, debido a los procesos de evapotranspiración y fotosíntesis. Estudios previos (Yaghoobian & Srebric, 2015; Monteiro *et al.*, 2017) sugieren que aumentando el área cubierta por plantas irrigadas incrementa la evapotranspiración en días cálidos, con lo cual se presenta una reducción en el calor absorbido/ almacenado en el sustrato y una reducción en el calor que regresa a la atmósfera como calor sensible y radiación de onda larga que, a su vez, disminuyen las temperaturas. Mientras que en días fríos el sustrato contribuye a aumentar el aislamiento del techo (Castleton *et al.*, 2010; Olivieri *et al.*, 2013) y retrasar la pérdida de energía a través del techo.

La figura 15 muestra las T<sub>s</sub>, T<sub>s,int</sub> y T<sub>int</sub> para TSa y TH, así como la T<sub>amb</sub>. En primer lugar, en la figura 15a se

muestran las  $T_s$  de TH y TSa, donde se aprecia que las  $T_s$  máximas de TH son 14.3% (2.6°C) mayores que las de TSa, y presentan un retraso de 1.5h en alcanzar sus valores máximos. Esta diferencia se atribuye a que en TSa, las plantas reciben gran parte de la radiación solar, además de que *S. pacifica* provee sombra en gran parte del sustrato (cobertura de hasta 62.9%), la biomasa subterránea evita la compactación de éste y TSa presenta procesos de evapotranspiración por la presencia de la vegetación.

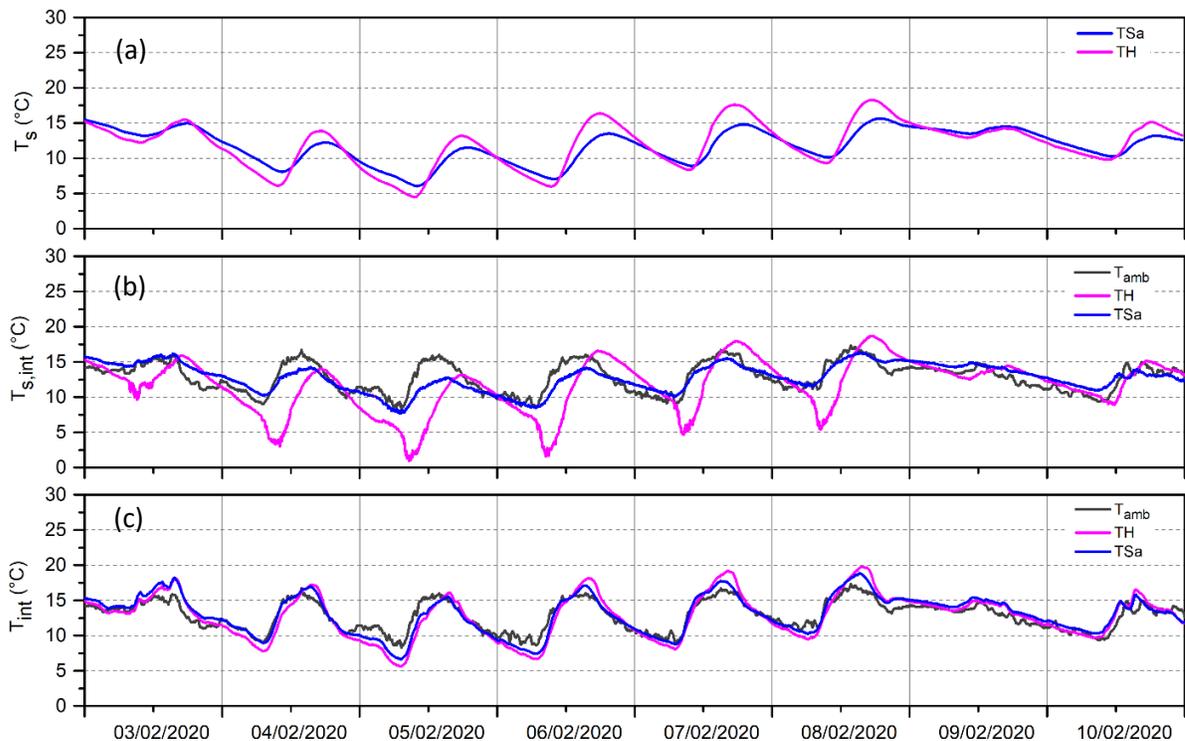
La figura 15b presenta las  $T_{s,int}$  con valores máximos de 16.4, 18.7 y 17.3°C para TSa, TH y  $T_{amb}$ , respectivamente. Se observa que las  $T_{s,int}$  de TSa son similares a la  $T_{amb}$ , con una diferencia porcentual entre sus valores máximos y mínimos del 5.4% (0.9°C) y 7% (0.6°C) y un retraso de 1.3h y 0.16h, respectivamente; mientras que la temperatura de TH difiere con la  $T_{amb}$  en sus valores máximos y mínimos en un 8% (1.4°C) y 88.5% (7.3°C) con un retraso de 3.6h y 1.4h, respectivamente; los valores mínimos de TH se presentan a las 8:40h en el día más frío muestreado (5 de febrero), mientras que para TSa se presentan a las 7:00h y la  $T_{amb}$  mínima se presenta a las 7:15h. Las diferencias en las temperaturas de TH y TSa con la  $T_{amb}$  se deben al agua contenida en el sustrato y a los procesos de transferencia de calor entre las plantas y el ambiente. Por su parte, el agua almacenada en el techo verde actúa como sumidero de calor durante el día (con un efecto aislante), almacenando calor proveniente de la radiación solar y liberándolo horas después, cuando la temperatura del ambiente es menor, ocasionando un desfase de tiempo entre las temperaturas máximas de los techos y de la  $T_{amb}$ . El comportamiento del agua en los techos verdes concuerda con lo reportado por Sharifi & Yamagata (2015) y Tan *et al.* (2017).

Por otra parte, durante el día las plantas absorben aproximadamente el 60% de la  $G$  y reflejan el resto, las plantas almacenan un porcentaje de la energía absorbida en reacciones metabólicas y disipan el resto por radiación, transpiración y por convección (dependiendo del viento puede ser mayor que la transpiración); y durante la noche, en la ausencia de  $G$ , la entrada de energía hacia las plantas es por radiación térmica y convección, mientras que la salida de energía es por radiación térmica (Gates, 1965). Lo anterior también explica el comportamiento de  $T_s$  de TH y TSa en la figura 15a.

Por último, la figura 15c muestra que las  $T_{int}$  de TH y TSa difieren en sus valores máximos un 14.2% (2.4°C) y 8.2% (1.5°C) respecto a la  $T_{amb}$ , respectivamente. Cabe mencionar que en TH y TSa, el calor ganado por la radiación solar es absorbido y almacenado por el agua antes de ser conducido al interior de una habitación; conforme el agua gana calor, su temperatura se eleva y cierta cantidad de agua se evapora causando un efecto de enfriamiento (Or *et al.*, 2013). Así mismo, durante la noche la  $T_{amb}$  es menor que la  $T_{int}$  causando que el flujo de calor vaya del interior al exterior, los *roof pond* atenúan este proceso y previenen la pérdida rápida de calor; durante la noche el *roof pond* se enfría por enfriamiento radiativo y

al día siguiente el agua fría funciona como sumidero de calor que absorbe el calor tanto al interior de una habitación como el calor por la radiación solar (Sharifi & Yamagata, 2015).

Mientras que en TH la radiación solar incide directamente sobre el sustrato y aumenta la temperatura del techo durante el día, posteriormente el calor es liberado al ambiente con mayor rapidez debido a la compactación del suelo y a la capacidad de almacenar calor del agua.



**Figura 15.** Comparación entre las  $T_{s,int}$ ,  $T_{int}$  y la  $T_s$  de los techos TH y TSa en la semana más fría.

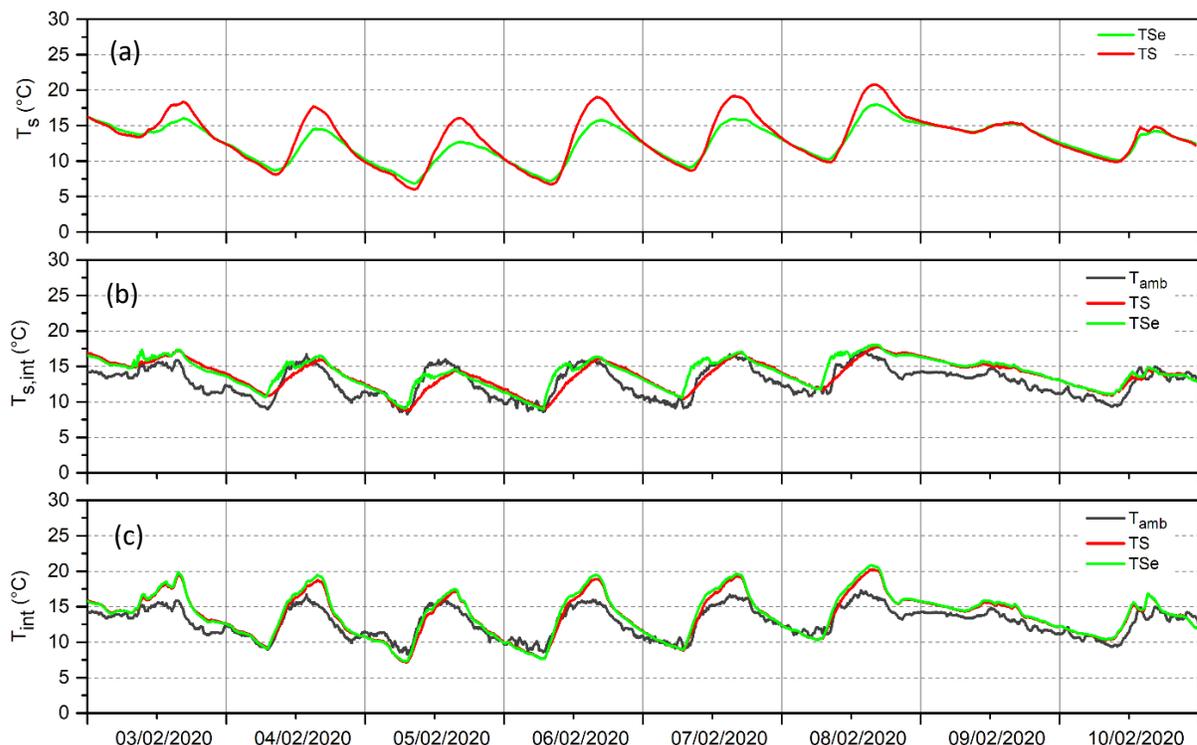
La figura 16 muestra las  $T_s$ ,  $T_{s,int}$  y  $T_{int}$  para TSe y TS, así como la  $T_{amb}$ . La figura 16a muestra las  $T_s$  de TS y TSe, donde se aprecia que las  $T_s$  máximas de TS son 15.5% ( $2.8^\circ\text{C}$ ) mayores que las de TSe, y presentan un retraso de 0.5h en alcanzar sus valores máximos. Esta diferencia se atribuye a que en TSe, las plantas reciben gran parte de la radiación solar y proveen sombra en gran parte del sustrato con una cobertura de hasta 73.5%. Mientras que en TS la radiación solar incide directamente sobre el sustrato y aumenta la temperatura del techo durante el día.

En la figura 16b se presentan las  $T_{s,int}$  de TSe, TS y la  $T_{amb}$ . Las  $T_{s,int}$  de TSe y TS son similares a la  $T_{amb}$ , con una diferencia porcentual máxima de 4.4% ( $0.7^\circ\text{C}$ ) y 2.9% ( $0.5^\circ\text{C}$ ) respecto a la  $T_{amb}$  y un retraso de 3.8h en ambos techos. La diferencia en las  $T_{s,int}$  máximas de TSe y TS es del 1.4% ( $0.25^\circ\text{C}$ ), de los cuales TSe presenta

la mayor temperatura ( $18^{\circ}\text{C}$ ). Así mismo, la figura 16c muestra las  $T_{\text{int}}$  de TSe, TS y la  $T_{\text{amb}}$ . Las  $T_{\text{int}}$  de TSe y TS difieren en sus valores máximos en un 20.6% ( $3.5^{\circ}\text{C}$ ) y 17.1% ( $2.9^{\circ}\text{C}$ ) con la  $T_{\text{amb}}$ , respectivamente.

En general se observa que el comportamiento térmico de TSe y TS es muy similar, sin embargo, tanto las  $T_{\text{s,int}}$  como las  $T_{\text{int}}$  de TSe son ligeramente mayores que las de TS. Este comportamiento se atribuye a que debido al metabolismo CAM de *Sedum acre*, la transpiración se presenta durante la noche y por lo tanto la pérdida de calor por transpiración durante el día está ausente; en relación con esto, Pianella *et al.* (2017) encontraron que un valor de resistencia estomática (SR) alto implica una temperatura de la superficie del sustrato hasta  $4^{\circ}\text{C}$  más alto debido a que un valor alto se relaciona con transpiración reducida y por lo tanto un menor efecto enfriador. Así mismo, durante el día las plantas absorben y almacenan una parte de la energía proveniente del sol (Gates, 1965) y reflejan y disipan el resto por radiación y convección únicamente.

Cabe mencionar que en TSe y TS se utilizó un sustrato de propietario, que como mencionan Tan y col. (2017) tiende a ser más ligero que los sustratos convencionales y poseen mejor retención de agua y capacidad de aireación, y también densidad baja, que como mencionan Del Barrio (1998) mejora las propiedades aislantes del sustrato como se observa en los resultados por las pocas diferencias en temperatura de los techos comparados con la  $T_{\text{amb}}$ .

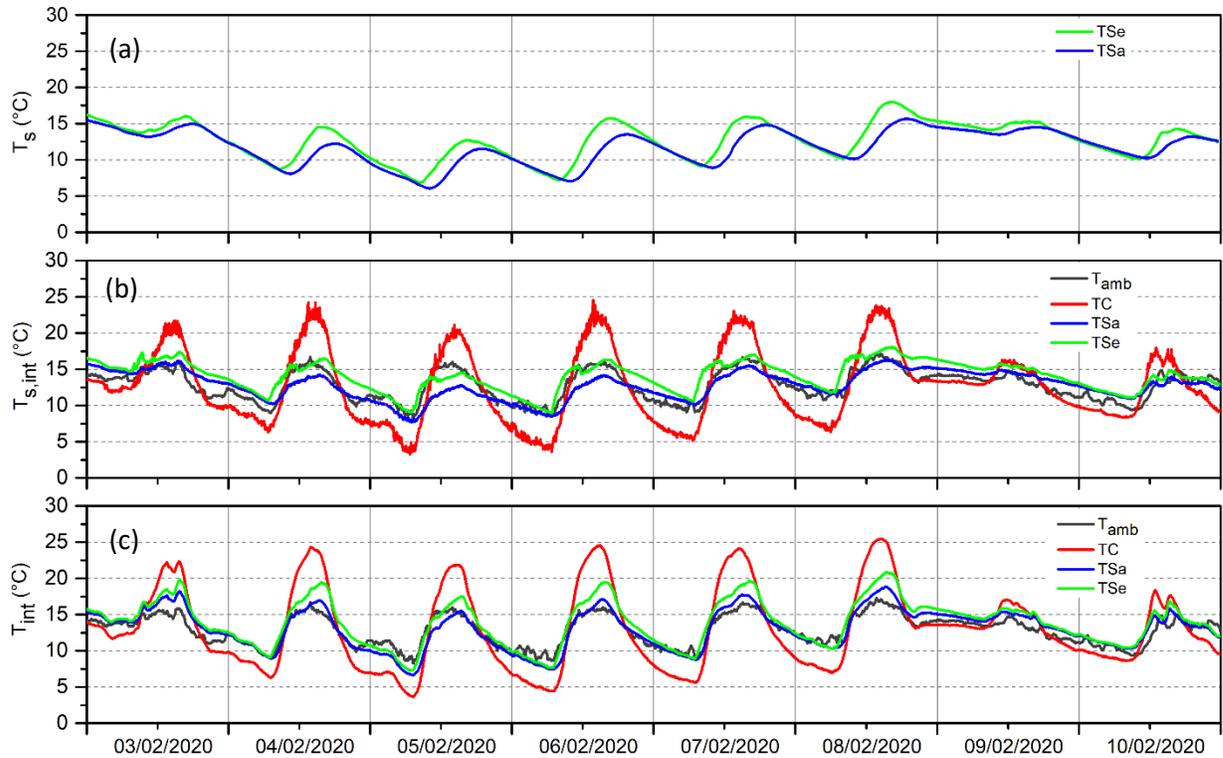


**Figura 16.** Comparación entre las  $T_{\text{s,int}}$ ,  $T_{\text{int}}$  y la  $T_{\text{suelo}}$  de los techos TS y TSe en la semana más fría.

Finalmente, para apreciar el comportamiento de los techos verdes respecto al techo control sin recubrimientos, en la figura 17 se presenta una comparación de las  $T_s$ ,  $T_{s,int}$  y  $T_{int}$  para TSe, T<sub>Sa</sub> y TC, además de la  $T_{amb}$ . La figura 17a muestra las  $T_s$  de TSe y T<sub>Sa</sub>, donde se aprecia que las  $T_s$  máximas de TSe son 12.9% (2.3°C) mayores que las de T<sub>Sa</sub>, y presentan un retraso de 2.5h en alcanzar sus valores máximos. Esta diferencia se debe a que *Salicornia pacifica* transpira durante el día por ser una planta de tipo C3, mientras que *Sedum acre* por ser CAM no presenta esta característica que es significativa en la regulación de la temperatura de las plantas; Gates (1965) menciona que en experimentos donde se cubren las hojas de las plantas de tomate (plantas C3) con una sustancia que evita que los estomas se abran, se observó que las hojas que transpiran tenían una temperatura hasta 5°C menos que las plantas con transpiración suprimida.

Cuando se compara el TC con los techos con plantas (T<sub>Sa</sub> y TSe), se puede observar que las oscilaciones de temperatura son mucho mayores cuando el techo se encuentra expuesto al ambiente. En la figura 17b se presentan las  $T_{s,int}$  de TSe, T<sub>Sa</sub>, TC y la  $T_{amb}$ ; se observa que los techos verdes reducen la temperatura del techo comparados con el concreto; ya que la  $T_{s,int}$  del TC presenta una diferencia máxima respecto a TSe y T<sub>Sa</sub> de hasta 37.7% (9.2°C) y 44.6% (10.9°C), respectivamente. Así mismo, TSe presenta una diferencia máxima del 30.1% (4.3°C) respecto a T<sub>Sa</sub>. Estas diferencias se atribuyen a que los techos verdes funcionan como una barrera contra la radiación solar, evitando que se eleve la temperatura del techo y amortiguando las fluctuaciones de temperatura, como reportan Chagolla- Aranda *et al.* (2017) y Ávila- Hernández *et al.* (2020). Por otra parte, T<sub>Sa</sub> además de los procesos de transferencia de calor entre las plantas y el ambiente, posee una mayor cantidad de agua en el sustrato, lo que le permite enfriarse por evaporación y radiación en mayor medida comparada con TSe, que posee un sustrato menos denso y con más espacios de aire.

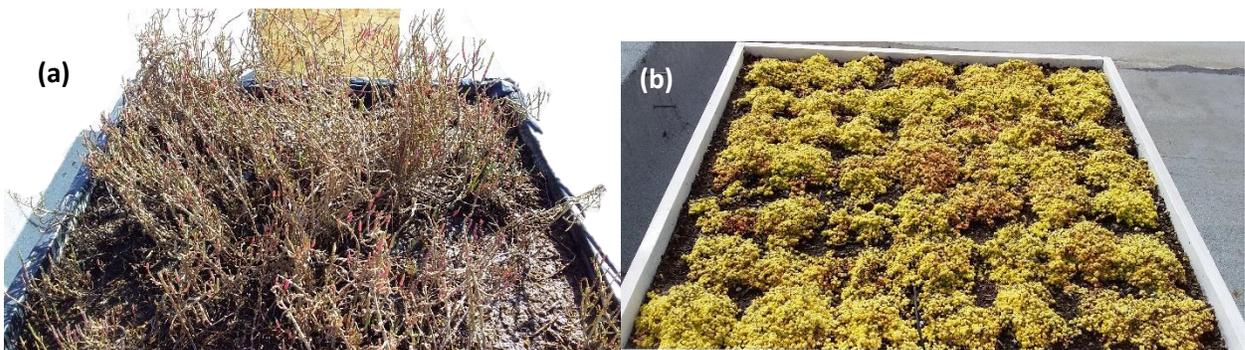
En cuanto a la  $T_{int}$  de los módulos la tendencia es la misma, la figura 17c muestra las  $T_{int}$  de TSe, T<sub>Sa</sub> TC y la  $T_{amb}$ . Se aprecia que la  $T_{int}$  del TC es mayor que la de TSe y T<sub>Sa</sub>, con una diferencia porcentual entre sus valores máximos del 18% (4.6°C) y 26% (6.6°C), respectivamente y un retraso de 55 y 40 min, respectivamente, mientras que TSe presenta una diferencia máxima del 16.6% (3.1°C) respecto a T<sub>Sa</sub> durante el día. Se observa que, en las horas más cálidas, el interior T<sub>Sa</sub> se mantiene más fresco que TSe, lo cual podría ser una desventaja en temporadas frías porque esto incrementaría el uso de calefacción, similarmente, Ávila- Hernández *et al.* (2020) mencionan que en días fríos los techos verdes no suprimen el uso de calefacción en las edificaciones, sino que lo aumentan en un 10 - 25%; aunque en días cálidos disminuyen el enfriamiento hasta en 99%; por lo que el beneficio sigue siendo mayor comparado con un techo convencional.



**Figura 17.** Comparación entre  $T_{s,int}$ ,  $T_{int}$  y la  $T_{suelo}$  de los techos TSa, TC y TSe en la semana más fría.

#### 4.2.2 Semana cálida (22 al 29 de febrero del 2020)

Esta semana se seleccionó por presentar los valores de temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) y radiación solar ( $G$ ) más altos del periodo monitoreado, considerando que las plantas se encontraban en un estado óptimo. La segunda mitad de abril presenta valores de  $T_{amb}$  y  $G$  altos ( $T_{amb}$  máxima: 23.9°C el día 23 abril y  $G$  máxima: 1,380W/m<sup>2</sup> el 18 abril), sin embargo, la cobertura de *S. acre* era muy reducida (38.53%) y por lo tanto se optó por reportar la última semana de febrero en la que se presentaron vientos Santa Ana que ocasionaron un aumento de  $T_{amb}$  (máxima: 27.9°C el día 25 febrero).



**Figura 18.** Los techos TSa (a) y TSe (b) durante la semana cálida.

#### 4.2.2.1 Comportamiento térmico

Para evaluar el comportamiento térmico de los techos en esta semana se compararon la temperatura del aire ambiente ( $T_{amb}$ ), las temperaturas promedio en la superficie interna ( $T_{s,int}$ ) y externa ( $T_{s,ext}$ ) de la placa de concreto de los 6 techos y la temperatura al interior de los módulo de prueba ( $T_{int}$ ) al igual que en la semana fría; también se muestra la radiación solar ( $G$ ) y velocidad del viento ( $V$ ) correspondientes al periodo de prueba.

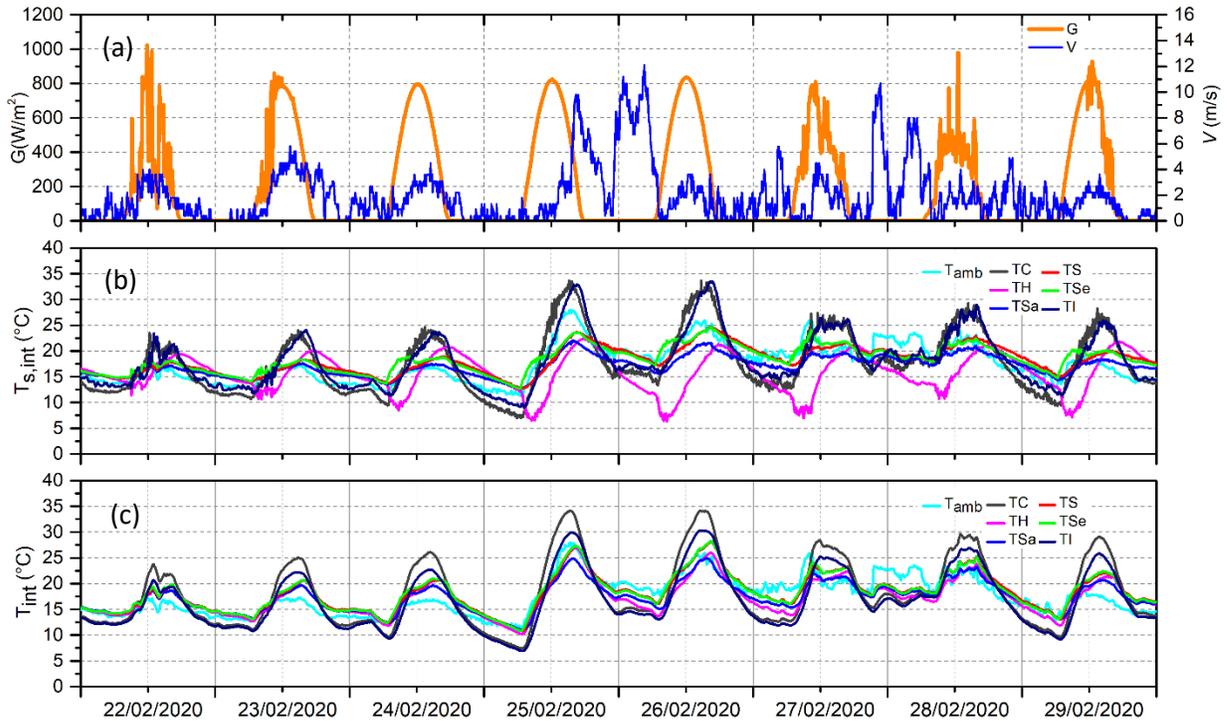
En la figura 19a se muestra la  $G$  y  $V$ , con el punto más alto de irradiancia el 22 de febrero con un valor de  $1023 \text{ W/m}^2$ . La velocidad del viento presentó su máximo valor el 26 de febrero con  $12.1 \text{ m/s}$ . Durante este periodo la  $T_{amb}$  se mantuvo en un intervalo entre  $27.9^\circ\text{C}$  y  $11.1^\circ\text{C}$ , y para el día más cálido la  $T_{amb}$  máxima fue de  $27.9^\circ\text{C}$ .

La figura 19b muestra las  $T_{s,int}$  de los 6 módulos experimentales, además de la  $T_{amb}$ ; durante esta semana se presentaron vientos de Santa Ana, por lo que a pesar de que el valor más alto de irradiancia se presenta el 22 de febrero, el día con la  $T_{amb}$  más alta fue el 25 de febrero con un valor de  $27.9^\circ\text{C}$ . Al igual que en la semana fría, se observa que el TC y el TI tienen  $T_{s,int}$  similares y son hasta  $35.9\%$  ( $12^\circ\text{C}$ ) mayores que los techos verdes, con valores máximos de  $\approx 33.5^\circ\text{C}$  después de mediodía (entre  $14:30$  y  $16:30$ ); así mismo, antes del amanecer cuando las temperaturas alcanzan sus valores mínimos, la diferencia es de hasta  $44.7\%$  ( $5.6^\circ\text{C}$ ) y  $29.1\%$  ( $3.7^\circ\text{C}$ ) por debajo de la  $T_{s,int}$  de los techos verdes. Estos resultados concuerdan con lo reportado por otros autores donde se comparó el desempeño térmico de techos reflectivos y techos verdes, por ejemplo, He *et al.* (2020) y Ordóñez- López y Pérez- Sánchez (2015) reportan una reducción promedio de  $3.3$  y  $4^\circ\text{C}$  en las fluctuaciones de temperatura en un techo verde respecto a uno reflectivo.

Por otro lado, se observa que la  $T_{s,int}$  de TH y TS muestran valores entre  $6.3$  y  $24.7^\circ\text{C}$ , y que sus valores máximos son hasta  $36.6\%$  ( $12.2^\circ\text{C}$ ) y  $26.4\%$  ( $8.9^\circ\text{C}$ ) menores que el valor máximo de TC; además, se presenta un retraso temporal de hasta  $3.08$  y  $1.33 \text{ h}$  respecto al valor máximo de TC, para TH y TS, respectivamente. Lo anterior demuestra que el sustrato por sí solo reduce las fluctuaciones de temperatura en el techo, y que las características del sustrato (humedad, densidad, etc.) afectan el grado de influencia de este sobre la temperatura del techo; Olivieri *et al.* (2013) y Pianella *et al.* (2017) reportan resultados similares.

En la figura 19c se muestran las  $T_{int}$  de los módulos experimentales; se observa que el TC y el TI presentan oscilaciones de temperatura mayores que los demás tratamientos, con una diferencia en sus valores máximos de  $22.3\%$  ( $6.2^\circ\text{C}$ ) y  $7.1\%$  ( $2.0^\circ\text{C}$ ) respecto a la  $T_{amb}$  durante el día; mientras que las  $T_{int}$  de Tsa y

$T_{Se}$  presentan una diferencia en sus valores máximos de 11% ( $3.1^{\circ}\text{C}$ ) y 2% ( $0.6^{\circ}\text{C}$ ) respecto a la  $T_{amb}$  durante el día. De acuerdo con lo anterior se concluye que el mejor comportamiento térmico lo presentan los techos verdes, así mismo, estos resultados concuerdan con lo reportado por otros autores (He *et al.*, 2016; Azeñas *et al.*, 2018).



**Figura 19.** Comparación de  $T_{s,int}$ ,  $T_{int}$ ,  $T_{amb}$ ,  $G$  y  $V$  entre tratamientos durante la semana más cálida.

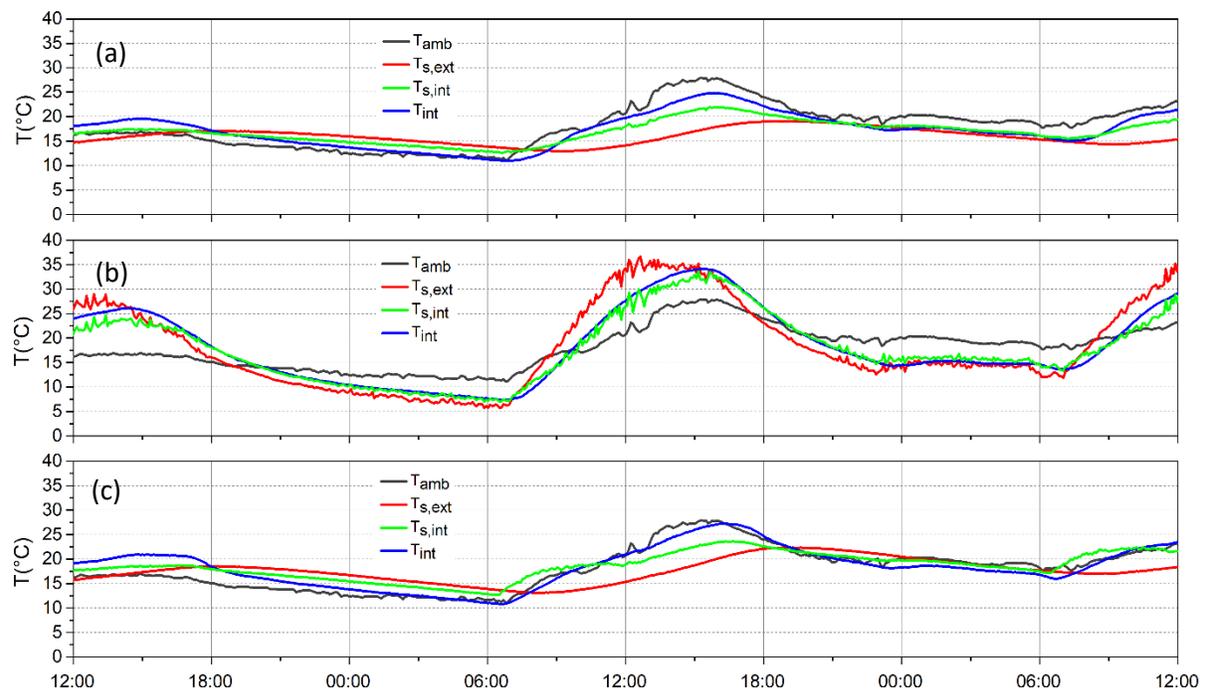
Considerando que el comportamiento térmico de los techos verdes fue mejor que el de TC, en la figura 20 se muestran las temperaturas de la superficie externa e interna de las losas de concreto ( $T_{s,ext}$ ,  $T_{s,int}$ ), la  $T_{int}$  y la  $T_{amb}$  para a) TSa, b) TC y c) TSe durante el día más cálido del periodo muestreado (25 de febrero), con el objetivo de mostrar con más detalle los resultados para este día.

En la figura 20a se aprecia que, en el día más cálido, la  $T_{s,ext}$  de TSa es hasta  $10.6^{\circ}\text{C}$  menor que la  $T_{amb}$  máxima del día ( $27.9^{\circ}\text{C}$ ); además, la  $T_{s,int}$  y la  $T_{int}$  presentan valores máximos de  $21.9$  y  $24.8^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, y están desfasados 25 y 35 min respecto al máximo de la  $T_{amb}$ . Así mismo, cuando la  $T_{amb}$  es más baja ( $11.1^{\circ}\text{C}$ ), la  $T_{int}$  de TSa es prácticamente igual ( $11.0^{\circ}\text{C}$ ). Estos resultados demuestran que las temperaturas del *roof pond* son más estables que la  $T_{amb}$ , debido a la capacidad de liberar calor y la propiedad aislante del agua (Song *et al.*, 2013).

En la figura 20b se observa que la  $T_{s,ext}$  del TC presenta una diferencia máxima de 15.8 y 9.02°C respecto a la  $T_{amb}$  en las horas más cálidas y frías del día, respectivamente; además, las  $T_{s,int}$  y  $T_{int}$  presentan valores máximos de 33.6 y 34.14°C, respectivamente, y están desfasados 10 min respecto al máximo de la  $T_{amb}$  (27.9°C). Este comportamiento es similar al de la semana fría, sin embargo, la amplitud de las fluctuaciones de temperatura es mucho mayor debido a la capacidad de absorber calor del concreto, que lo hace más sensible a las condiciones ambientales. Resultados similares se reportan por Fioretti *et al.* (2010) y Chagolla-Aranda *et al.* (2017).

La figura 20c presenta la  $T_{s,ext}$ ,  $T_{s,int}$  y  $T_{int}$  de TSe durante el día más cálido, se aprecia que la  $T_{s,ext}$  de TSe es 8.8°C menor que la  $T_{amb}$  máxima del día (27.9°C), así mismo, se observa que la  $T_{int}$  es ligeramente menor que la  $T_{amb}$  máxima ( $T_{int} = 26.4°C$ ), y es mayor que la  $T_{int}$  de TSa (24.4°C) a la misma hora, indicando que TSe presenta un aislamiento menor que TSa en las horas más cálidas del día. Lo anterior se atribuye a la cantidad de agua en el sustrato, que es menor en TSe que en TSa, y a la fisiología de *S. acre* (Cascone *et al.*, 2019).

De acuerdo con lo anterior, los techos verdes (TSa y TSe) son efectivos en la reducción de las fluctuaciones de temperatura cuando se comparan con un techo sin recubrimientos, debido a la sombra y evapotranspiración que proveen las plantas y a que el sustrato actúa como un sumidero de calor para reducir la temperatura (Tan *et al.*, 2017).



**Figura 20.** Comparación de temperaturas ( $T_{amb}$ ,  $T_{s,ext}$ ,  $T_{s,int}$ ,  $T_{int}$ ) antes del día más cálido (12:00 a 00:00 h), el día más cálido (00:00 a 00:00 h) y la noche posterior (00:00 a 12:00 h), para los módulos con a) TSa, b) TC y c) TSe.

#### 4.2.2.2 Flujos de calor y cargas térmicas

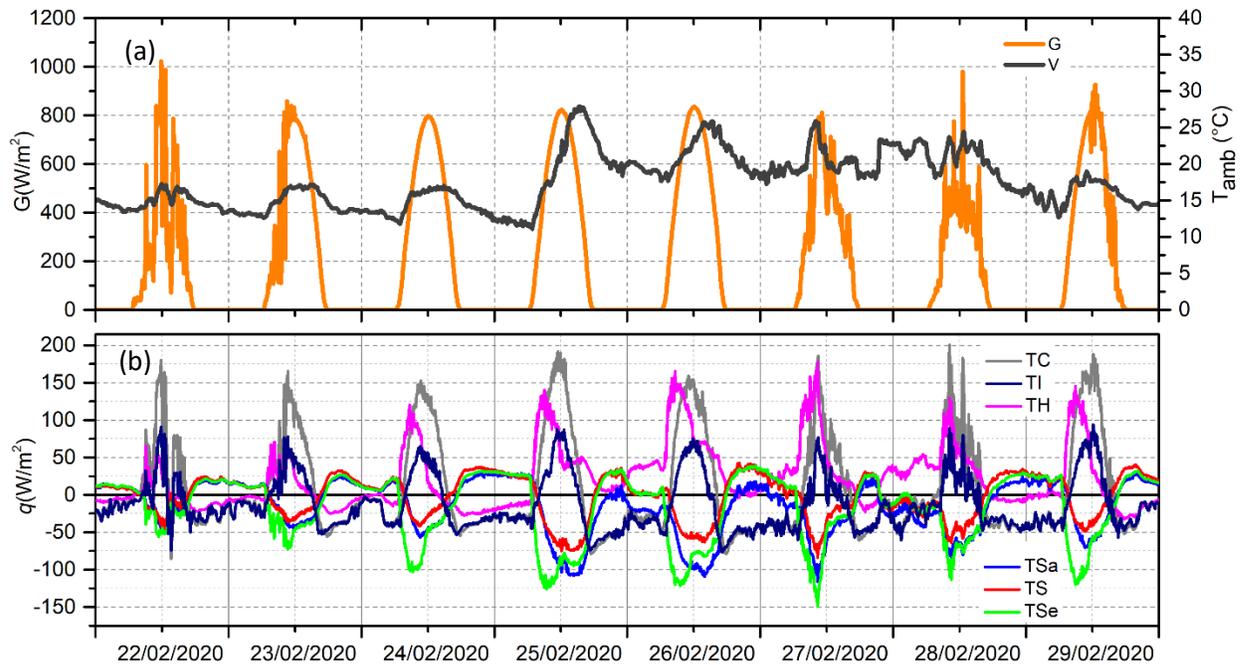
El comportamiento de los flujos de calor ( $q$ ) en los módulos es muy similar al de los días fríos, sin embargo, las magnitudes son mayores. La figura 21 presenta el comportamiento de la  $G$ , la  $T_{amb}$  y el flujo de calor por unidad de área ( $q$ ) a través de los techos estudiados. En general, se aprecia el efecto de la  $G$  sobre los  $q$  debido a que es la mayor fuente de energía que incide sobre los techos, de esta manera, durante horas de mayor radiación solar incidente (entre 10:00 y 14:00 h) se presentan los valores máximos de  $q$  para TC, TH y TI, mientras tanto se presentan los valores mínimos de  $q$  para TSa, TS y TSe. Dependiendo del sentido de  $q$ , éste puede ser hacia el interior del módulo (valor positivo) o bien hacia el sustrato o el ambiente al exterior del módulo (valor negativo).

En la figura 21b se observa que durante horas de radiación solar ( $\approx 06:00 - 16:00$  h), los flujos de calor en TC, TI y TH son positivos, alcanzando sus valores máximos cerca del mediodía, lo cual indica que los módulos están ganando calor a través del techo; mientras que durante el mismo periodo de tiempo, en TSa, TSe y TS los valores son negativos, con valores mínimos cerca del mediodía, indicando que los módulos ceden calor hacia el sustrato adyacente o al ambiente. Durante el resto del día el efecto es opuesto y los valores del flujo de calor son menores.

Así mismo, se aprecia que TC presenta valores de  $q$  entre  $-85.4$  y  $200.3$   $W/m^2$ , mientras que los valores de  $q$  de TSe y TSa están entre  $-149.55$  y  $39.0$   $W/m^2$  y entre  $-116.0$  y  $30.2$   $W/m^2$ , respectivamente. Estos valores son mayores que en el periodo frío debido al incremento de la  $G$ , e indican que el TC permite una mayor cantidad de calor entrando al módulo, mientras que TSa y TSe extraen el calor del módulo y lo almacenan en el sustrato o lo conducen al exterior; este comportamiento es similar a lo reportado por He *et al.* (2016).

Por otra parte, los valores de  $q$  de TS y TH presentan un intervalo entre  $-83.7$  y  $42.6$   $W/m^2$  y  $-32.4$  y  $177.8$   $W/m^2$ , asociado a la conductividad térmica del aire y al agua que retrasan o incrementan el flujo de calor a través del techo (cf. Azeñas *et al.*, 2018).

Finalmente, si se compara el flujo de calor entre TS y TSe y entre TH y TSa es evidente que la vegetación reduce el flujo de calor al interior del módulo, sobre todo entre TH y TSa; respecto a lo cual Lazzarin *et al.* (2005) mencionan que en un sustrato seco la evapotranspiración es limitada y, por lo tanto, la reducción en el flujo de calor se debe principalmente a la absorción de calor por las plantas y el sustrato, mientras que en un sustrato húmedo la evapotranspiración incrementa y se convierte en el principal factor reductor del flujo de calor.



**Figura 21.** Comportamiento del flujo de calor unidad de área para todos los techos estudiados.

En cuanto a la contribución del flujo de calor en la carga térmica, al igual que en el periodo frío, se utilizaron los valores absolutos debido a que la carga térmica involucra un gasto de energía adicional. En la tabla 11 se muestran los valores de las cargas térmicas por hora de los 6 tratamientos durante el día más cálido (25 febrero). Se observa que el TC presenta el valor más alto (1,557.31 KW h/m<sup>2</sup>), por lo que es el que presenta el mayor aporte energético; mientras que el TS (871.37 KW h/m<sup>2</sup>) es el tratamiento con menor aporte energético.

Adicionalmente se observa que, de los techos verdes, el TSe es el que presenta mayor aporte energético (1280.51 KW h/m<sup>2</sup>), con una reducción del 17.7% respecto a TC; mientras que el TSa (1018.03 KW h/m<sup>2</sup>) presenta un aporte menor que TSe y una reducción del 34.6% respecto a TC. Otros estudios han reportado una disminución en la carga térmica en techos verdes comparados con un techo de concreto, por ejemplo, Fioretti *et al.* (2010) reportan una disminución en la carga de enfriamiento de entre 12 y 87%, y Ávila-Hernández *et al.* (2020) reportan una disminución de hasta 45% en la carga de enfriamiento.

Adicionalmente, en la tabla 12 se muestran los valores de las cargas térmicas de los 6 tratamientos durante la semana cálida, se observa que las tendencias son similares a las del día cálido, donde el TC presenta el mayor aporte energético (9644.67 KW h/m<sup>2</sup>), mientras que el TS presenta el menor aporte energético (4596.97 KW h/m<sup>2</sup>), seguido del TSa (5498.34 KW h/m<sup>2</sup>), la cual presenta la menor carga térmica de los techos verdes y también es menor que el TI (6745.96 KW h/m<sup>2</sup>). El hecho de que la carga térmica de TSe

sea mayor que TS puede asociarse a que las plantas retienen mayor cantidad de agua en el sustrato y por lo tanto, el TSe almacena mayor cantidad de calor en el agua que el sustrato totalmente seco, ya que el aire es un mejor aislante que el agua (Del Barrio, 1998).

**Tabla 11.** Cargas térmicas (KW h/m<sup>2</sup>) por hora de los 6 tratamientos en el día más cálido.

t (h)	TC	TH	TSa	TS	TSe	TI
0:00	-30.44	-18.92	28.30	31.59	30.36	-28.88
1:00	-27.97	-17.11	27.86	29.81	29.38	-27.28
2:00	-30.23	-15.06	26.23	27.46	27.89	-29.81
3:00	-31.99	-14.08	25.46	26.23	27.01	-33.25
4:00	-27.73	-12.14	24.76	24.16	26.18	-28.62
5:00	-28.72	-11.95	25.37	23.87	26.43	-30.80
6:00	-27.46	-9.49	22.71	21.14	18.79	-35.89
7:00	10.38	74.70	7.19	6.91	-59.31	-13.67
8:00	65.65	122.45	-19.31	-24.20	-108.14	11.84
9:00	119.51	113.67	-52.75	-44.03	-117.56	28.67
10:00	156.63	104.56	-73.98	-56.08	-115.81	52.69
11:00	178.32	77.44	-88.02	-65.09	-97.48	79.17
12:00	167.17	41.47	-89.91	-64.21	-84.50	77.31
13:00	114.86	41.51	-104.03	-71.58	-90.08	49.31
14:00	67.97	43.76	-106.00	-72.63	-92.02	22.64
15:00	20.63	47.59	-102.02	-67.60	-87.23	-11.44
16:00	-40.13	43.63	-83.54	-52.18	-70.09	-46.07
17:00	-75.97	27.44	-52.43	-20.80	-35.02	-70.92
18:00	-70.23	14.19	-28.98	8.53	-4.83	-63.03
19:00	-64.06	7.16	-11.86	23.87	18.38	-58.94
20:00	-56.48	5.55	-2.99	28.91	27.73	-52.85
21:00	-54.87	8.14	-3.21	28.37	29.26	-53.61
22:00	-51.76	6.83	5.29	30.78	31.40	-51.69
23:00	-38.15	17.66	-5.83	21.34	25.62	-41.56
$\int_{00:00}^{24:00} q(t) dt$	<b>1557.31</b>	<b>896.53</b>	<b>1018.03</b>	<b>871.37</b>	<b>1280.51</b>	<b>999.95</b>

**Tabla 12.** Cargas térmicas (KW h/m<sup>2</sup>) de los 6 tratamientos durante la semana cálida.

Día	TC	TH	TSa	TS	TSe	TI
<b>22/02/2020</b>	859.23	298.24	356.71	353.67	445.97	568.34
<b>23/02/2020</b>	1002.41	395.09	476.42	452.32	610.06	646.24
<b>24/02/2020</b>	1194.38	622.56	546.09	509.88	805.73	750.40
<b>25/02/2020</b>	1557.31	896.53	1018.03	871.37	1280.51	999.95
<b>26/02/2020</b>	1477.03	1236.83	1014.98	664.41	1074.14	1018.57
<b>27/02/2020</b>	1114.39	943.26	676.48	528.27	847.30	799.33
<b>28/02/2020</b>	1089.38	817.28	782.13	598.99	743.11	718.58
<b>29/02/2020</b>	1350.53	735.40	627.49	618.06	939.15	845.02
$\int_{03/02}^{10/02} q(t) dt$	<b>9644.67</b>	<b>5945.18</b>	<b>5498.34</b>	<b>4596.97</b>	<b>6745.96</b>	<b>6346.43</b>

#### 4.2.2.3 Efecto de las plantas sobre el techo

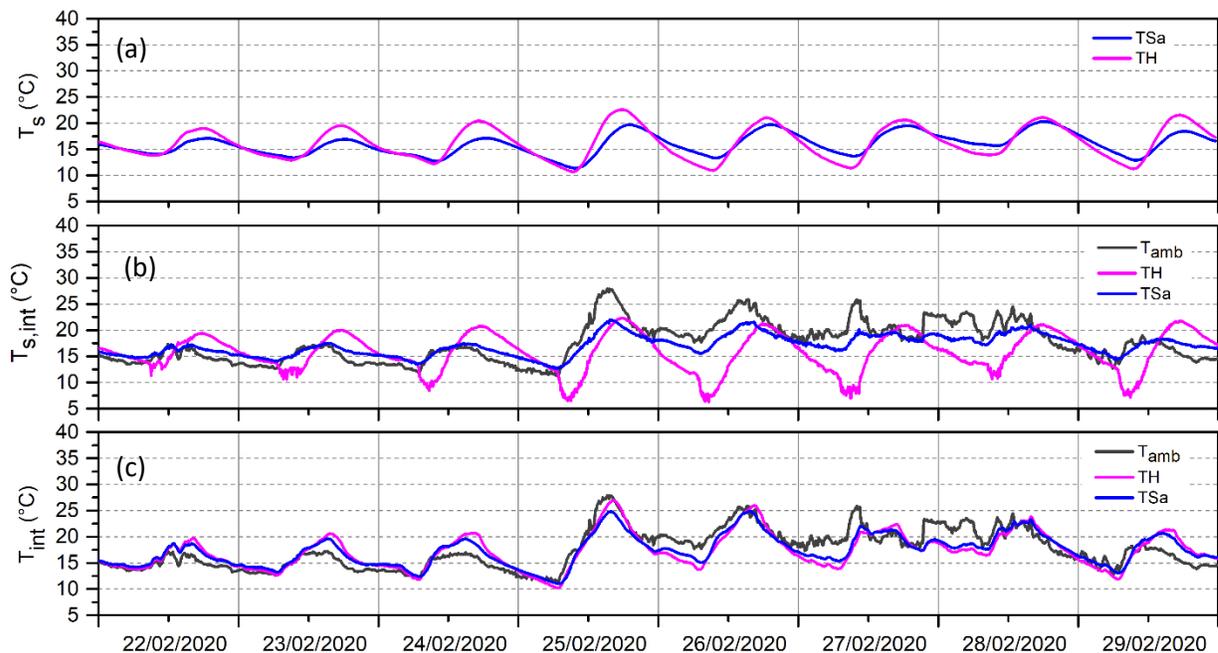
Al igual que en la semana fría, se compararon las temperaturas del sustrato ( $T_s$ ), las  $T_{s,int}$  y  $T_{int}$  entre los techos verdes y el techo con el sustrato correspondiente (TH con TSa y TS con TSe); además, se comparó el comportamiento térmico de TSa y TSe con el de TC.

Primeramente, la figura 22 muestra las  $T_s$ ,  $T_{s,int}$  y  $T_{int}$  para TSa y TH, así como la  $T_{amb}$ . En la figura 22a se observa que las  $T_s$  máximas de TH son 12.6% (2.8°C) mayores que las de TSa y presentan un retraso de 1 h en alcanzar sus valores máximos. Al igual que en la semana fría, estas diferencias se atribuyen al sombreado que proporcionan las plantas, a los procesos de evapotranspiración en TSa y a que la presencia de las plantas evita la compactación del sustrato.

En la figura 22b, se observa que las  $T_{s,int}$  de TSa son más estables que las de TH y el  $T_{amb}$ ; con una diferencia porcentual de los valores máximos de TSa y TH respecto a la  $T_{amb}$  de 21.2% (5.9°C) y 19.8% (5.5°C) y un tiempo de retraso de 0.41 h y 2.5 h, respectivamente. Los valores máximos de TSa, TH y  $T_{amb}$  se presentan a las 15:40, 17:45 y 15:15 h, respectivamente. Además, TH difiere con la  $T_{amb}$  en sus valores mínimos en 41.8% (4.6°C), este comportamiento se atribuye a que durante el día el techo está expuesto a radiación solar y el agua almacena la energía solar como calor sensible, esta energía se transfiere al interior del techo

por conducción para ser transmitido al espacio interior por radiación y convección (Sharifi & Yamagata, 2015). Esta característica del agua de absorción de calor retrasa la aparición de los picos de temperatura (valores máximos y mínimos) que se presentan después, cuando la temperatura del ambiente es menor, haciendo más fácil lograr el confort térmico al interior de la habitación por la presencia de los techos verdes (Tan *et al.*, 2017).

Por otra parte, en la figura 22c se aprecia que en general las  $T_{int}$  de TH y TSa son muy similares entre sí, sin embargo, durante el día más cálido, la  $T_{int}$  máxima de TSa es 2.2°C menor que la de TH; así mismo, se observa que las  $T_{int}$  de TH y TSa difieren en sus valores máximos con la  $T_{amb}$  un 3.3% (0.9°C) y 11.1% (3.1°C), respectivamente.

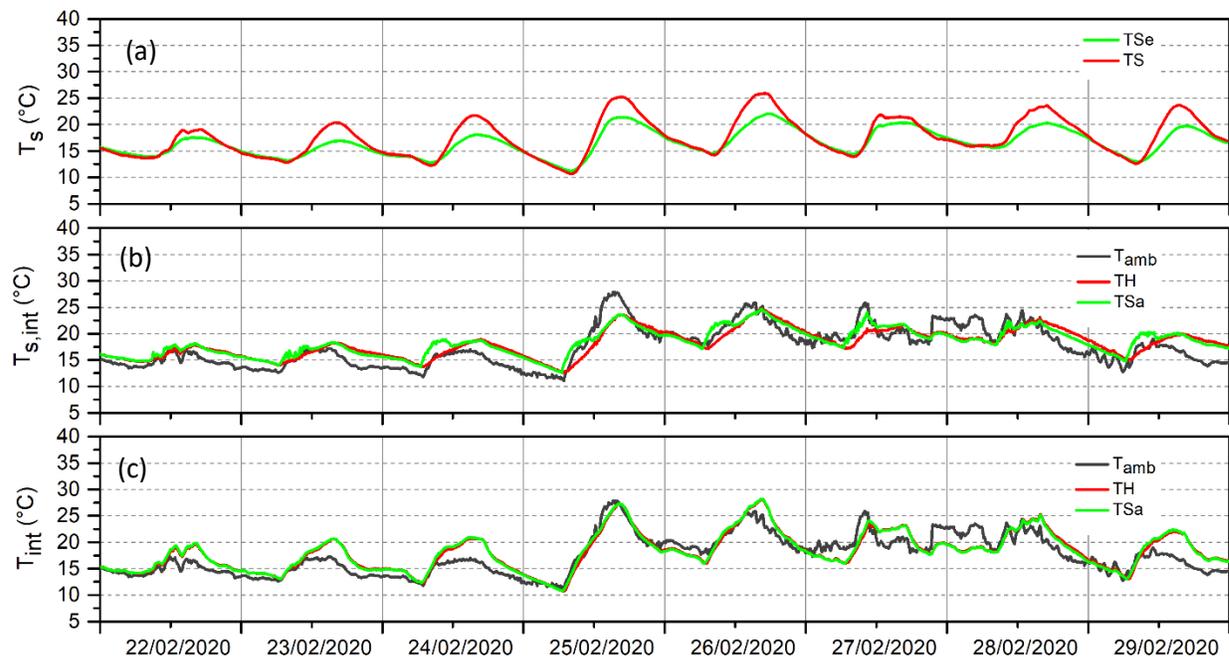


**Figura 22.** Comparación entre las  $T_{s,int}$ ,  $T_{int}$  y la  $T_{suelo}$  de los techos TH y TSa en la semana más cálida.

La figura 23 muestra las  $T_s$ ,  $T_{s,int}$  y  $T_{int}$  para TSe y TS, así como la  $T_{amb}$ , en la figura 23a se observa que existe una diferencia entre las  $T_s$  de TSe y TS, donde las  $T_s$  máximas de TS son 14.9 % (3.9°C) mayores que las de TSe y presentan un retraso de 30 min en alcanzar sus valores máximos. Esta diferencia se atribuye principalmente al sombreado que aportó *S. acre* al sustrato de TSe.

En general, se aprecia que las  $T_{s,int}$  y  $T_{int}$  de TSe y TS son muy parecidas entre sí y que sus valores máximos se encuentran por arriba de la  $T_{amb}$  (p. ej. 22/02/2020- 24/02/2020, 26/02/2020 y 29/02/2020); sin embargo, durante el día más cálido, las  $T_{s,int}$  máximas de TS y TSe se encuentran  $\approx 4^\circ\text{C}$  por debajo de la  $T_{amb}$ .

En la figura 23b se muestra la  $T_{amb}$  y las  $T_{s,int}$  de TSe y TS, se observa que las  $T_{s,int}$  presentan una diferencia porcentual máxima de  $\approx 15\%$  ( $\approx 4\text{ }^\circ\text{C}$ ) respecto a la  $T_{amb}$  y un retraso de 1.08 h y 1.4 h, respectivamente. Así mismo, en la figura 23c se muestran la  $T_{amb}$  y las  $T_{int}$  de TSe y TS, se aprecia que las  $T_{int}$  de TSe y TS presentan una diferencia de hasta  $\approx 3\text{ }^\circ\text{C}$  respecto a la  $T_{amb}$ . Estas diferencias se atribuyen a que tanto TSe como TS poseen un sustrato ligero, con mayor capacidad de aireación y retención de agua, y baja densidad, que les otorga sus propiedades aislantes (Del Barrio, 1998; Tan *et al.*, 2017); así mismo, las hojas pequeñas de *S. acre* incrementan la pérdida de calor por la reducción de la resistencia de la capa límite a la transferencia de calor, que en temperaturas altas causa que la hoja siga la temperatura ambiental más de cerca (Jones & Rotenberg, 2016).



**Figura 23.** Comparación entre las  $T_{s,int}$ ,  $T_{int}$  y la  $T_{suelo}$  de los techos TS y TSe en la semana más cálida.

Finalmente, la figura 24 muestra las  $T_s$ ,  $T_{s,int}$  y  $T_{int}$  para TSa, TSe, TC y la  $T_{amb}$ , para apreciar las diferencias entre los techos verdes (TSa y TSe) y un techo convencional de concreto (TC). En la figura 24a se aprecia que las  $T_s$  máximas de TSe son hasta 11.9% ( $2.3\text{ }^\circ\text{C}$ ) mayores que las de TSa, y presentan un retraso de 1.5 h en alcanzar sus valores máximos. Las diferencias son mayores cuando las  $T_{amb}$  son más altas (p. ej. 25/02/2020 y 26/02/2020); lo cual se atribuye a la mayor evapotranspiración en TSa que en TSe. En relación con esto, Gates (1965) menciona que las hojas de plantas que crecen en zonas con suministro abundante de agua y con transpiración libre, como *S. pacifica*, presentan temperaturas más bajas que las hojas de plantas en suelos más secos (*S. acre*). Así mismo, en experimentos donde las plantas se colocan en cámaras de crecimiento bajo iluminación constante y temperatura del aire entre 10 y  $60\text{ }^\circ\text{C}$  se observó

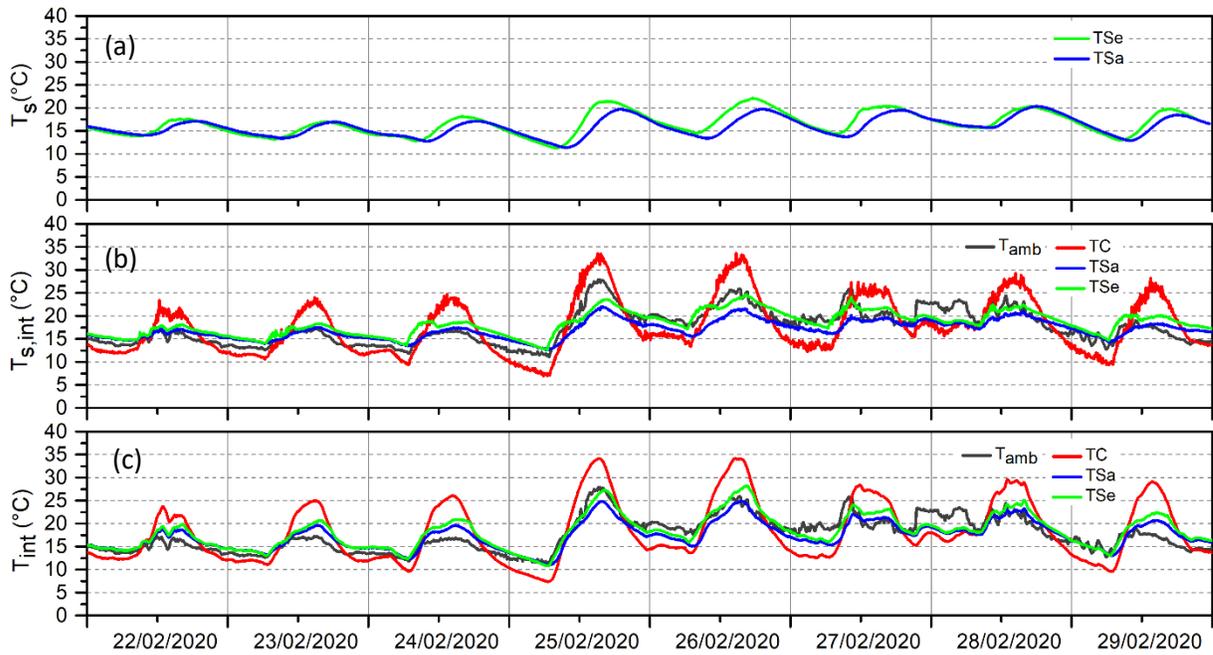
que estando bien irrigadas, las hojas de las flores mono (*Mimulus*), cactus, agave, *Rhododendron* y adelfa permanecen más frías que el aire cuando la temperatura es de 30°C o más alta; lo cual nos indica el efecto de enfriamiento de una planta con suministro constante de agua, respecto a una planta en un sustrato seco donde la transpiración se encuentra limitada por la disponibilidad de agua (Azeñas *et al.*, 2018).

En general se observa que las oscilaciones de temperatura son mucho mayores en TC que en TSa y TSe. En cuanto a la  $T_{s,int}$ , en la figura 24b se observa que TC presenta temperaturas mayores respecto a TSa y TSe durante el día, con una diferencia en sus valores máximos de 35.9% (12.07°C) y 26.65% (8.96°C), respectivamente; así mismo, TSe presenta valores más altos de  $T_{s,int}$  respecto a TSa durante el día, con una diferencia entre sus valores máximos del 10.83% (2.6°C). Este comportamiento es similar al de la semana fría y se atribuye a que el techo verde constituye un escudo para la radiación solar durante el día (Bevilaqua *et al.*, 2015), amortiguando las fluctuaciones de temperatura en el techo (Pianella *et al.*, 2017).

Además, en la figura 24c se muestra la  $T_{int}$  de los módulos con la misma tendencia que la  $T_{s,int}$ ; se aprecia que TC presenta una diferencia porcentual de hasta 27.3% (9.3°C) y 19.9% (6.8°C) entre sus valores máximos respecto a TSa y TSe, respectivamente; así mismo, la  $T_{int}$  máxima de TSe es 13.16% (3.3°C) mayor que la de TSa. Similarmente, Ávila-Hernández *et al.* (2020) reportan una disminución de la  $T_{int}$  de hasta 4.7°C en un techo verde comparado con un techo de concreto en un clima árido.

Contrario a las condiciones deseadas para la semana fría, en la semana cálida el TSa podría presentar una ventaja sobre TSe al mantener temperaturas más bajas en horas de máxima radiación solar y temperatura ambiente, manteniendo ambientes más confortables al interior de una edificación y disminuyendo el uso de aire acondicionado. En relación con esto, Song *et al.* (2013) mencionan que los techos con humedales mantienen perfiles de temperatura más estables que los sistemas terrestres en techos verdes por su tasa de transferencia de calor baja y su alta capacidad de almacenamiento de calor; así mismo, las plantas de humedales tienen altas tasas transpirativas que se asocian con su habilidad de enfriar edificios.

Cabe mencionar que los experimentos realizados nos permiten conocer el efecto de los diferentes diseños de techos verdes (tradicional e inundado), asociados a los tipos de plantas utilizadas (CAM y  $C_3$ ), sobre el comportamiento térmico del techo. Estos resultados facilitan la comprensión de la influencia del sistema de techos verdes sobre las ganancias o pérdidas de energía a través de la componente de techo en el clima particular de Ensenada, B. C., permitiéndonos conocer el efecto de estos sistemas y en un futuro escalar los resultados del estudio de los techos verdes a una edificación real.



**Figura 24.** Comparación entre  $T_{s,int}$ ,  $T_{int}$  y la  $T_{suelo}$  de los techos TSa, TC y TSe en la semana más cálida.

Así mismo, la investigación local y a pequeña escala es valiosa y necesaria debido a que los resultados de los experimentos en techos verdes no pueden ser generalizados, como mencionan Kenai *et al.* (2017), a menos que se consideren o midan todos los parámetros que pueden influenciar el balance de energía de una edificación, es decir, se deben caracterizar todos los materiales de construcción, además de que los parámetros deben tener los mismos órdenes de magnitud para descartar parámetros físicos o geométricos y permitirnos considerar solamente el impacto térmico, lo cual es muy difícil de realizar. Es importante reconocer que las temperaturas al interior de las edificaciones están fuertemente influenciadas por los ocupantes y sus comportamientos (por ejemplo, el uso de sistemas de enfriamiento/calefacción, abrir o cerrar puertas o ventanas y manipular las cortinas) y es difícil obtener información técnica precisa sin pre-equipar la edificación con la cantidad necesaria de sensores. Asimismo, no es posible repetir los mismos escenarios o modos de uso para todos los ocupantes de diferentes edificaciones, que generan diferencias significativas y, por lo tanto, no se pueden comparar.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

En este trabajo se construyeron e instrumentaron módulos experimentales para comparar el desempeño térmico de techos verdes extensivos con plantas CAM (TSe) y  $C_3$  (TSa) con un techo sin plantas con sustrato seco (TS) y tipo humedal (TH), con un techo de concreto sin recubrimientos (TC) y un techo reflectivo (TI). Estos tratamientos se compararon durante una semana con temperaturas promedio de 12.8°C (3-10/02/2020) y otra de 17.5°C (22-29/02/2020) durante el invierno de 2020 en Ensenada, B.C., una ciudad con clima mediterráneo. Se reportan las temperaturas de la superficie interior del techo del módulo ( $T_{s,int}$ ) y las temperaturas al interior del módulo ( $T_{int}$ ), además se comparan los resultados de los diferentes tipos de techos o tratamientos y estos con la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ). Adicionalmente se reportan las temperaturas del sustrato para TSe, TS, TSa y TH; también, se reportan los flujos de calor y la cantidad de energía que aporta el techo en la carga térmica para todos los módulos. A partir del análisis de resultados se derivan las siguientes conclusiones:

- Los techos verdes (TSa y TSe) mitigan la variabilidad de temperatura en los módulos experimentales en el clima particular de Ensenada, B.C., con  $T_{s,int}$  cercanas a la  $T_{amb}$ , variando entre 7.7 y 24.6 °C. Por el contrario, TC y TI presentaron las fluctuaciones de temperatura más amplias con  $T_{s,int}$  variando entre 3.2 y 33.6 °C.
- El diseño de TSa permite un mayor enfriamiento del módulo. Sin embargo, este efecto no es deseable en invierno, ya que se requiere mantener temperaturas más cálidas que las  $T_{amb}$  en interiores. Sin embargo, en verano podría presentar un mejor desempeño térmico, aunque se debe evaluar el costo-beneficio del mantenimiento de un techo constantemente inundado.
- El diseño de TSe presentó un menor efecto de enfriamiento, manteniendo el calor al interior del módulo, no obstante, las temperaturas registradas durante las horas más cálidas del día están dentro del intervalo de confort térmico ( $18 \leq T_{conf} \leq 25$ , Nicol & Humphreys (2002)); estos efectos se atribuyeron al contenido de agua/aire en el sustrato y a los procesos de evapotranspiración y sombreado de las plantas. Por lo tanto, se recomienda emplear este tipo de techo verde para las condiciones climáticas invernales en Ensenada, B. C.
- En general, el flujo de calor y la carga térmica son menores en días fríos que en días cálidos; el TC y el TI aportan una cantidad mayor de energía (8757.1 y 5778.0 KW h/m<sup>2</sup>, respectivamente), mientras que los techos verdes TSe y TSa proveen un efecto aislante al techo (6317.4 y 4850.0 KW

$\text{h/m}^2$ , respectivamente). Es importante mencionar que TS presentó el valor más bajo (4311.4 KW  $\text{h/m}^2$ ); sin embargo, la ausencia de plantas ocasiona la pérdida de sustrato por la acción del ambiente y carece de servicios ecosistémicos, como la captura de carbono, refugio para flora y fauna locales, y disminución de la isla urbana de calor, por lo que no es recomendable.

- Durante el mes de abril, *S. acre* fue afectada por plagas (mosca del sustrato y piojo harinoso), lo cual combinado con un periodo de 2.5 semanas sin irrigación causaron una gran pérdida en la cobertura (de 65.3 a 11%). En contraste, *S. pacifica* no presentó plagas e incrementó su cobertura al finalizar el experimento (de 28.8 a 62.3%), además de que presentó germinación de semillas y floración. Debido a que el mayor gasto en la instalación de un techo verde se debe a las plantas (MX \$1,300/ $\text{m}^2$ ) y, a pesar de que *S. pacifica* no es una especie comercializada actualmente, es posible cultivarla para este tipo de aplicaciones, como ocurre con *S. bigelovii*, que es una especie anual hermana de *S. pacifica* y es ampliamente comercializada en Ensenada, B. C.
- En cuanto a la densidad volumétrica del sustrato, se encontró que la presencia de las plantas contribuye a disminuir la compactación de este (con un efecto en la disminución de la conducción de calor), donde TSe presentó el sustrato más ligero, con un valor de  $0.1786 \text{ g/cm}^3$ , TSa presentó un valor de  $0.2507 \text{ g/cm}^3$  y TH presentó el valor más alto ( $0.6663 \text{ g/cm}^3$ ). Por lo tanto, la densidad del sustrato presenta implicaciones en el peso del sistema de techos verdes y es un factor importante por considerar debido a que el sustrato es la capa con mayor espesor en los techos verdes extensivos.
- Considerando que el diseño de TSe presenta un sustrato más ligero, pero retiene menor cantidad de agua (afectando el desempeño de las plantas), y que el diseño de TSa posee un sustrato más pesado que se mantiene constantemente inundado (favoreciendo el desarrollo de especies de humedal), se recomienda emplear un diseño que combine el sustrato ligero con un sistema de retención de agua que favorezca la supervivencia de las plantas sobre todo en el verano, que disminuya el mantenimiento, y que no constituya un riesgo para la estructura de una edificación a escala completa por su peso.
- Considerando que *S. acre* no logró sobrevivir el periodo sin irrigación, a pesar de los beneficios reportados en la literatura del empleo de crasuláceas, y que por el contrario *S. pacifica* completó su ciclo de vida en el techo, bajo las duras condiciones ambientales que se presentan en él, se recomienda emplear especies nativas en los techos verdes para minimizar el mantenimiento del

techo verde, maximizar su desempeño térmico y adicionalmente proporcionar servicios ecosistémicos.

Finalmente, se reconoce que el desarrollo de los techos verdes en México requiere continuar con la investigación de estos sistemas para emitir recomendaciones que maximicen los beneficios que proporcionan y promuevan su uso ya que, de acuerdo con el presente trabajo, los techos verdes son un método eficaz en la regulación de la temperatura en interiores y, a su vez, disminuyen la energía requerida en calefacción y enfriamiento en climas semiáridos.

## Literatura citada

- Abrams, Leroy. 1944. *Illustrated flora of the Pacific states Washington, Oregon and California*. Vol. II. Stanford University Press. Stanford, California, USA. pp. 91-92.
- Ackerman, K., Conard, M., Culligan, P., Plunz, R., Sutto, M. P., & Whittinghill, L. 2014. Sustainable food systems for future cities: The potential of urban agriculture. *The economic and social review*, 45(2) 189-206.
- Alexandri, E., & Jones, P. 2008. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 43(4):480–93.
- Assouline, S., Tessier, D., & Tavares-Filho, J. 1997. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: Experimental results and modeling. *Soil Science Society of America Journal*, 61(2), 390-398.
- Ávila-Hernández, A., Simá, E., Xamán, J., Hernández-Pérez, I., Téllez-Velázquez, E., & Chagolla-Aranda, M. A. 2020. Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of a residential building standard for Mexico. *Energy and Buildings*, 209, 109709.
- Ayala, F., & O'Leary, J. W. 1995. Growth and physiology of *Salicornia bigelovii* Torr. at suboptimal salinity. *International Journal of Plant Sciences*, 156(2), 197-205.
- Azeñas, V., Janner, I., Medrano, H., & Gulías, J. 2018. Performance evaluation of five Mediterranean species to optimize ecosystem services of green roofs under water-limited conditions. *Journal of Environmental Management*, 212, 236-247.
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., & GhaffarianHoseini, A. 2014. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied energy*, 115, 411-428.
- Bevilacqua, P., Coma, J., Pérez, G., Chocarro, C., Juárez, A., Solé, C., ... & Cabeza, L. F. 2015. Plant cover and floristic composition effect on thermal behaviour of extensive green roofs. *Building and Environment*, 92, 305-316.
- Bevilacqua, P., Mazzeo, D., Bruno, R., & Arcuri, N. 2016. Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area. *Energy and buildings*, 122, 63-79.
- Blank, L., Vasl, A., Levy, S., Grant, G., Kadas, G., Dafni, A., & Blaustein, L. 2013. Directions in green roof research: A bibliometric study. *Building and Environment*, 66, 23-28.
- Brenneisen, S. 2006. Space for urban wildlife: designing green roofs as habitats in Switzerland. *Urban habitats*, 4.
- Brown, P. 2014. *Basics of evaporation and evapotranspiration*. College of Agriculture and Life Sciences, University of Arizona. Tucson, AZ, USA. 4p.
- Cardinale, B.J., Duffy, J.E., Gonzalez, A., Hooper, D.U., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., Mace, G.M., Tilman, D., Wardle, D.A., Kinzig, A.P., Daily, G.C., Loreau, M., Grace, J.B., Larigauderie, A., Srivastava, D.S., & Naeem, S., 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 186, 59-67.

- Carter, T., & Jackson, C. R. 2007. Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. *Landscape and urban planning*, 80(1-2), 84-94.
- Cascone, S., Catania, F., Gagliano, A., & Sciuto, G. 2018. A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings. *Building and Environment*, 136, 227-239.
- Cascone, S., Coma, J., Gagliano, A., & Perez, G. 2019. The evapotranspiration process in green roofs: A review. *Building and Environment*, 147, 337-355.
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B., & Davison, J. B. 2010. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and buildings*, 42(10), 1582-1591.
- Çengel, Y. 2002. *Heat Transfer: A Practical Approach*. (2<sup>nd</sup> ed.) McGraw-Hill. pp. 1-59, 127-134, 561-584.
- Chagolla-Aranda, M. A., Simá, E., Xamán, J., Álvarez, G., Hernández-Pérez, I., & Téllez-Velázquez, E. 2017. Effect of irrigation on the experimental thermal performance of a green roof in a semi-warm climate in Mexico. *Energy and Buildings*, 154, 232-243.
- Chenani, S. B., Lehvavirta, S., & Häkkinen, T. 2015. Life cycle assessment of layers of green roofs. *Journal of Cleaner Production*, 90, 153-162.
- CICLOM del Servicio Meteorológico Nacional. Recuperada el 08 de agosto de 2019 de: <http://clicom-mex.cicese.mx>
- Clark, C., Adriaens, P., & Talbot, F. B. 2008. Green roof valuation: a probabilistic economic analysis of environmental benefits. *Environmental science & technology*, 42(6), 2155-2161.
- Colla, S.R., Willis, E., & Packer, L., 2009. Can green roofs provide habitat for urban bees (Hymenoptera: Apidae)? *Cities and the Environment*, 2, 1-12.
- Dakin, K., Benjamin, L.L., & Pantiel, M., 2013. *The Professional Design Guide to Green Roofs*. (1<sup>st</sup> ed.) Timber Press, Portland, Oregon. pp 27- 41.
- Del Barrio, E. P. 1998. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and buildings*, 27(2), 179-193. DOI [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2677-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2677-2_6).
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2018. Ley General de Cambio Climático. Recuperado el 25 de mayo de 2020 de: [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC\\_130718.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_130718.pdf)
- Dieleman, H. 2017. Urban agriculture in Mexico City; balancing between ecological, economic, social and symbolic value. *Journal of Cleaner Production*, 163, S156-S163.
- Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. 2003. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and buildings*, 35(1), 69-76.
- Dinçer, İ., & Zamfirescu, C. 2016. *Drying phenomena: theory and applications*. Appendix B. Thermophysical Properties of Water. (1<sup>st</sup> ed.) John Wiley & Sons. 512 p.
- Dvorak, B. D., & Volder, A. 2013. Plant establishment on unirrigated green roof modules in a subtropical climate. *AoB Plants*, 5.
- Eggl, Urs. 2012. *Illustrated handbook of succulent plants, Crassulaceae*. Springer. 238-239. pp

- Encyclopedia of Life. Biting Stonecrop. *Sedum acre* L. Recuperado el 10 de febrero de 2020 de: [https://eol.org/pages/585418#:~:text=Sedum%20acre%20\(Biting%20Stonecrop\)%20is,Stonecrop%20has%20simple%2C%20broad%20leaves](https://eol.org/pages/585418#:~:text=Sedum%20acre%20(Biting%20Stonecrop)%20is,Stonecrop%20has%20simple%2C%20broad%20leaves)
- Farrell, C., Szota, C., Williams, N. S., & Arndt, S. K. 2013. High water users can be drought tolerant: using physiological traits for green roof plant selection. *Plant and soil*, 372(1-2), 177-193.
- Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L. G., & Principi, P. 2010. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and environment*, 45(8), 1890-1904.
- FLL. 2018. Guidelines for the planning, Construction and Maintenance of Green Roofs. The Landscape Development and Landscaping Research Society e.V. (FLL). (6<sup>th</sup> ed.) Bonn, Germany. 158p.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. 2008. Norma ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007, que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en el Distrito Federal. Recuperado el 17 de agosto de 2019 de: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Estatal/DISTRITO%20FEDERAL/Normas.DFNORM23.pdf>
- Gagliano, A., Detommaso, M., Nocera, F., & Evola, G. 2015. A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional roofs. *Building and Environment*, 90, 71-81.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. (5<sup>a</sup> ed.) Instituto de Geografía- UNAM. México. pp. 19- 22.
- Garrison, N., Horowitz, C., Lunghino, C. A., Devine, J., & Beckman, D. S. 2012. Looking up: how green roofs and cool roofs can reduce energy use, address climate change, and protect water resources in Southern California. Natural Resources Defence Council.
- Gates, D. M. 1965. Heat transfer in plants. *Scientific American*, 213(6), 76-87.
- Getter, K. L., & Rowe, D. B. 2006. The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41(5), 1276-1285.
- Getter, K.L., Rowe, D.B., Andresen, J.A., & Wichman, I.S. 2011. Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern U.S. climate. *Energy and Buildings*, 43:35, 48–57.
- Hansen, D. J. & Weber, D. J. 1975. Environmental factors in relation to the salt content of *Salicornia pacifica* var. *utahensis*. *The Great Basin Naturalist*, 86-96.
- Hansen, D. J. 1974. Aspects of salt tolerance of *Salicornia pacifica* Standl. var. *utahensis* (Tidestrom) Munz. Doctoral dissertation, Brigham Young University, Department of Botany and Range Science. M. C.
- Hashemi, S. S. G., Mahmud, H. B., & Ashraf, M. A. 2015. Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 669-679.
- He, Y., Yu, H., Dong, N., & Ye, H. 2016. Thermal and energy performance assessment of extensive green roof in summer: A case study of a lightweight building in Shanghai. *Energy and Buildings*, 127, 762-773.

- He, Y., Yu, H., Ozaki, A., & Dong, N. 2020. Thermal and energy performance of green roof and cool roof: A comparison study in Shanghai area. *Journal of Cleaner Production*, 122205.
- He, Y., Yu, H., Ozaki, A., Dong, N., & Zheng, S. 2017. Long-term thermal performance evaluation of green roof system based on two new indexes: a case study in Shanghai area. *Building and Environment*, 120, 13–28.
- Hernández-Pérez, I., Zavala-Guillén, I., Xamán, J., Belman-Flores, J. M., Macias-Melo, E. V., & Aguilar-Castro, K. M. 2019. Test box experiment to assess the impact of waterproofing materials on the energy gain of building roofs in Mexico. *Energy*, 186, 115847.
- Hien, W. N., & Jusuf, S. K. 2008. An assessment method for existing greenery conditions in a university campus. *Architectural Science Review*, 51(3), 212-222.
- Horn, R., Taubner, H., Wuttke, M., & Baumgartl, T. 1994. Soil physical properties related to soil structure. *Soil and Tillage Research*, 30(2-4), 187-216.
- IPCC, 2007. *Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. 2002. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and buildings*, 34(6), 563-572.
- Jaffal, I., Ouldboukhitine, S. E., & Belarbi, R. 2012. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable energy*, 43, 157-164.
- Jim, C. Y. 2012. Effect of vegetation biomass structure on thermal performance of tropical green roof. *Landscape and ecological engineering*, 8(2), 173-187.
- Jones, H. G., & Rotenberg, E. 2016. Energy, radiation and temperature regulation in plants. e LS. (Eds.). doi: 10.1002/9780470015902.a0003199.pub2
- Karteris, M., Theodoridou, I., Mallinis, G., Tsiros, E., & Karteris, A. 2016. Towards a green sustainable strategy for Mediterranean cities: assessing the benefits of large-scale green roofs implementation in Thessaloniki, Northern Greece, using environmental modelling, GIS and very high spatial resolution remote sensing data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 510–25.
- Kenai M., Libessart, L., Lassue, S. & Defer D. 2017. Impact of plants occultation on energy balance: Experimental study, *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.024>
- Kluge, M. 1977. Is *Sedum acre* L. a CAM plant?. *Oecologia*, 29(1), 77-83.
- Kono, M., Koga, R., Shimada, M., & Fukatsu, T. 2008. Infection dynamics of coexisting beta-and gammaproteobacteria in the nested endosymbiotic system of mealybugs. *Applied and environmental microbiology*, 74(13), 4175-4184.
- Kornberg, H. 2019. Metabolism. *Encyclopedia Britannica*. Encyclopedia Britannica, Inc. Recuperado el 03 de marzo de 2020 de: <https://www.britannica.com/science/metabolism>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263.

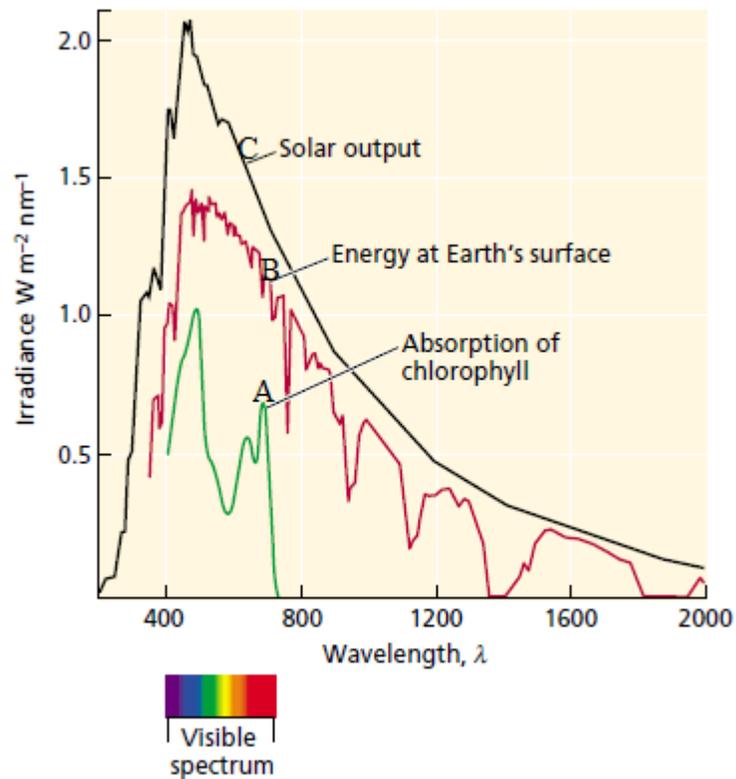
- Lazzarin, R. M., Castellotti, F., & Busato, F. 2005. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings*, 37(12), 1260-1267.
- Li, J. F., Wai, O. W., Li, Y. S., Zhan, J. M., Ho, Y. A., Li, J., & Lam, E. 2010. Effect of green roof on ambient CO<sub>2</sub> concentration. *Building and Environment*, 45(12), 2644-2651.
- Low, G. 2002. *Integral Hydroponics: Indoor Growing Principles for Beginners and Intermediates*. (3<sup>rd</sup> ed.) 66-68 pp
- Lundholm, J., MacIvor, J. S., MacDougall, Z., & Ranalli, M. 2010. Plant species and functional group combinations affect green roof ecosystem functions. *PloS one*, 5(3), e9677.
- Madre, F., Vergnes, A., Machon, N., & Clergeau, P. 2013. A comparison of 3 types of green roof as habitats for arthropods. *Ecological Engineering*, 57, 109-117.
- Mani M. & Shivaraju C. 2016 *Biology*. In: Mani M., Shivaraju C. (Eds.) *Mealybugs and their Management in Agricultural and Horticultural crops*. Springer, New Delhi. pp. 363- 367
- McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., ... & Yezpez, E. A. 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought?. *New phytologist*, 178(4), 719-739.
- Monteiro, M. V., Blanuša, T., Verhoef, A., Richardson, M., Hadley, P., & Cameron, R. W. F. 2017. Functional green roofs: Importance of plant choice in maximising summertime environmental cooling and substrate insulation potential. *Energy and buildings*, 141, 56-68.
- Moonen, P., Defraeye, T., Dorer, V., Blocken, B., & Carmeliet, J. 2012. Urban Physics: Effect of the microclimate on comfort, health and energy demand. *Frontiers of Architectural Research*, 1(3), 197-228.
- Morakinyo, T.E., Dahanayake, K.K.C., Ng, E., & Chow, C.L. 2017. Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: a cosimulation parametric study. *Energy and Buildings*, 145:226–37.
- Nagase, A., & Dunnett, N. 2010. Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: effects of watering and diversity. *Landscape and urban planning*, 97(4), 318-327.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., ... & Rowe, B. 2007. Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 57(10), 823-833.
- Ochsner, T. E., Horton, R., & Ren, T. 2001. A new perspective on soil thermal properties. *Soil science society of America Journal*, 65(6), 1641-1647.
- Olivieri, F., Di Perna, C., D’Orazio, M., Olivieri, L., & Neila, J. 2013. Experimental measurements and numerical model for the summer performance assessment of extensive green roofs in a Mediterranean coastal climate. *Energy and Buildings*, 63, 1-14.
- Or, D., Lehmann, P., Shahraeeni, E., & Shokri, N. 2013. Advances in soil evaporation physics—A review. *Vadose Zone Journal*, 12(4).
- Ordóñez López, E. E., & Pérez Sánchez, M. M. 2015. Comparación del desempeño térmico de techos verdes y techos blancos mediante técnicas IR. *Acta universitaria*, 25(5), 11-19.

- Palla, A., Gnecco, I., & Lanza, L. G. 2010. Hydrologic restoration in the urban environment using green roofs. *Water*, 2(2), 140-154.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union*, 4 (2), pp.439-473.
- Pianella, A., Aye, L., Chen, Z., & Williams, N. S. 2017. Substrate depth, vegetation and irrigation affect green roof thermal performance in a Mediterranean type climate. *Sustainability*, 9(8), 1451.
- Porcaro, M., de Adana, M. R., Comino, F., Pena, A., Martín-Consuegra, E., & Vanwalleghem, T. 2019. Long term experimental analysis of thermal performance of extensive green roofs with different substrates in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 197, 18-33.
- Raji, B., Tenpierik, M. J., & van den Dobbelsteen, A. 2015. The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 610-623.
- Raschke, K. 1960. Heat transfer between the plant and the environment. *Annual Review of Plant Physiology*, 11(1), 111-126.
- Rayner, J. P., Farrell, C., Raynor, K. J., Murphy, S. M., & Williams, N. S. 2016. Plant establishment on a green roof under extreme hot and dry conditions: The importance of leaf succulence in plant selection. *Urban forestry & urban greening*, 15, 6-14.
- Razzaghmanesh, M., Beecham, S., & Kazemi, F. 2014. The growth and survival of plants in urban green roofs in a dry climate. *Science of the Total Environment*, 476–477, 288–97.
- Rodriguez-Rodriguez, M. D., Menzel, F., Aguilera, A. M., & Smith, J. 2005. La mosquilla negra (Diptera: Sciaridae): un problema emergente en los cultivos bajo plástico en Almería. *Phytoma España*, 172, 116-123.
- Rowe, D.B., 2011. Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution*, 159, 2100-2110.
- Saadatian, O., Sopian, K., Salleh, E., Lim, C.H., Riffat, S., Saadatian, E., Toudeshki, A., & Sulaiman, M.Y., 2013. A review of energy aspects of green roofs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 155-168.
- Santamouris, M., 2014. Cooling the cities: A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682-703.
- Schile, L. M., Callaway, J. C., Parker, V. T., & Vasey, M. C. 2011. Salinity and inundation influence productivity of the halophytic plant *Sarcocornia pacifica*. *Wetlands*, 31(6), 1165-1174.
- Schuber, M., & Kluge, M. 1981. In situ studies on crassulacean acid metabolism in *Sedum acre* L. and *Sedum mite* Gil. *Oecologia*, 50(1), 82-87.
- Shafique, M., Kim, R., & Rafiq, M. 2018. Green roof benefits, opportunities and challenges—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 757-773.
- Sharifi, A., & Yamagata, Y. 2015. Roof ponds as passive heating and cooling systems: A systematic review. *Applied energy*, 160, 336-357.

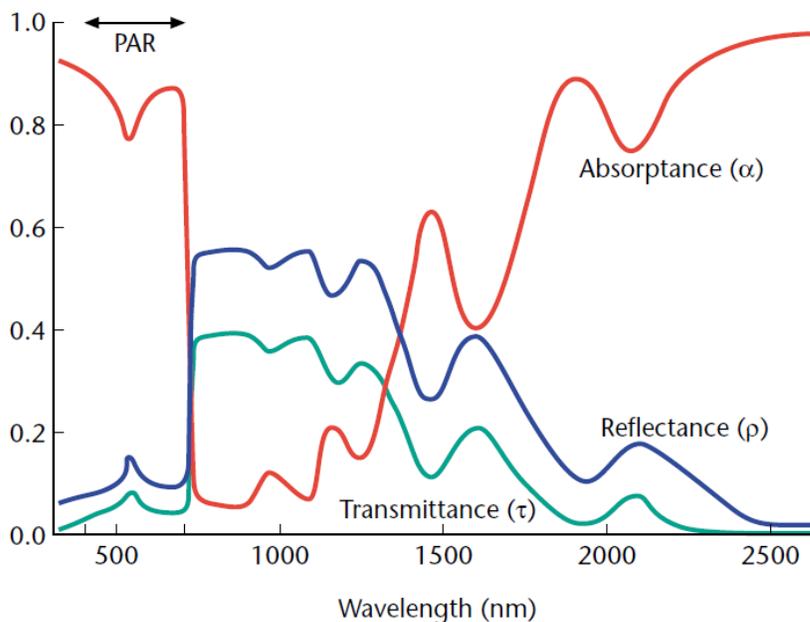
- Song, U., Kim, E., Bang, J. H., Son, D. J., Waldman, B., & Lee, E. J. 2013. Wetlands are an effective green roof system. *Building and Environment*, 66, 141-147.
- Sookhan, N., Margolis, L., & MacIvor, J. S. (2018). Inter-annual thermoregulation of extensive green roofs in warm and cool seasons: Plant selection matters. *Ecological engineering*, 123, 10-18.
- Spanaki, A. 2007. Comparative studies on different type of roof ponds for cooling purposes: literature review. Greece: National Technical University of Athens, 1009-1013.
- Standard, A. S. H. R. A. E. 2010. Standard 55-2010, Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- Standard, A. S. T. M. 2006. ASTM E490-00a solar constant and zero air mass solar spectral irradiance tables. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Standley, P. C. 1916. North American Flora. Chenopodiales. Chenopodiaceae. Vol. 21, pt. 1. The New York Botanical Garden. pp. 80-83.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. 2015. Plant physiology and development. Sunderland, MA: Sinauer Associates. Pp 111-192.
- Takebayashi, H., & Moriyama, M. 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment*, 42(8), 2971-2979.
- Tan, C. L., Tan, P. Y., Wong, N. H., Takasuna, H., Kudo, T., Takemasa, Y., Lim, C. V. J & Chua, H. X. V. 2017. Impact of soil and water retention characteristics on green roof thermal performance. *Energy and Buildings*, 152, 830-842.
- Taylor, H., & Brar, G. S. 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil and Tillage Research*, 19(2-3), 111-119.
- Teemusk, A., & Mander, Ü. 2010. Temperature regime of planted roofs compared with conventional roofing systems. *Ecological Engineering*, 36(1), 91-95.
- Theodosiou, T. 2009. Green roofs in buildings: Thermal and environmental behaviour. *Advances in Building Energy Research*, 3(1), 271-288.
- Thuring, C. E., & Dunnett, N. P. 2019. Persistence, loss and gain: Characterising mature green roof vegetation by functional composition. *Landscape and Urban Planning*, 185, 228-236.
- Van Mechelen, C., 2015 March. Nature as a template for a new concept of extensive green roofs. Doctoral thesis. Université d'Avignon, France & University of Leuven, Belgique. pp 27-41.
- Van Mechelen, C., Van Meerbeek, K., Dutoit, T., & Hermy, M. 2015a. Functional diversity as a framework for novel ecosystem design: The example of extensive green roofs. *Landscape and Urban Planning*, 136, 165-173.
- Van Mechelen, C., Dutoit, T., & Hermy, M. 2015b. Adapting green roof irrigation practices for a sustainable future: A review. *Sustainable Cities and Society*, 19, 74-90.
- VanWoert, N. D., Rowe, D. B., Andresen, J. A., Rugh, C. L., & Xiao, L. 2005. Watering regime and green roof substrate design affect Sedum plant growth. *HortScience*, 40(3), 659-664.

- Vijayaraghavan, K. 2016. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and sustainable energy reviews*, 57, 740-752.
- Warne, J. E. 1971. *Paleoecological aspects of a Moder Coastal Lagoon* (Vol. 87). University of California press. United States of America. p. 56-57.
- Whittinghill, L. J., Rowe, D. B., & Cregg, B. M. 2013. Evaluation of vegetable production on extensive green roofs. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 37(4), 465-484.
- Wilke, B. M. 2005. Determination of Chemical and Physical Soil Properties. In: Margesin, R., Schinner, F. (Eds.), *Manual for soil analysis-monitoring and assessing soil bioremediation* (Vol. 5). Springer Science & Business Media. Berlin, Germany.
- Wong, N. H., & Jusuf, S. K. 2008. GIS-based greenery evaluation on campus master plan. *Landscape and Urban Planning*, 84(2), 166-182.
- Woo, I., & Takekawa, J. Y. 2012. Will inundation and salinity levels associated with projected sea level rise reduce the survival, growth, and reproductive capacity of *Sarcocornia pacifica* (pickleweed)?. *Aquatic botany*, 102, 8-14.
- Xamán, J., Cisneros-Carreño, J., Hernández-Pérez, I., Hernández-López, I., Aguilar-Castro, K. M., & Macias-Melo, E. V. 2017. Thermal performance of a hollow block with/without insulating and reflective materials for roofing in Mexico. *Applied Thermal Engineering*, 123, 243-255.
- Yaghoobian, N., & Srebric, J. 2015. Influence of plant coverage on the total green roof energy balance and building energy consumption. *Energy and Buildings*, 103, 1-13.
- Yan B. 2011. The research of ecological and economic benefits for green roof. *Applied Mechanics and Materials*, 71, 2763-6.
- Yeom, D. & LaRoche, P. 2017. Investigation on the cooling performance of a green roof with a radiant cooling system. *Energy and Buildings*, 149, 26-37.
- Zhang, G., He, B. J., Zhu, Z., & Dewanker, B. J. 2019. Impact of morphological characteristics of green roofs on pedestrian cooling in subtropical climates. *International journal of environmental research and public health*, 16(2), 179.

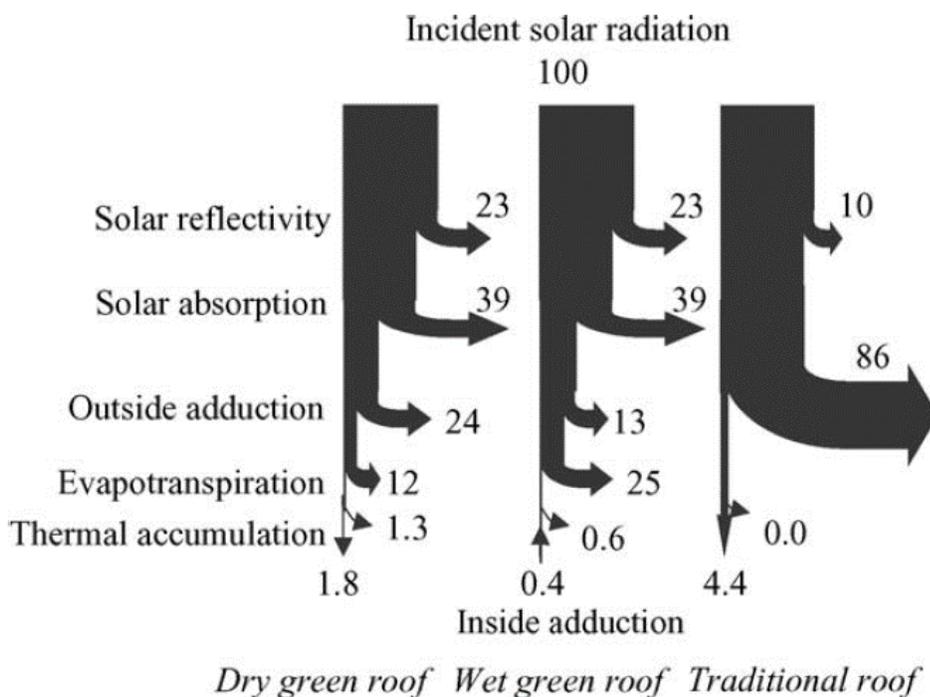
## Anexos



**Figura 25.** El espectro solar y su relación con el espectro de absorción de clorofila. La curva A es el espectro de absorción de la clorofila en función de la longitud de onda; la clorofila absorbe en las porciones azul (aproximadamente 430 nm) y rojo (aproximadamente 660 nm), mientras que la luz verde al centro de la región visible no se absorbe eficientemente, sino que es reflejada y les da a las plantas su característico color verde. La curva B es la energía que recibe la superficie de la tierra, los valles después de los 700nm representan la absorción de energía solar por moléculas en la atmósfera principalmente vapor de agua. La curva C es la salida de energía del sol. Tomado de Taiz *et al.* (2015).



**Figura 26.** Propiedades espectrales de una hoja típica en las longitudes de onda visibles y cerca del infrarrojo. La absorptancia ( $\alpha$ ) es alta en el espectro fotosintéticamente activo entre 400 y 700 nm, mientras que la reflectancia ( $\rho$ ) y la transmitancia ( $\tau$ ) son mayores cerca del infrarrojo. Tomado de Jones & Rotenberg (2016).



**Figura 27.** Comparación de los intercambios energéticos de un techo verde seco o húmedo con un techo tradicional, comenzando con 100 unidades de radiación solar incidente en verano. Tomado de Lazzarin *et al.*, 2005.