



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CHILE

# TECHOS Y MUROS VEGETATIVOS EN CHILE:

Propuesta de política pública basada en I+D para la  
implementación de techos y muros vegetativos en Chile



Sergio Vera  
Margareth Viecco  
Aldo Rojas  
Waldo Bustamante

## 4. BENEFICIOS ECOSISTEMICOS DE CUBIERTAS VEGETATIVAS EN CLIMAS SEMIARIDOS



Techo vegetativo Clínica UC-CHRISTUS San Carlos de Apoquindo

La literatura muestra que las cubiertas vegetativas tienen una serie de beneficios ecosistémicos tanto para los edificios como para la ciudad. A nivel de edificios, estos beneficios corresponden al ahorro de energía de climatización, incremento del confort térmico de sus usuarios, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, aislación acústica, mayor vida útil de la impermeabilización, aumento de la plusvalía, entre otros. A nivel urbano, los beneficios incluyen el control de las aguas lluvia, captura de contaminación atmosférica, reducción del efecto isla de calor urbano, resiliencia frente a las olas de calor, fomento de la biodiversidad y recuperación del espacio natural. Sin embargo, algunos de estos beneficios han sido cuantificados en diversos climas y condiciones particulares, o simplemente no han sido cuantificados, dificultando la toma de decisiones sobre la incorporación de cubiertas vegetativas en edificaciones. En Chile, investigaciones lideradas por la Pontificia Universidad Católica de Chile han evaluado algunos de los beneficios e impactos de los techos y muros vegetativos en condiciones de clima semiárido, como el de la Región Metropolitana en Chile, lo que ha permitido no sólo cuantificar los beneficios como el ahorro de energía, mitigación de la contaminación atmosférica, potencial reducción del efecto isla de calor urbano, y control de aguas lluvias, sino también desarrollar las herramientas de modelación y experimentales que permiten realizar dichas evaluaciones.

En este capítulo se presenta un resumen de las investigaciones aplicadas realizadas por un equipo interdisciplinario de la Pontificia Universidad Católica de Chile y en colaboración con investigadores de las universidades Colorado School of Mines (Golden, CO, Estados Unidos), University of Melbourne (Australia) y University of Notre Dame (Notre Dame, IN, Estados Unidos). Estos proyectos se han originado a partir de distintas problemáticas ambientales, evidenciando los beneficios potenciales del uso de cubiertas vegetativas en edificaciones. Se destacan tres beneficios: mitigación de la contaminación atmosférica, mejoramiento de la eficiencia energética en edificaciones y mitigación del calentamiento de las ciudades.

Los resultados de las investigaciones interdisciplinarias que se presentan en este capítulo permiten concluir que los beneficios de techos y muros vegetativos a nivel de edificios y urbano requieren ser cuantificados a nivel local, y que se requieren herramientas de simulación que permitan evaluar el impacto de techos y muros vegetativos a nivel de edificio y ciudad, de tal manera que faciliten la toma de decisiones en las etapas tempranas de diseño de los edificios. Los resultados de estas investigaciones demuestran que:

- La vegetación utilizada en cubiertas vegetativas presenta un alto potencial de captura de material particulado ( $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$ ), aunque es altamente dependiente de las especies de vegetación utilizadas, la mezcla de varias especies y su nivel de exposición a fuentes de material particulado. La especie que presentó un mayor potencial de captura de material particulado (MP) fue el *Sedum album* con un total de  $29,33 \mu\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$ , valor que considera el  $MP_{2,5}$ ,  $MP_{10}$  y MP capturado en el *wax* o cera sobre la superficie de las hojas.
- El desempeño energético de edificios del tipo comercial e industrial puede ser significativamente mejorados mediante la incorporación de techos y muros vegetativos en su envolvente. Para el caso de un supermercado prototipo ubicado en Santiago de Chile, la reducción de las cargas térmicas de enfriamiento puede alcanzar hasta 34,4% utilizando muros y techos vegetativos. El impacto de techos y muros vegetativos en el consumo de energía de edificios es dependiente de diversos parámetros de diseño tales como el tipo de vegetación, el índice de área foliar de la vegetación, la presencia o ausencia de una capa de aislación térmica bajo el sustrato, entre otros.
- Las cubiertas vegetativas tienen un alto potencial de reducir la temperatura del aire urbano, lo que contribuye a mitigar el efecto isla de calor urbano y las olas de calor. Estos pueden reducir la temperatura promedio horario en  $2^\circ\text{C}$  o más.

Las investigaciones realizadas en la Pontificia Universidad Católica de Chile demuestran que se puede cuantificar los beneficios de las cubiertas vegetativas a nivel de edificio y a escala urbana. Por ello, es muy importante que estas tecnologías se incorporen a la edificación y

ciudad con un propósito, tal que su diseño responda a uno o varios objetivos, los que pueden ser ahorro de energía de climatización en edificios, reducción de la contaminación atmosférica y del efecto isla de calor, mitigación de las olas de calor, u otros. Sin embargo, el diseño de techos o muros vegetativos es un proceso complejo que requiere un equipo de diseño interdisciplinario que permita alcanzar uno o más de estos beneficios ecosistémicos.



**Figura 4.1.** Diferentes especies de Sedum en techo vegetativo en Laboratorio de Infraestructura Vegetal de Edificios (LIVE UC).

#### **4.1. Mitigación de contaminación atmosférica: FONDEF ID15I10104**

La literatura es clara respecto a que la vegetación de techos y muros vegetativos tiene un alto potencial de captura de MP. El MP es uno de los principales contaminantes del aire en las ciudades del centro, sur y sur austral de Chile, que superan las concentraciones de MP establecidas en la normativa chilena y la Organización Mundial de la Salud (OMS). El material particulado fino ( $MP_{2,5}$ ) es el más dañino para la salud ya que produce enfermedades respiratorias, cerebrovasculares y cardiovasculares, incrementando las muertes prematuras y la asistencia a servicios de atención médica. El Ministerio de Medio Ambiente ha establecido que, en Chile, más de 10 millones de personas están expuestas a

contaminación por material particulado grueso ( $MP_{10}$ ) y fino ( $MP_{2,5}$ ), y que se producen más de 4.000 muertes prematuras al año por dicho motivo. Según datos del mismo Ministerio, durante el año 2017 se presentaron cerca de 3.500 casos de mortalidad prematura debido a enfermedades cardiopulmonares relacionadas a la exposición crónica a  $MP_{2,5}$  (MMA, 2018), lo que implicó un costo social de US\$2.400 millones. En Santiago de Chile, la principal fuente de  $MP_{2,5}$  son las emisiones de vehículos, mientras que en las ciudades del centro-sur y sur-austral de Chile, la principal fuente de emisión de MP es el uso de leña como combustible para calefaccionar viviendas de baja o nula eficiencia energética, con uso de sistemas de combustión no eficientes, y frecuentemente con leña no certificada (CEDEUS, 2019). Es reconocido y con base científica que la vegetación urbana (árboles, arbustos, césped, cubresuelos, cubiertas vegetativas y otros sistemas vegetales) tiene la capacidad de capturar MP, pero hay limitada información respecto al potencial de captura de  $MP_{2,5}$  y  $MP_{10}$  de la vegetación utilizada en cubiertas vegetativas.

El proyecto FONDEF ID15110104 “Desarrollo de cubiertas vegetales de edificios para la mitigación de la contaminación atmosférica urbana a través de la captura de material particulado en clima semiárido”, apoyado por el programa FONDEF de ANID (ex-CONICYT), Ministerio del Medio Ambiente y BESTPLANT, cuantificó la captura de  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  de las especies de plantas más utilizadas en techos y muros vegetativos en la Región Metropolitana de Chile, las que se muestran en la Figura 4.2, y que son parte del catastro de techos y muros vegetativos presentado en los Capítulos 2 y 3. Las mediciones de  $MP_{10}$  y  $MP_{2,5}$  fueron realizadas en instalaciones del Laboratorio de Infraestructura Vegetal de Edificios (LIVE) UC, el cual está ubicado en el Campus San Joaquín de la Pontificia Universidad Católica de Chile (Figura 4.3).

Los resultados de este proyecto muestran que las especies tienen diferente potencial de captura de MP, ya sea este  $MP_{2,5}$ ,  $MP_{10}$  o el MP capturado en el *wax* de la superficie de las hojas. La Tabla 4.1 muestra la cantidad total de MP capturado por 5 especies usadas en techos vegetativos y 4 especies utilizadas en muros vivos (Viecco et al., 2018). De acuerdo

con estos resultados, el *Sedum album* presenta un desempeño sobresaliente en cuanto al potencial de captura de MP, mientras que los *Sedum reflexum* y *Sedum palmeri* junto al *Lampranthus spectabilis* presentan un potencial medio, y las especies *Lavandula spectabilis*, *Erigeron karvinskianus* y *Pittosporum tobira* presentan los menores desempeños. Parte de estos resultados se han incorporado en la “Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión 611134-1-LE19”<sup>3</sup>.

**Tabla 4.1.** Captura de material particulado total, MP<sub>2,5</sub>, MP<sub>10</sub> y MP capturado en el wax la superficie de las hojas (monocultivos). (Adaptado de Viecco et al. (2018)).

Especie	Total de MP capturado (µg/cm <sup>2</sup> ·h)	MP <sub>2,5</sub> (µg/cm <sup>2</sup> ·h)	MP <sub>10</sub> (µg/cm <sup>2</sup> ·h)	MP capturado en el wax de la superficie de las hojas (µg/cm <sup>2</sup> ·h)
<i>Sedum album</i>	29,33 ± 8,74	1,32 ± 0,49	3,70 ± 1,48	25,62 ± 7,69
<i>Sedum reflexum</i>	7,77 ± 1,34	0,47 ± 0,13	2,57 ± 0,80	5,20 ± 1,11
<i>Sedum palmeri</i>	6,93 ± 0,42	0,36 ± 0,19	2,32 ± 0,63	4,62 ± 0,53
<i>Lampranthus spectabilis</i>	6,28 ± 1,16	0,40 ± 0,13	4,70 ± 1,29	1,58 ± 0,29
<i>Sedum spurium p.</i>	2,93 ± 0,32	0,09 ± 0,02	0,85 ± 0,21	2,09 ± 0,39
<i>Aptenia cordifolia</i>	2,20 ± 0,44	0,14 ± 0,05	1,69 ± 0,42	1,18 ± 0,19
<i>Lavandula angustifolia</i>	1,98 ± 0,16	0,23 ± 0,04	0,84 ± 0,36	1,14 ± 0,29
<i>Erigeron karvinskianus</i>	1,62 ± 0,42	0,10 ± 0,03	0,97 ± 0,28	0,52 ± 0,11
<i>Pitosporum tobira</i>	1,38 ± 0,32	0,12 ± 0,04	0,48 ± 0,17	0,41 ± 0,09

El impacto de una especie con alto potencial de captura de material particulado en la concentración de MP versus el impacto de una especie de bajo potencial de captura se observa en la Figura 4.4. El *Sedum album* reduce significativamente la concentración máxima de MP<sub>2,5</sub> y MP<sub>10</sub> a menos de la mitad que en el caso sin vegetación y reduce las

<sup>3</sup> DFM Consultores Ambientales (2019). *Guía de Alternativas de Compensación de Emisiones para Fuentes de Combustión 611134-1-LE19*. Disponible en:

<http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuiid=2d6d584f-6d61-4ff6-bb30-46da58c492f2&fname=Gu%C3%ADa%20de%20Alternativas%20de%20Compensaci%C3%B3n%20de%20Emisiones%20para%20Fuentes%20de%20Combusti%C3%B3n-Enero2020.pdf&access=public>

concentraciones de MP significativamente. Por otro lado, la *Lavandula angustifolia*, que tiene un muy bajo potencial de captura de MP, prácticamente no genera un cambio en las concentraciones de MP<sub>2,5</sub> y MP<sub>10</sub>. Esto evidencia la relevancia de la selección de vegetación con fines de mitigar no sólo la contaminación atmosférica urbana, sino también la contaminación del aire intramuros.



*Lampranthus spectabilis*



*Sedum album*



*Aptenia cordifolia*



*Pittosporum tobira*



*Lavandula angustifolia*



*Erigeron karvinskianus*



*Sedum reflexum*



*Sedum spurium p.*



*Sedum palmeri*

**Figura 4.2.** Especies de muros y techos vegetativos en que se evaluó su captura de MP (Viecco et al., 2018).

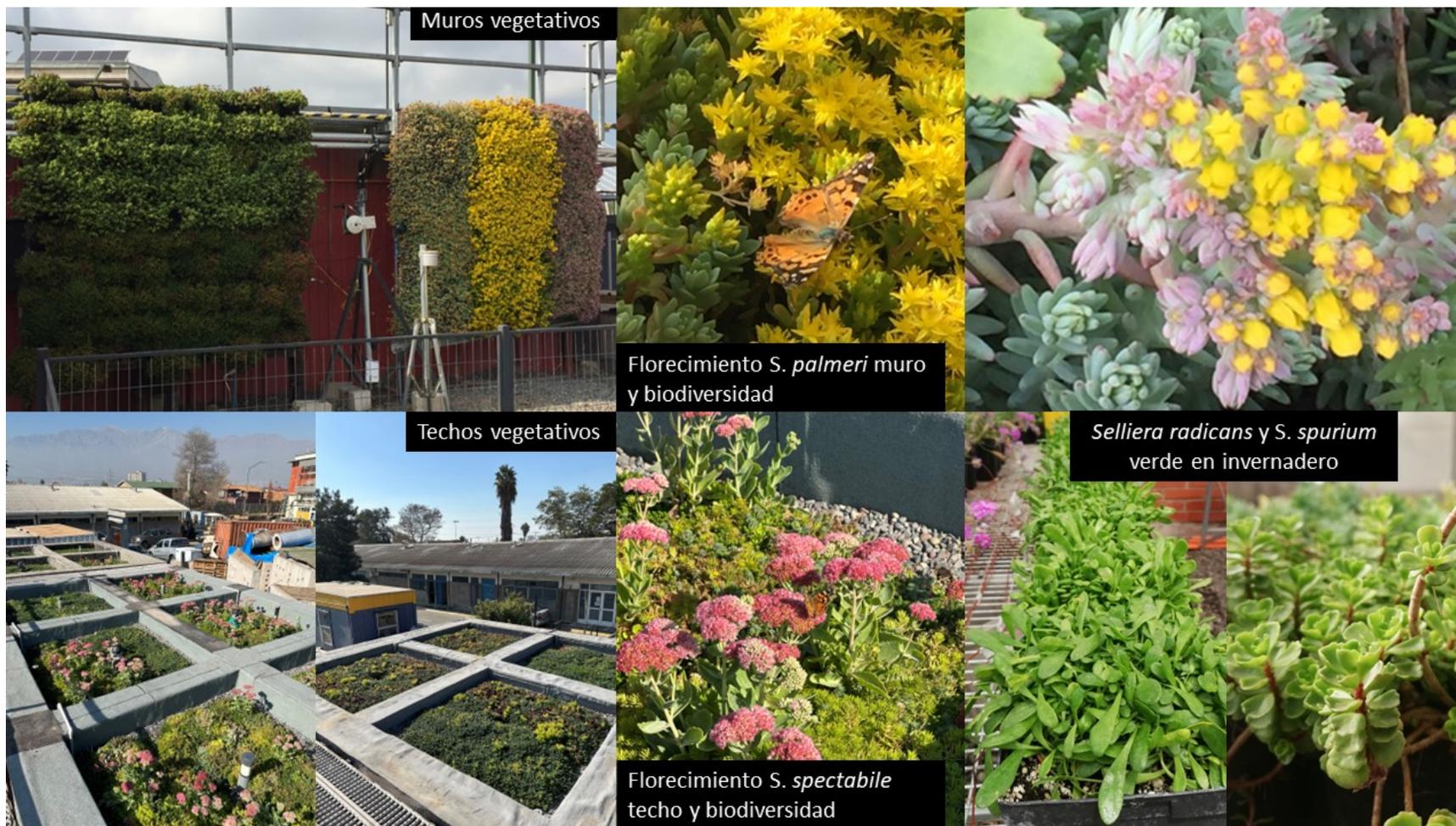
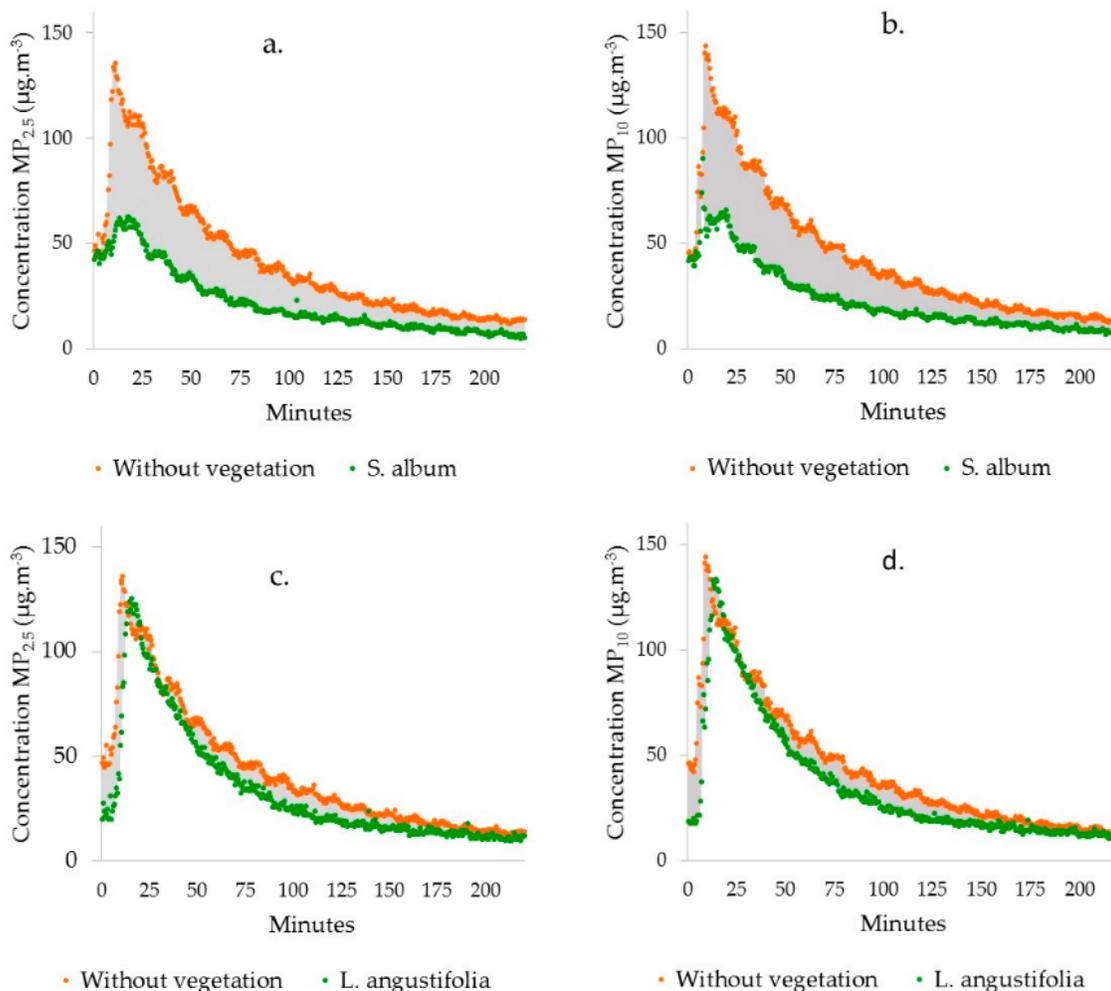


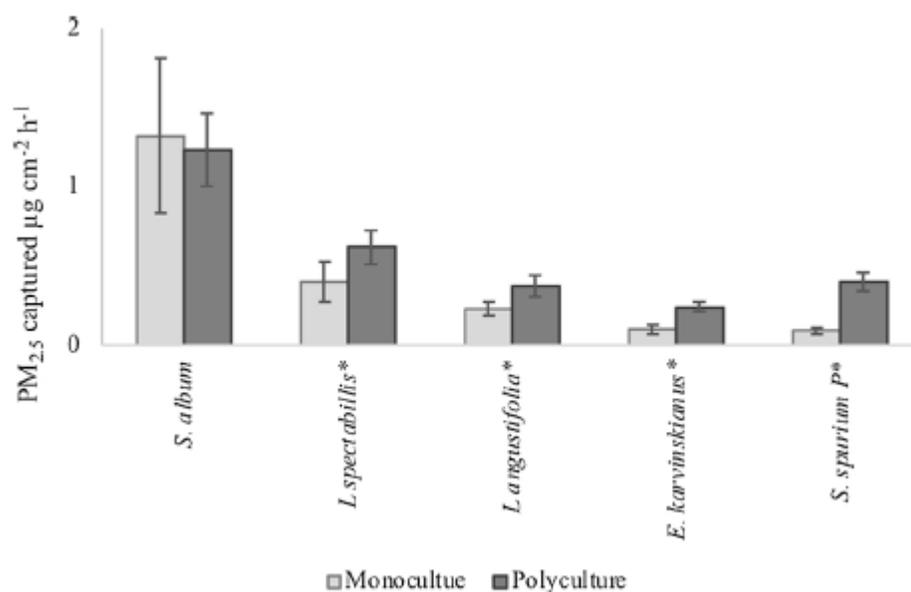
Figura 4.3. Laboratorio de Infraestructura Vegetal de Edificios (LIVE) UC.



**Figura 4.4.** Impacto de la vegetación de techos y muros vegetativos en la disminución de concentraciones de MP (Viecco et al., 2018)

A pesar de que este estudio ha comprobado que existen algunas especies utilizadas en techos y muros vegetativos que tienen un alto potencial de captura de MP para reducir la contaminación atmosférica o intramuros (Lundholm et al., 2010), el comportamiento de una mezcla de especies puede ser notoriamente diferente e incluso mejor, ya que usualmente el desempeño multiespecies es mejor que especies individuales en distintos ámbitos, tales como mayor sobrevivencia, menores requerimientos hídricos, menores mantenciones, etc. Por ello, una segunda etapa de este proyecto (Vera et al., 2021) evaluó el impacto de la biodiversidad en los techos y muros vegetativos en la captura de MP<sub>2,5</sub>. Los

resultados sugieren que la biodiversidad de especies usadas en muros y techos vegetativos incrementa la captura de  $MP_{2,5}$ , particularmente para especies con captura relativamente baja cuando se usan como monocultivos. La Figura 4.5 muestra una comparación entre el  $MP_{2,5}$  capturado por la vegetación para cada especie testada en monocultivo y en policultivo. Estos resultados muestran que en cuatro de las cinco especies se muestra que el  $MP_{2,5}$  capturado por las especies en policultivos es mayor, a excepción del *S. album* que mantiene su captura en ambos escenarios. Por lo tanto, es esperable que soluciones de techos y muros vegetativos con policultivos presenten mayores capturas de MP.

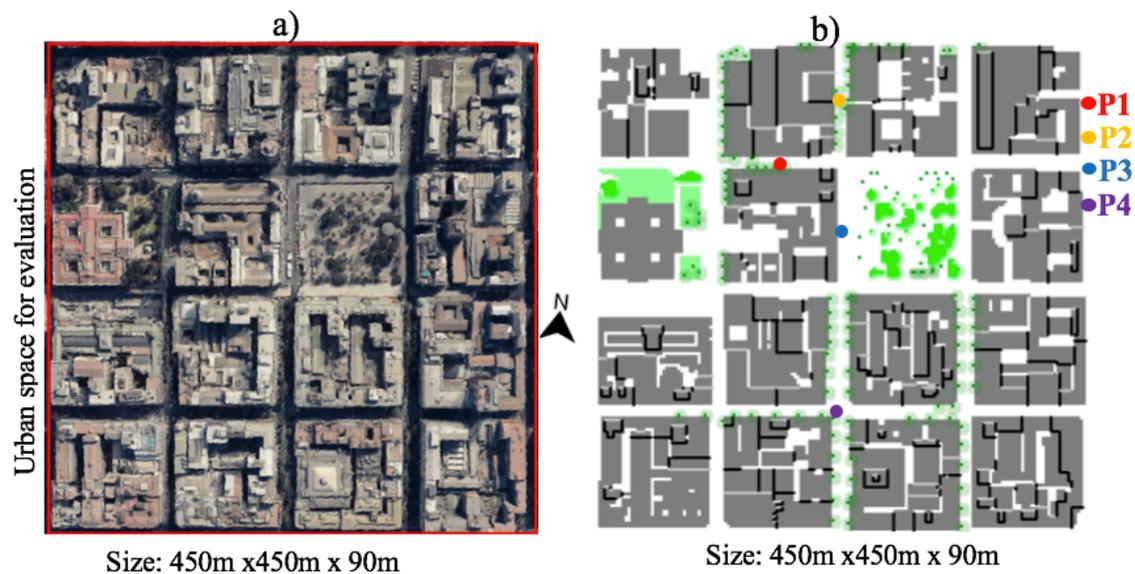


**Figura 4.5.**  $MP_{2,5}$  capturado por la vegetación en techos vegetativos en monocultivos y policultivos. Especies marcadas con (\*) muestran diferencias significativas entre monocultivos y policultivos con 95% de confianza ( $p < 0,05$ ) (Vera et al., 2021).

Otro aspecto relevante para analizar el potencial de techos y muros vegetativos en la reducción de la contaminación del aire es el diseño y distribución en un barrio urbano. En esta investigación se trabajó con un caso de estudio de un barrio compuesto por 16 manzanas en la comuna de Santiago Centro, entre las calles Santo Domingo por el norte, San Antonio por el este, Agustinas por el sur y Morandé por el oeste, como se puede ver en la Figura 4.6. Se utilizó la herramienta ENVI-met, que modela el microclima urbano. ENVI-met permitió modelar una parte del área metropolitana con edificios, vegetación,

superficies pavimentadas y emisiones de tráfico para estimar la reducción de la contaminación del aire para diferentes alturas de edificios y porcentajes de cobertura de muros y techos vegetativos. Los resultados mostraron que la mejora de la calidad del aire por muros y techos vegetativos depende de la altura del edificio, la infraestructura urbana circundante, la cobertura de techos y/o muros vegetativos y la proximidad de estos a la fuente contaminante. Concretamente, se observó que entre el 50% y el 75% de la cobertura de techos vegetativos en edificios de baja altura podría mejorar la calidad del aire a nivel de peatones/viajeros, logrando una reducción entre un 3,7 y 2,7% en la concentración de  $MP_{2,5}$  (en edificios de 5 y 10 m de altura, respectivamente). Mientras que una cobertura solo del 25% de muros vegetativos produce la mayor captura de  $MP_{2,5}$ , mostrando una reducción de hasta el 15% de la concentración de  $MP_{2,5}$  en todos los casos.

A través de este estudio es posible concluir que el índice de cobertura de la vegetación en los muros o techos vegetativos es un factor clave que determina la captura del  $MP_{2,5}$ . Además, se observó que el valor óptimo del índice de cobertura no es necesariamente 100%, por ende, se requiere evaluar este en base a simulaciones para las condiciones específicas de tráfico y morfología urbana en cada proyecto.



**Figura 4.6.** Visualización del caso de estudio de Santiago Centro. a) imagen satelital, b) modelo en ENVI-met mostrando los puntos de análisis P1, P2, P3 y P4 (Viecco et al., 2021).

#### **4.2. Eficiencia energética de edificios: FONDECYT 1150675 y FONDECYT 1181610**

Se ha comprobado en la literatura que los techos vegetativos mejoran el desempeño térmico de los techos de edificios y tienen el potencial de reducir el consumo de energía de climatización de las edificaciones debido a cuatro mecanismos principales:

- Sombra provista por la vegetación: la vegetación intercepta y absorbe la radiación solar utilizándola para sus procesos biofísicos como la fotosíntesis (He et al., 2017).
- Evapotranspiración del sistema biofísico conformado por la vegetación y el sustrato: la evapotranspiración corresponde a la transpiración de la vegetación y evaporación de la humedad del sustrato. Estos procesos permiten enfriar el ambiente alrededor del techo vegetativo y edificio (American Society of Civil Engineers, 2016; Boulet et al., 2020).
- Aislación térmica adicional provista por el sustrato: la aislación térmica del techo se incrementa debido a que se agrega una capa adicional como lo es el sustrato. No obstante, este aumento puede ser marginal ya que los sustratos presentan conductividades térmicas 10 veces mayores que los materiales aislantes térmicos, mientras que, por otro lado, el sustrato tiene humedad que reduce su capacidad de aislación térmica.
- Inercia térmica adicional provista por el sustrato: la inercia térmica es la habilidad de los materiales de absorber calor y liberarlo posteriormente distribuido en el tiempo (que puede llegar a ser varias horas después), y dependiendo de la masa térmica del edificio puede o no tener efectos importantes en el mejoramiento de la eficiencia térmica del edificio. Por ejemplo, si la estructura de techumbre es de hormigón armado (alta masa térmica), el techo vegetativo no mejoraría el desempeño térmico del edificio producto de la inercia térmica del sustrato ya que su aporte es marginal a la masa térmica del techo existente, pero si lo podrá hacer por otros mecanismos como sombreado y evapotranspiración. Sin embargo, si el edificio es de estructura liviana (ej. madera o acero liviano), la incorporación de

techo vegetativo podría mejorar el desempeño térmico del edificio mediante el aumento de la inercia térmica (Vera et al., 2015, 2017).

Estos mecanismos causan una disminución de las ganancias de calor a través del techo de una edificación. Sin embargo, el impacto del techo vegetativo en el desempeño energético de edificios depende de factores como el clima, tipo de vegetación y su cobertura, tipo de sustrato y su contenido de humedad, entre otros. Estos parámetros usualmente no son seleccionados con el fin del ahorro energético o reducción de emisiones de gases de efecto invernadero cuando se toman decisiones en las etapas tempranas de diseño de edificaciones. Otro aspecto relevante por considerar es en qué tipo de edificaciones es esperable mayores beneficios del techo vegetativo en este ámbito. En este sentido, es esperable que los mayores ahorros energético se produzcan en edificios con grandes extensiones de techo y a lo más 2 pisos de altura; es decir, edificios industriales y comerciales como centros de distribución, supermercados, edificios de comercialización de herramientas y equipos de construcción, centros comerciales de barrio (conocidos como *strip centers*), entre otros.

Para abordar en detalle esta temática, se ejecutaron los proyectos FONDECYT 1150675 “Modelamiento de la transferencia de calor y humedad a través de techos verdes y muros vivos para evaluar su influencia en el consumo de energía de edificios industriales en climas semiáridos” y FONDECYT 1181610 “¿Qué plantar en techos verdes? Maximizando el potencial de enfriamiento de techos verdes para ahorro de energía en edificios comerciales y mitigación del efecto isla de calor en climas semiáridos”, ambos apoyados por el programa FONDECYT de ANID (ex-CONICYT).

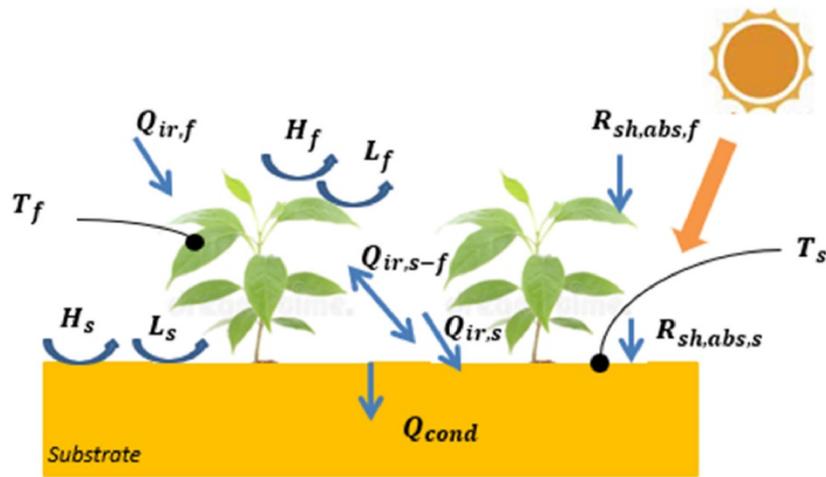
Existen muy pocas herramientas de simulación energética de edificios que permitan evaluar el impacto de techos y muros vegetativos en el desempeño energético de edificios. Una de estas herramientas es DesignBuilder® que incluye el modelo EcoRoof de EnergyPlus®. Basados en esta herramienta, Vera et al. (2017) evaluaron el impacto de un techo

vegetativo en el consumo de energía de un supermercado. Como parte de este estudio se concluyó que el techo vegetativo tiene un impacto significativo en reducir las demandas de energía de enfriamiento (llamadas también cargas de enfriamiento) cuando el techo no está aislado térmicamente. En consecuencia, el contar con una capa de aislación térmica del techo reduce el impacto del techo vegetativo. Los resultados de esta investigación muestran que para un supermercado prototipo ubicado en Santiago, se puede reducir hasta un 18% las demandas de energía de enfriamiento usando un techo vegetativo no aislado térmicamente comparado con un techo tradicional aislado térmicamente. Además, como parte de este estudio, Vera et al. (2017) concluyó que el índice de área foliar (LAI<sup>4</sup>, por sus siglas en inglés) de la vegetación es el parámetro de diseño que más influye en el impacto del techo vegetativo. Por otro lado, se observó que el techo vegetativo no sólo reduce las ganancias de calor a través del techo, sino que también facilita que se disipen las ganancias de calor internas (calor generado por las personas, sistemas de iluminación y equipos o electrodomésticos) hacia el exterior a través del techo vegetativo, reduciendo las demandas de energía de aire acondicionado.

Debido a que existen escasas herramientas de simulación energética que permitan evaluar el impacto de techos y muros vegetativos, en el Proyecto FONDECYT 1150675 se acoplaron a EnergyPlus® dos modelos numéricos de transferencia de calor de techos vegetativos, el de Sailor (2008) y el de Tabares-Velasco & Srebric (2012). Estos modelos fueron validados comparando los resultados obtenidos por los modelos de simulación con datos experimentales de techos vegetativos ubicados en Santiago (Chile), Melbourne (Australia) y Chicago (EE. UU.). Los modelos numéricos que permiten estimar la transferencia de calor a través de techos vegetativos son altamente complejos e incluyen los diferentes procesos que se muestran en la Figura 4.7.

---

<sup>4</sup> LAI: *leaf area index*, por sus siglas en inglés, o índice de área foliar (IAF) en  $m^2/m^2$  es una variable que, en términos simples, corresponde al total del área de una cara del tejido fotosintético ( $m^2$ ) por la unidad de superficie del terreno ( $m^2$ ).

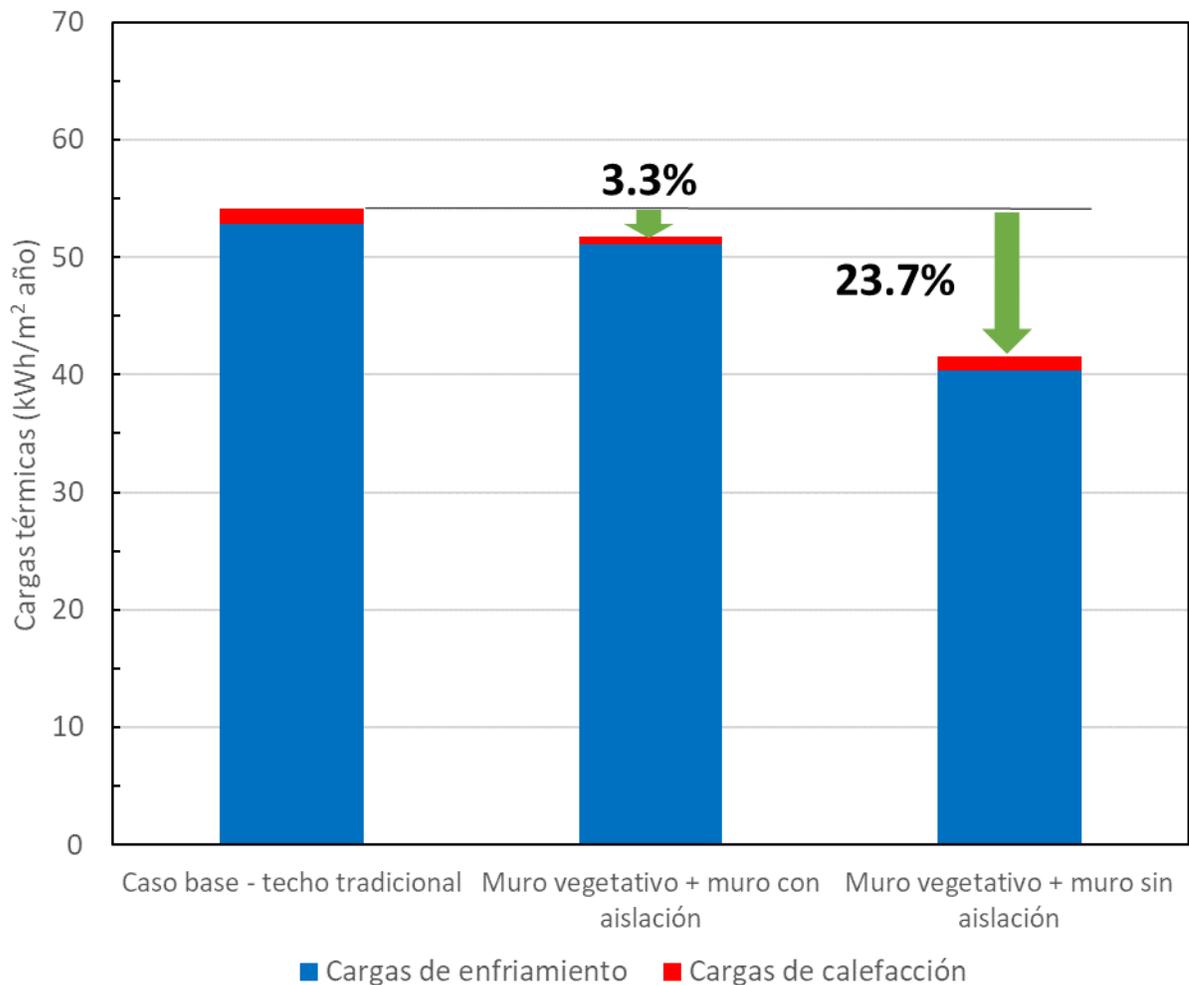


**Figura 4.7.** Flujos de calor en techo vegetativo donde,  $T$ : temperatura,  $Q_{ir}$ : radiación de onda larga absorbida del cielo,  $Q_{ir,s-f}$  flujo de radiación de onda larga entre sustrato y follaje,  $H$ : flujo de calor sensible,  $L$ : flujo de calor latente,  $Q_{cond}$ : flujo de calor por conducción a través del sustrato,  $R_{sh,abs}$ : radiación de onda corta absorbida. Los sufijos  $f$  y  $s$  indican follaje y sustrato, respectivamente (Vera et al., 2018).

Adicional a la implementación de los modelos numéricos de transferencia de masa y calor a través de techos vegetativos, se incluyó el modelo Integrated Hydrological Model at Residential Scale (IHMORS), que es un modelo continuo que simula los procesos hidrológicos más importantes, así como las prácticas de irrigación de techos vegetativos (Herrera et al., 2017; Reyes-Paecke et al., 2019). Este modelo permite estimar más precisamente el contenido de humedad del sustrato, que afecta el desempeño del techo vegetativo, y tiene la capacidad de también calcular la escorrentía y las necesidades de riego de los techos vegetativos bajo las condiciones climáticas de la zona.

Por otro lado, se adaptaron estos modelos numéricos de techos vegetativos para ser usados en muros vivos, los cuales fueron validados con datos experimentales obtenidos en LIVE UC como parte de los proyectos FONDECYT 1150675 y FONDECYT 1181610. En cuanto al impacto de muros vivos en el consumo de energía de edificios, García et al. (2022) concluye que un muro vegetativo no aislado térmicamente puede reducir en hasta un 23,7% las

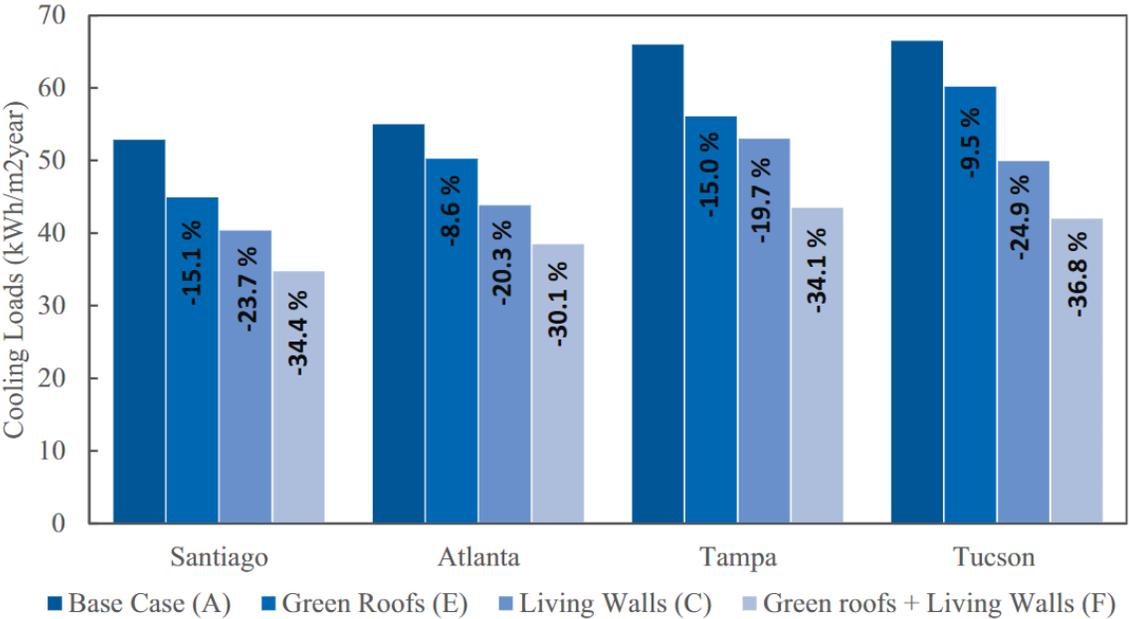
demandas de energía de aire acondicionado en un supermercado prototipo ubicado en Santiago (Figura 4.8). Además, similar a los resultados encontrados por Vera et al. (2017) para techos vegetativos, García et al. (2022) muestra que la aislación térmica del muro vivo reduce significativamente su efecto, y que el muro vegetativo es más efectivo que la aislación térmica en reducir las demandas de energía de aire-acondicionado.



**Figura 4.8.** Impacto de muro vegetativo en demanda de energía de supermercado en Santiago (García, 2019; García et al., 2022).

Además, en el proyecto FONDECYT 1181610 se ha comparado la eficiencia de un techo vegetativo y muros vivos en reducir el consumo de energía de un supermercado prototipo ubicado en la ciudad de Santiago de Chile. La Figura 4.9 muestra que el utilizar muros

vegetativos en todas las fachadas del supermercado es más efectivo en reducir la demanda de energía de aire acondicionado que el utilizar un techo vegetativo para este caso particular estudiado. El muro vegetativo reduce estas demandas de energía de enfriamiento en 23,7%, mientras que el techo vegetativo la reduce en un 15,1%. Además, el uso de ambas tecnologías, muros y techos vegetativos genera un ahorro de la demanda de energía para aire-acondicionado superior al 34% con respecto al caso base en Santiago de Chile.



**Figura 4.9.** Comparación de la efectividad de techos y muros vegetativos en reducir demanda de energía de un supermercado prototipo en Santiago de Chile, Atlanta, Tampa y Tucson (EE. UU.) (García, 2019; García et al., 2022).

Aunque estos resultados son para una edificación en particular, un supermercado, y clima específico, Santiago de Chile, evidencia el enorme potencial de techos y muros vegetativos para reducir el consumo de energía de aire acondicionado de edificios, lo cual se puede evaluar debido al desarrollo de herramientas de simulación específicas.

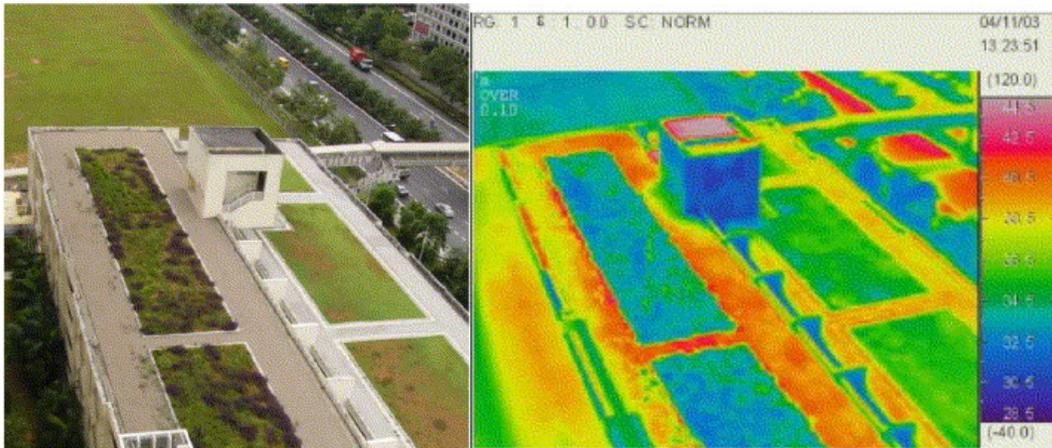
### **4.3. Mitigación efecto isla de calor urbano: FONDECYT 1150675 y 1181610**

Uno de los beneficios de la implementación de cubiertas vegetativas corresponde a la mitigación del efecto de isla de calor urbano o ICU (Berardi et al., 2014). El efecto ICU corresponde al aumento de la temperatura de las zonas urbanas con respecto a las zonas rurales adyacentes debido a varios factores, entre los que se destacan, el continuo crecimiento de las ciudades, aumento de la población, incremento de demandas de calefacción y enfriamiento en edificios, incremento del calor absorbido por la infraestructura urbana y los materiales manufacturados, alto calor de origen antropogénico y una reducida vegetación urbana (Dwivedi & Mohan, 2018; Mohajerani et al., 2017; Oke et al., 1991; Santamouris, 2007). Esto se produce porque las materialidades y superficies de las ciudades (pavimentos de calles y veredas; edificios) favorecen la retención de calor, el cual emiten como radiación de onda larga (Figura 4.10), lo que incrementa la temperatura del aire urbano.

El estudio de Sarricolea & Martín-Vide (2014) evaluó el efecto isla de calor urbano en el Área Metropolitana de Santiago, concluyendo que las ICU se producen en las zonas más densamente pobladas, pero también en zonas industriales, y pueden alcanzar temperaturas hasta 7,4°C y 5,9°C en otoño y verano, respectivamente.

Durante el desarrollo del proyecto FONDECYT 1150675 se evaluó el potencial de muros vivos para mitigar efecto ICU de dos tipos de muros vegetativos comparado con muros tradicionales de hormigón armado (color gris) y muros metálicos (color rojo) orientados hacia el norte (Figura 4.11). La Figura 4.12 muestra la variación de temperatura superficial de los diferentes muros en varios días de verano. Se aprecia que la temperatura del muro vivo 1, que posee una cobertura completa del muro, presenta temperaturas más bajas durante el día, y la temperatura máxima diaria es hasta 30°C menor que para el muro de metal rojo y hasta 16°C menor que el muro de hormigón a la vista. Esto implica que la vegetación intercepta la radiación solar y la utiliza en procesos biofísicos como la

fotosíntesis, para lo cual la planta abre sus estomas y transpira, en vez de incrementar la temperatura de la superficie, como si sucede en los muros tradicionales. Por lo tanto, los muros vegetativos tienen mucho menor potencial de calentamiento del ambiente circundante.

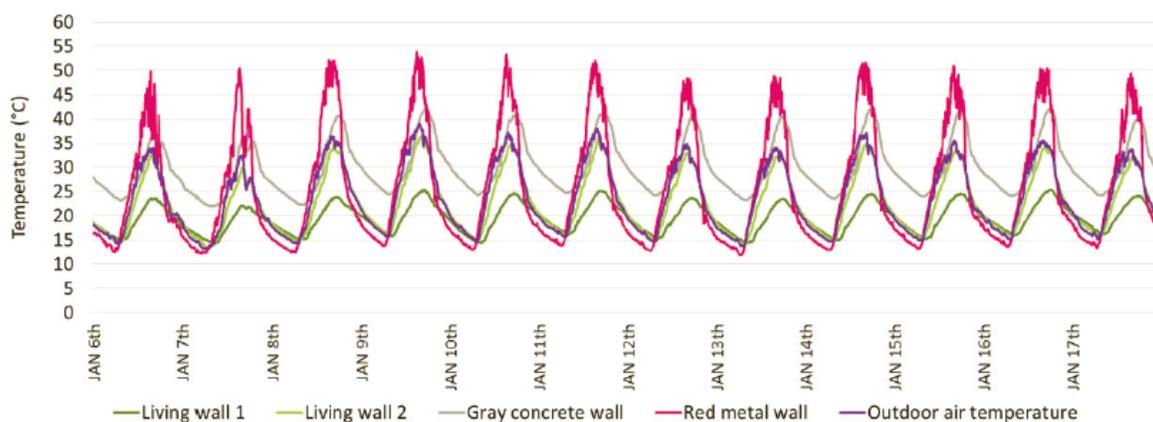


**Figura 4.10.** Imagen (derecha) con cámara termográfica que muestra que las mayores temperaturas superficiales (colores rojos y naranjos) ocurren en superficies de techo con materiales tradicionales, mientras que las menores temperaturas superficiales (colores verde oscuro y azul) ocurren en el techo vegetativo. (Nyuk Hien et al., 2007)



**Figura 4.11.** Tipologías de muros evaluados (de izquierda a derecha): muro vivo 1, muro vivo 2, muro metálico rojo, muro de hormigón a la vista (Victorero et al., 2015).

El proyecto FONDECYT 1181610 tenía entre sus objetivos evaluar el potencial de enfriamiento que tienen diferentes especies utilizadas en techos y muros vegetativos para enfriar el ambiente urbano.



**Figura 4.12.** Variación de temperatura superficial de los muros vivos y tradicionales evaluados (Victorero et al., 2015).

En una primera etapa se evaluó experimentalmente el potencial de enfriamiento de diversas especies de cubresuelos nativas e introducidas (ver Figura 4.13) con metabolismos C3 (vía metabólica de 3 carbonos, que involucra a cerca del 85% de las especies de plantas) y CAM (metabolismo ácido de las crasuláceas). Las especies C3 se caracterizan por realizar el proceso de apertura estomática durante el día (Cook-Patton & Bauerle, 2012). Mientras que las especies CAM se han adaptado para realizar la apertura estomática durante la noche, optimizando el uso del agua y adaptándose a ambientes más áridos (Chen et al., 2002).

Se realizaron mediciones en un invernadero de la Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal de la Pontificia Universidad Católica de Chile, ubicado en el Campus San Joaquín, a partir de las cuales se obtuvieron resultados de resistencia estomática promedio, resistencia estomática mínima e índice de área foliar (LAI) (ver Tabla 4.2) para seis especies. Con estos datos se desarrollaron nuevas las ecuaciones de resistencia estomática para los modelos de Sailor (2008) y Tabares-Velasco & Srebric (2012) para un clima semiárido. Estos resultados permitieron mejorar la predicción de resistencia estomática en aquellos puntos de sobrestimación en dichos modelos (Ver Figura 4.14). En consecuencia, se disminuyen las diferencias de los flujos de calor y evapotranspiración entre los valores medidos y modelados, lo que finalmente permite cuantificar más precisamente la capacidad de los

techos y muros vegetativos para enfriar el ambiente urbano y reducir el consumo de energía de edificios.



**Figura 4.13.** Especies seleccionadas. Especies C3: (a) *Glandularia berterii*, (b) *Selliera radicans*, (c) *Phylla reptans*. Especies CAM: (d) *Aptenia cordifolia*, (e) *Sedum palmeri* y (f) *Sedum spurium* (Rojas, 2021).

Además, las mediciones del índice de área foliar y resistencia estomática mínima de las seis especies estudiadas permiten mejorar los *inputs* para los modelos de transferencia de calor y masa a través de techos y muros vegetativos. Se comprobó que, para este caso de estudio, la resistencia estomática es afectada principalmente por la resistencia estomática mínima y la radiación solar incidente. Sin embargo, la ecuación final también incluye LAI, el contenido de humedad en el sustrato y la diferencia de presión de vapor. Todas estas variables permiten predecir hasta el 72% de la resistencia estomática. La importancia de obtener una buena predicción en la resistencia estomática radica en que es uno de los

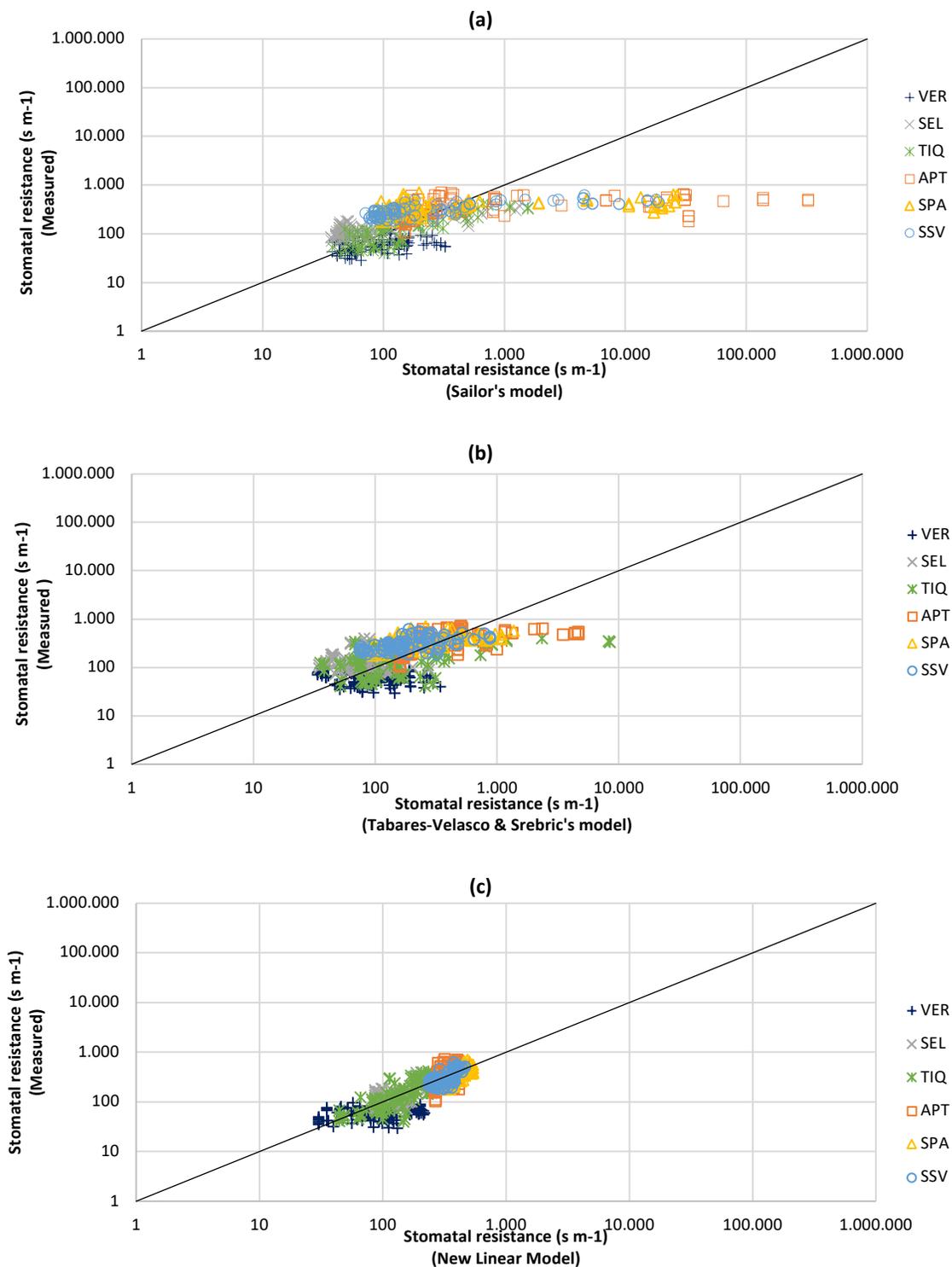
principales componentes del cálculo del flujo de calor latente o transpiración en la vegetación.

**Tabla 4.2.** Resistencia estomática promedio (s/m), resistencia estomática mínima (s/m) y LAI (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) para las seis especies. NM: no medido. Adaptado de Rojas (2021) y Maturana (2019)

Espece	Resistencia estomática (s/m)	Resistencia estomática mínima (s/m)	LAI (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
<i>Glandularia berterii</i> (VER)	61,65 ± 1,3 (*)	30,06	1,00 ± 0,02
<i>Selliera radicans</i> (SEL)	149,09 ± 5,0 (*)	86,75	3,35 ± 0,06
<i>Phyla reptans</i> (TIQ)	155,39 ± 7,4 (*)	44,50	1,16 ± 0,08
<i>Aptenia cordifolia</i> (APT)	399,24 ± 11,6 (*)	164,87	1,59 ± 0,03
<i>Sedum palmeri</i> (SPA)	375,03 ± 8,5 (*)	221,75	2,83 ± 0,06
<i>Sedum spurium verde</i> (SSV)	328,41 ± 7,7 (*)	181,98	2,89 ± 0,16
<i>Sedum spurium rojo</i>	477,51 (**)	-	-
<i>Sedum spurium híbrido</i>	322,93 (**)	-	-
<i>Geum magellanicum</i>	289,92 (**)	-	-
<i>Plumbago caerulea</i>	354,75 (**)	-	-

(\*) Resistencia estomática calculada con el método de Sivakumar & Shaw (1978) utilizando los valores de resistencia estomática abaxial y adaxial en paralelo. (Rojas, 2021)

(\*\*) Resistencia estomática calculada con los valores promedio de las caras abaxiales y adaxiales (Maturana, 2019). No se midió la resistencia estomática mínima ni el LAI.



**Figura 4.14.** Resistencia estomática medida y calculada utilizando modelos de: (a) Sailor (2008), (b) Tabares-Velasco & Srebric (2012), y (c) Nuevo Modelo Lineal. Especies: *Glandularia berterii* (VER), *Selliera radicans* (SEL), *Phyla reptans* (TIQ), *Aptenia cordifolia* (APT), *Sedum palmeri* (SPA), y *Sedum spurium* (SSV) (Rojas, 2021).

A partir de los resultados obtenidos con la nueva ecuación de resistencia estomática se realizaron simulaciones para analizar el impacto de cada especie en la temperatura del sustrato, la temperatura de las plantas y la evapotranspiración en tres ciudades con climas distintos (Santiago, Chile, clima semiárido; Melbourne, Australia, clima oceánico; Chicago, EE.UU, clima continental húmedo). Las principales conclusiones obtenidas en esta etapa indican que el índice de área foliar es el principal parámetro de la vegetación para reducir la temperatura de la superficie del sustrato. Esto está asociado directamente al efecto de sombreado que produce la capa de follaje, ya que la radiación solar es absorbida por las plantas y es utilizada para los procesos de fotosíntesis, disminuyendo las ganancias solares a través del techo vegetativo.

En este sentido, la especie que presenta mayor potencial de enfriamiento es la *Selliera radicans* debido a su alto índice de área foliar (cercano a  $3,4 \text{ m}^2\text{m}^2$ ) y su baja resistencia estomática mínima ( $87 \text{ s/m}$ ), es decir, esta especie aporta sombreado y alta transpiración durante el día. Sin embargo, al ser una especie C3 debe mantenerse con irrigación regularmente, ya que no sobreviven a períodos largos de sequías. Otras especies que presentan alto potencial de enfriamiento son las especies *Sedum palmeri* y *Sedum spurium* debido a su alto LAI y resistencias estomáticas más bajas que *Aptenia cordifolia*.

Estas investigaciones permiten entender la importancia de la elección de las especies en los procesos de diseño y planificación de proyectos con techos vegetativos con el fin de optimizar los beneficios de estas tecnologías de acuerdo con las necesidades climáticas de cada zona.

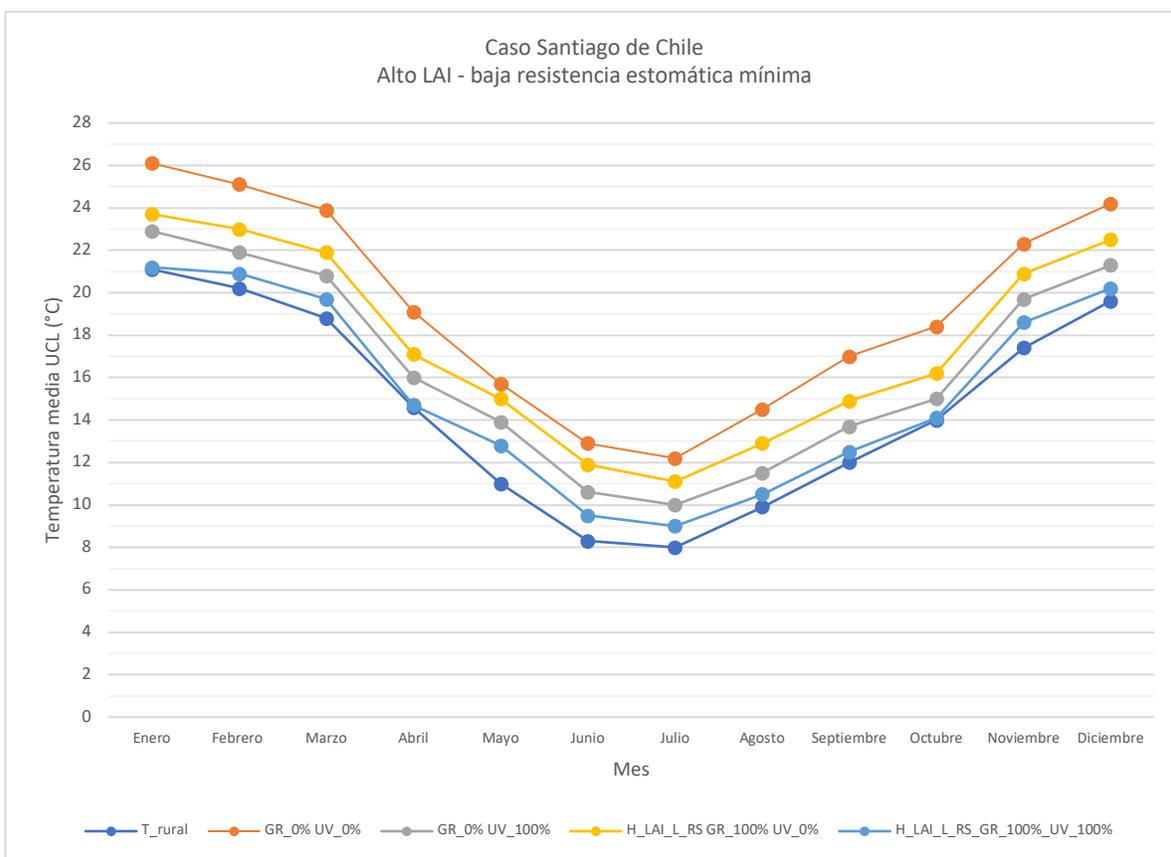
Paralelamente, se trabajó en un acoplamiento entre los modelos numéricos de transferencia de calor y masa a través de techos vegetativos y una herramienta de simulación de microclima urbano, Urban Weather Generator (UWG) desarrollada por Bueno et al. (2013) en el MIT (a través del Building Technology Program). UWG se plantea como un solucionador numérico rápido para simular el entorno del microclima urbano,

teniendo en cuenta el clima rural, características de los edificios urbanos y el calor antropogénico de la zona urbana.

Los parámetros de ingreso para el acoplamiento de los modelos numéricos de techos vegetativos y UWG incluyen las condiciones meteorológicas, detalles urbanos (factores morfo-materiales y parámetros antropogénicos), la vegetación (porcentaje de cobertura vegetal y árboles y su albedo), tipología de los edificios y las características de los techos vegetativos. Cuando se realiza una simulación, el código reconoce la existencia de techos vegetativos, ingresando los modelos numéricos, calculando los balances de energía y temperaturas superficiales con techo vegetativo.

Preliminarmente, con el acoplamiento en funcionamiento se realizaron 100 simulaciones en dos ciudades: Santiago (Chile) y Melbourne (Australia). Se consideraron dos casos, el primero con vegetación de alto LAI y baja resistencia estomática mínima (alto sombreado y alta transpiración), y el segundo con vegetación bajo LAI y alta resistencia estomática mínima (bajo sombreado y baja transpiración), y 25 combinaciones distintas de escenarios de cobertura vegetal urbana (ej. parques, jardines) y techos vegetativos como porcentaje de techos cubiertos con vegetación del total disponible.

A modo de ejemplo se muestran los resultados obtenidos de la simulación de Santiago de Chile con alto LAI y baja resistencia estomática mínima. Se muestran las temperaturas urbanas media mensuales (UCL) de los diferentes escenarios simulados, la temperatura rural y la temperatura del caso base correspondiente a la no existencia de vegetación urbana ni de techos vegetativos (Figura 4.15). Se aprecia claramente el efecto de la vegetación, ya sea urbana o de techos vegetativos en reducir la temperatura de la ciudad. En particular, el caso con 100% de vegetación urbana y 100% de techos vegetativos de alto potencial de transpiración presenta las temperaturas más cercanas a las temperaturas rurales, especialmente en los meses más cálidos. Si se compara este caso con el caso sin vegetación, la reducción de la temperatura urbana máxima es cercana a 5°C.



**Figura 4.15.** Temperatura media UCL en distintos escenarios: caso Santiago con alto LAI, baja resistencia estomática mínima (adaptado de Caamaño (2022)).

- GR\_%: indica porcentaje de techos vegetativos con respecto al total disponible, de 0% hasta 100%;
- UV\_%: indica porcentaje de vegetación urbana como parques y plazas con respecto al total disponible, de 0 hasta 100%;
- H\_LAI\_L\_RG: alto LAI de la vegetación del techo vegetativo y baja la resistencia estomática mínima.

En la Tabla 4.3 se muestra el detalle de los resultados para el mes más caluroso (enero) para analizar el impacto de la vegetación urbana con cobertura de 100% y 0% de cubiertas vegetativas, se observa una reducción máxima de temperatura de 3,32°C. Mientras que cuando no hay vegetación urbana y 100% de cubierta de techos vegetativos la reducción llega a los 2,51°C.

Los techos vegetativos no sólo tienen un efecto directo en reducir el consumo de energía de aire acondicionado de los edificios como ha sido reportado en este capítulo, sino que también generan una reducción de la temperatura del aire urbano producto de la

vegetación de estos. Esto puede causar una reducción adicional del consumo de energía de aire acondicionado en los edificios, con la consiguiente reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Para evaluar el efecto de techos vegetativos en el microclima urbano y su efecto en el consumo de energía de los edificios, se realizaron simulaciones para un barrio de Santiago de Chile.

**Tabla 4.3.** Resultados mes de enero para Santiago. Caso alto LAI, baja resistencia estomática mínima (Caamaño, 2022).

Air Temperature (°C)	Scenario	Min	Max	Prom	UHI	Disminucion
T_rural	T_rural	9,00	34,00	21,11		
T_UCL	H_LAI L_Rs GR_0% UV_0% (T_UCL)_scl	17,17	37,59	26,10	4,99	0,00
	H_LAI L_Rs GR_0% UV_25% (T_UCL)	15,57	35,99	24,50	3,39	1,60
	H_LAI L_Rs GR_0% UV_50% (T_UCL)	15,07	35,49	24,00	2,89	2,10
	H_LAI L_Rs GR_0% UV_75% (T_UCL)	14,23	34,65	23,16	2,05	2,94
	H_LAI L_Rs GR_0% UV_100% (T_UCL)	13,85	34,27	22,78	1,67	3,32
	H_LAI L_Rs GR_25% UV_0% (T_UCL)	16,00	36,42	24,53	3,42	1,57
	H_LAI L_Rs GR_50% UV_0% (T_UCL)	15,76	36,18	24,29	3,18	1,81
	H_LAI L_Rs GR_75% UV_0% (T_UCL)	15,33	35,75	23,86	2,75	2,24
	H_LAI L_Rs GR_100% UV_0% (T_UCL)	15,06	35,48	23,59	2,48	2,51
	H_LAI L_Rs GR_25% UV_25% (T_UCL)	15,42	35,84	23,95	2,84	2,15
	H_LAI L_Rs GR_50% UV_25% (T_UCL)	14,89	35,31	23,42	2,31	2,68
	H_LAI L_Rs GR_75% UV_25% (T_UCL)	14,58	35,00	23,11	2,00	2,99
	H_LAI L_Rs GR_100% UV_25% (T_UCL)	14,32	34,74	22,85	1,74	3,25
	H_LAI L_Rs GR_25% UV_50% (T_UCL)	14,86	35,28	23,39	2,28	2,71
	H_LAI L_Rs GR_50% UV_50% (T_UCL)	14,36	34,78	22,89	1,78	3,21
	H_LAI L_Rs GR_75% UV_50% (T_UCL)	13,53	34,64	22,46	1,35	3,64
	H_LAI L_Rs GR_100% UV_50% (T_UCL)	13,25	34,36	22,18	1,07	3,92
	H_LAI L_Rs GR_25% UV_75% (T_UCL)	13,61	34,64	22,49	1,38	3,61
	H_LAI L_Rs GR_50% UV_75% (T_UCL)	13,37	34,40	22,25	1,14	3,85
	H_LAI L_Rs GR_75% UV_75% (T_UCL)	13,04	34,07	21,92	0,81	4,18
H_LAI L_Rs GR_100% UV_75% (T_UCL)	13,19	33,61	21,72	0,61	4,38	
H_LAI L_Rs GR_25% UV_100% (T_UCL)	13,24	34,19	22,08	0,97	4,02	
H_LAI L_Rs GR_50% UV_100% (T_UCL)	12,84	33,79	21,68	0,57	4,42	
H_LAI L_Rs GR_75% UV_100% (T_UCL)	12,62	33,57	21,46	0,35	4,64	
H_LAI L_Rs GR_100% UV_100% (T_UCL)	12,38	33,33	21,22	0,11	4,88	

Se compararon cinco tipologías de edificios con dos casos de potencial de enfriamiento de techos vegetativos:

- Caso 1 o de alto potencial de enfriamiento: se consideraron techos vegetativos con LAI de 4 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> y resistencia estomática mínima de 50 s/m.
- Caso 2 o de bajo potencial de enfriamiento: se consideraron techos vegetativos con LAI de 1 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> y resistencia estomática mínima de 250 s/m.

Para estos dos casos se consideraron 4 diferentes coberturas de techos vegetativos y cobertura vegetal con respecto al total disponible:

- 0% techos vegetativos y 0% cobertura vegetal.
- 0 % techos vegetativos y 100% cobertura vegetal.
- 100% techos vegetativos y 0% cobertura vegetal.
- 100% techos vegetativos y 100% cobertura vegetal.

Los resultados de estas simulaciones para los diferentes tipos de edificios evaluados se muestran en la Tabla 4.4. Al analizar el Caso 1 (alto potencial de enfriamiento) y comparar los escenarios de 0% de vegetación urbana y 0% de techos vegetativos con respecto al total disponible (H\_LAI L\_Rs GR\_0% UV\_0%) con el escenario de 0% de vegetación urbana y 100% de techos vegetativos con respecto al total disponible, se observa que la presencia de techos vegetativos reduce el consumo de energía de aire acondicionado entre 16,9% (hotel pequeño) y 57,1% (supermercado). Esto es causado por efecto combinado que los techos vegetativos reducen el consumo de energía de aire acondicionado de los edificios como se mostró anteriormente y por la reducción de la temperatura del aire urbano. El efecto se aprecia mayormente en edificios de 1 piso donde es esperable un mayor impacto del techo vegetativo.

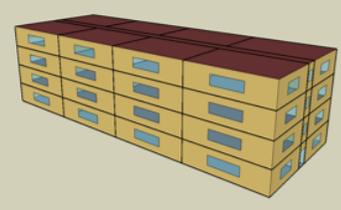
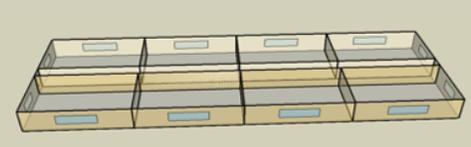
Cabe destacar, que para el Caso 2 con techo vegetativo de menor potencial de enfriamiento y comparando los mismos escenarios del Caso 1, también se observa una reducción importante del consumo de energía de aire acondicionado, aunque menor que para el Caso 1, a excepción del hotel pequeño en que aumenta levemente el consumo de energía de aire acondicionado en el caso 1.

Por otro lado, si se comparan los resultados entre los Casos 1 y 2 para el escenario con 0% de vegetación urbana y 100% de techos vegetativos con respecto al total disponible, se observa que en todos los tipos de edificios el Caso 1 presenta menores consumos de energía para aire acondicionado, que varían entre 4,3% (edificio comercial) y 19,5% (hotel

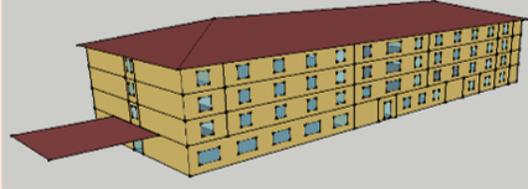
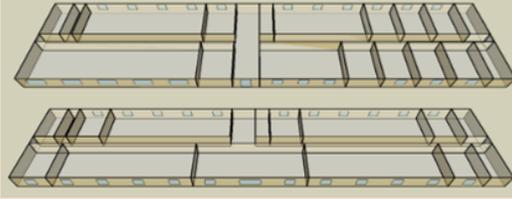
pequeño). Este resultado es producto que el Caso 1 provee mayor sombreado al techo (mayor LAI) lo que reduce ganancias de calor de radiación solar a través del techo, además de presentar mayor capacidad de transpirar debido a una menor resistencia estomática de la vegetación.

A través de los resultados mostrados anteriormente, es posible evidenciar que los techos vegetativos son capaces de enfriar el aire urbano y reducir efectivamente el consumo de energía de los edificios y, por ende, son una alternativa de diseño y tecnología que contribuye a la resiliencia de las ciudades frente a la ICU, olas de calor y calentamiento global, así como también, contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de los edificios debido a que reduce el uso de energía, especialmente en climas cálidos como el de Santiago y otras ciudades del valle Central de Chile.

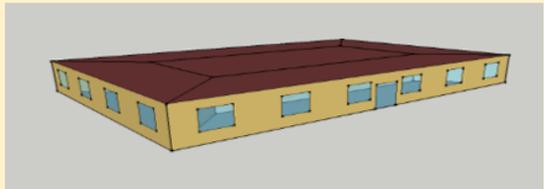
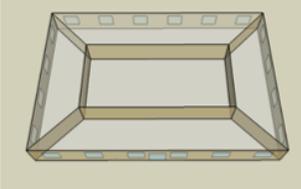
**Tabla 4.4.** Consumo de energía simulado con UWG para el caso de Santiago en dos escenarios. Escenario 1: LAI 4 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> y resistencia estomática mínima 50 s/m. Escenario 2: LAI 1 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> y resistencia estomática mínima 250 s/m (Caamaño, 2022; FONDECYT 1181610).

BLD6: DOE Commercial Building Benchmark - Midrise Apartment					
					
Caso 1			Caso 2		
LAI	4	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	LAI	1	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
Rs_min	50	s/m	Rs_min	250	s/m
Escenario	Q_Heat (W/m2) máx	Q_cool (W/m2) máx	Escenario	Q_Heat (W/m2) máx	Q_cool (W/m2) máx
H_LAI_L_Rs GR_0% UV_0% (T_UCL)_scl	144.17	89.06	H_LAI_L_Rs GR_0% UV_0% (T_UCL)_scl	144.17	89.06
H_LAI_L_Rs GR_0% UV_100% (T_UCL)	140.09	83.03	H_LAI_L_Rs GR_0% UV_100% (T_UCL)	140.09	83.03
H_LAI_L_Rs GR_100% UV_0% (T_UCL)	102.10	72.69	H_LAI_L_Rs GR_100% UV_0% (T_UCL)	110.94	75.94
H_LAI_L_Rs GR_100% UV_100% (T_UCL)	100.08	70.18	H_LAI_L_Rs GR_100% UV_100% (T_UCL)	101.08	73.96

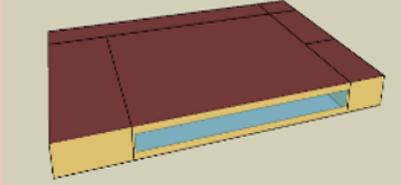
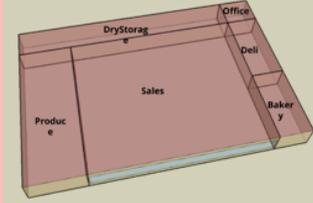
  

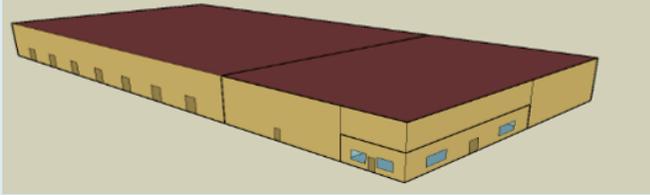
BLD11: DOE Commercial Building Benchmark - Small Hotel					
					
Caso 1			Caso 2		
LAI	4	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	LAI	1	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
Rs_min	50	s/m	Rs_min	250	s/m
Escenario	Q_Heat (W/m2) máx	Q_cool (W/m2) máx	Escenario	Q_Heat (W/m2) máx	Q_cool (W/m2) máx
H_LAI_L_Rs GR_0% UV_0% (T_UCL)_scl	164.45	105.89	H_LAI_L_Rs GR_0% UV_0% (T_UCL)_scl	164.45	105.89
H_LAI_L_Rs GR_0% UV_100% (T_UCL)	162.36	102.45	H_LAI_L_Rs GR_0% UV_100% (T_UCL)	162.36	102.45
H_LAI_L_Rs GR_100% UV_0% (T_UCL)	105.36	88.04	H_LAI_L_Rs GR_100% UV_0% (T_UCL)	112.02	109.36
H_LAI_L_Rs GR_100% UV_100% (T_UCL)	103.89	88.04	H_LAI_L_Rs GR_100% UV_100% (T_UCL)	107.06	103.89

BLD12: DOE Commercial Building Benchmark - Small Office					
					
Caso 1			Caso 2		
LAI	4	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	LAI	1	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
Rs_min	50	s/m	Rs_min	250	s/m
Escenario	Q_Heat (W/m2) máx	Q_cool (W/m2) máx	Escenario	Q_Heat (W/m2) máx	Q_cool (W/m2) máx
H_LAI_L_Rs GR_0% UV_0% (T_UCL)_scl	155.76	134.57	H_LAI_L_Rs GR_0% UV_0% (T_UCL)_scl	155.76	134.57
H_LAI_L_Rs GR_0% UV_100% (T_UCL)	152.64	131.88	H_LAI_L_Rs GR_0% UV_100% (T_UCL)	152.64	131.88
H_LAI_L_Rs GR_100% UV_0% (T_UCL)	102.76	102.10	H_LAI_L_Rs GR_100% UV_0% (T_UCL)	112.05	112.98
H_LAI_L_Rs GR_100% UV_100% (T_UCL)	98.56	99.12	H_LAI_L_Rs GR_100% UV_100% (T_UCL)	108.06	105.92

**Tabla 4.4 (continuación).** Consumo de energía simulado con UWG para el caso de Santiago en dos escenarios. Escenario 1: LAI 4 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> y resistencia estomática mínima 50 s/m. Escenario 2: LAI 1 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> y resistencia estomática mínima 250 s/m (Caamaño, 2022; FONDECYT 1181610)

BLD15: DOE Commercial Building Benchmark - Super Market						
						
Caso 1			Caso 2			
LAI	4	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	LAI	1	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	
Rs_min	50	s/m	Rs_min	250	s/m	
Escenario	Q_Heat (W/m <sup>2</sup> ) máx	Q_cool (W/m <sup>2</sup> ) máx	Escenario	Q_Heat (W/m <sup>2</sup> ) máx	Q_cool (W/m <sup>2</sup> ) máx	
H_LAI_L_Rs_GR_0%UV_0%(T_UCL)_scl	55.10	149.20	H_LAI_L_Rs_GR_0%UV_0%(T_UCL)_scl	55.10	149.20	
H_LAI_L_Rs_GR_0%UV_100%(T_UCL)	53.33	147.90	H_LAI_L_Rs_GR_0%UV_100%(T_UCL)	53.33	147.90	
H_LAI_L_Rs_GR_100%UV_0%(T_UCL)	40.96	64.04	H_LAI_L_Rs_GR_100%UV_0%(T_UCL)	44.23	69.04	
H_LAI_L_Rs_GR_100%UV_100%(T_UCL)	37.53	61.48	H_LAI_L_Rs_GR_100%UV_100%(T_UCL)	40.53	67.05	

BLD16: DOE Commercial Building Benchmark - Warehouse						
						
Caso 1			Caso 2			
LAI	4	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	LAI	1	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	
Rs_min	50	s/m	Rs_min	250	s/m	
Escenario	Q_Heat (W/m <sup>2</sup> ) máx	Q_cool (W/m <sup>2</sup> ) máx	Escenario	Q_Heat (W/m <sup>2</sup> ) máx	Q_cool (W/m <sup>2</sup> ) máx	
H_LAI_L_Rs_GR_0%UV_0%(T_UCL)_scl	102.10	66.54	H_LAI_L_Rs_GR_0%UV_0%(T_UCL)_scl	102.10	66.54	
H_LAI_L_Rs_GR_0%UV_100%(T_UCL)	97.45	64.02	H_LAI_L_Rs_GR_0%UV_100%(T_UCL)	97.45	64.02	
H_LAI_L_Rs_GR_100%UV_0%(T_UCL)	57.45	53.04	H_LAI_L_Rs_GR_100%UV_0%(T_UCL)	67.02	57.04	
H_LAI_L_Rs_GR_100%UV_100%(T_UCL)	55.04	51.48	H_LAI_L_Rs_GR_100%UV_100%(T_UCL)	60.35	55.95	