

Evaluación de estrategias de enverdecimiento vertical en clima árido: el caso de las fachadas verdes

Evaluation of Vertical Greening Strategies in Arid Climates: the Case of Green Facades

Recibido: diciembre 12 / 2022 • Evaluado: febrero 2 / 2023 • Aceptado: enero 19 / 2023

CÓMO CITAR

Suárez-Gómez, P. A., Cantón-Ivanissevich, M. A., & Correa-Cantaloube, Érica N. . (2024). Evaluación de estrategias de enverdecimiento vertical en clima árido: el caso de las fachadas verdes. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 26(2), 75-90. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2024.26.5014>

Pablo Abel Suárez-Gómez*

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, Mendoza (Argentina)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Argentina)

María Alicia Cantón-Ivanissevich**

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, Mendoza (Argentina)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Argentina)

Érica Norma Correa-Cantaloube***

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, Mendoza (Argentina)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Argentina)

RESUMEN

Se evalúa el desempeño térmico de fachadas verdes tradicionales (FVT) sembradas con especies trepadoras perennes, en la estación de verano, en el Área Metropolitana de Mendoza, Argentina, localizada en un clima árido. Para ello, se monitorearon, durante un periodo de 30 días, temperaturas del aire exterior en el microclima mediato e interior en una cámara de aire, y superficiales exteriores e interiores, en un ensayo experimental. Dicho ensayo está compuesto por tres muros de mampostería, dos con FVT y el restante testigo sin cobertura vegetal, orientados al oeste y aislados en sus caras N, S y E; en esta última orientación alberga un recinto de aire. Se hallaron reducciones de temperatura de 3,5 °C del aire del entorno exterior a 30 cm del muro, de 6,2 °C en la cámara de aire interior, de 17,8 °C en la superficie de la cara exterior, de 7,5 °C en la superficie de la cara interior y hasta 2,0 °C de variación entre las FVT con distintas especies vegetales. Estos valores demuestran el potencial de la aplicación de la estrategia sobre las temperaturas en su entorno mediato y los espacios interiores. Además, se observa que las magnitudes de dichos impactos dependen del tipo de estructura vegetal y son mayores en clima árido respecto de lo reportado para otros climas en la literatura internacional.

Palabras clave:

comportamiento térmico; especies trepadoras perennes; estudio experimental; sistemas de enverdecimiento vertical; zonas áridas

ABSTRACT

The thermal performance of traditional green façades (TGF) planted with perennial climbing species during the summer season in the Metropolitan Area of Mendoza, Argentina, located in an arid climate, is evaluated. For this purpose, outdoor temperatures were monitored over a 30-day period in the immediate microclimate and inside an air chamber, as well as surface temperatures outdoors and indoors, in an experimental trial. This trial comprised three masonry walls, two with TGF and one control without vegetation cover, oriented westward and isolated on their north, south and east sides; the east-facing side houses an air enclosure. Temperature reductions were found to be 3.5 °C from the ambient air at 30 cm from the wall, 6.2 °C in the indoor air chamber, 17.8 °C on the outdoor surface, 7.5 °C on the indoor surface and up to 2.0 °C variation between the TGFs with different plant species. These values demonstrate the potential of the strategy in reducing temperatures in its immediate surroundings and indoor spaces. Moreover, it is observed that the extent of these impacts depend on the type of plant structure and are greater in arid climates compared to those reported for other climates in international literature.

Keywords:

thermal behavior; perennial climbing species; experimental study; vertical greening systems; arid zones

- ✦ Arquitecto, Universidad de Congreso. Mendoza (Argentina).
Especialista en Proyectos de Arquitectura Sustentable, Universidad de Congreso. Mendoza (Argentina).
◆ <https://scholar.google.es/citations?user=Jl-C3JAAAAJ&hl=es&oi=sra>
ID <https://orcid.org/0000-0002-0032-3278>
✉ psuarez@mendoza-conicet.gob.ar; suarezpablo91@gmail.com
- ✦✦ Arquitecta, Universidad de Mendoza. Mendoza (Argentina)
DEA en Arquitectura, Universidad de Mendoza. Mendoza (Argentina)
◆ <https://scholar.google.com.ar/citations?user=rohJlMcAAAAJ&hl=es&oi=sra>
ID <https://orcid.org/0000-0002-8714-9697>
✉ macanton@mendoza-conicet.gob.ar
- ✦✦✦ Ingeniera química, Universidad Tecnológica Nacional. Mendoza (Argentina)
Doctora en Ciencias, Universidad Nacional de Salta. Salta (Argentina)
◆ https://scholar.google.com.ar/citations?user=Ah_UdCUAAAAJ&hl=es&oi=sra
ID <https://orcid.org/0000-0003-1690-076X>
✉ ecorre@mendoza-conicet.gob.ar

INTRODUCCIÓN

Este estudio se presenta en el marco de un proyecto de investigación denominado “Potencial de la infraestructura verde urbana como estrategia de rehabilitación energética y ambiental de ciudades de zonas áridas. El caso del Área Metropolitana de Mendoza”, financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) de Argentina; llevado adelante en el Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, de Mendoza, Argentina. Aborda el estudio del impacto de la forestación urbana y sus distintas categorías —estructuras verdes tradicionales (parques, plazas, arbolados de alineación y patios) y nuevas tecnologías (techos y paredes verdes)— sobre la calidad energético-ambiental de las ciudades.

El crecimiento urbano implica deterioros sobre el entorno natural asociados a la liberación de CO₂ a la atmósfera, recalentamiento de los espacios urbanizados, disminución de áreas destinadas a la producción y un elevado impacto ambiental sobre la biósfera. Además, estas demandan dos tercios de la energía producida en todo el mundo (International Energy Agency [IEA], 2017). En este marco, las urbes latinoamericanas son especialmente vulnerables, dado que el 81 % de la población de esta región vive en ellas (Organización Latinoamericana de Energía [OLADE], 2022). Estos impactos cobran aún más relevancia en contextos de aridez, donde las temperaturas son más extremas. Una estrategia para restablecer el equilibrio entre entorno natural y hábitat construido es la incorporación de “infraestructura verde” a las tramas urbanas, con probados beneficios sociales, económicos y ecológicos para las ciudades.

El incremento de las áreas con vegetación es una estrategia eficaz frente al avance del cambio climático (Gill et al., 2007). Por un lado, son versátiles para su incorporación en la trama urbana; por el otro, se muestran efectivas para mitigar el calentamiento excesivo del entorno construido y alcanzar menores cifras de consumo energético. El consumo de energía térmica y la producción de carbono que este provoca se ven afectados principalmente por ineficiencias de las envolventes edilicias. Por lo tanto, una estrategia viable para reducir estos consumos es la utilización de vegetación adosada a la envolvente del edificio —envolventes verdes—.

En términos de variaciones de temperatura de aire interior, distintas investigaciones en el ámbito internacional evalúan ensayos en condiciones controladas con techos y fachadas verdes frente a un muro testigo sin vegetación en clima tropical. La utilización de ambas estrategias muestra temperaturas más elevadas en invierno del orden de 2 °C (Pérez Gallardo et al., 2018) y el uso del verde en cubiertas reduce

las temperaturas hasta en un 18 % en verano (Osuna Motta et al., 2017).

Los aportes del ámbito científico en torno al tema de los sistemas de enverdecimiento vertical (SEV) han mostrado un crecimiento sostenido en los últimos años (Bustami et al., 2018; Suárez et al., 2018). Dichas investigaciones muestran la efectividad de estos sistemas en la mitigación térmica a escala microclimática —espacios exteriores— y a escala edilicia —espacios interiores—. Las magnitudes de reducción térmica pueden alcanzar entre 2,1 °C y 3,3 °C en ambientes exteriores (Susorova et al., 2014; Wong et al., 2010), hasta 34 °C en la temperatura de la cara externa de un edificio (Suklje et al., 2016) y hasta 5 °C en ambientes interiores (Haggag et al., 2014). Dichos beneficios varían para un mismo sistema dependiendo de las características del clima del sitio de implantación y la orientación a la cual están expuestos.

Además, se han demostrado beneficios para la conservación de calor en invierno debido a un efecto aislante, donde la aplicación de SEV incrementa de 1 °C hasta 3 °C la temperatura de aire interior en horario nocturno (Xing et al., 2019) y en climas de tipo Cfa (subtropical húmedo).

Entre los SEV, la tecnología denominada Fachadas Verdes Tradicionales (FVT) es de sencilla aplicación en las envolventes edilicias con una baja inversión (figura 1). En relación con el potencial de mitigación térmica de esta tipología, el desarrollo de conocimiento es más acotado y su eficiencia también depende del tipo de clima y su orientación. De modo particular, las FVT colaboran en la conservación de energía asociada a la disminución de las pérdidas o ganancias de calor debido al efecto aislante de la fachada verde. Se recomienda tener una consideración profunda respecto a la elección de la planta, compatible con el diseño del edificio y el clima local, para maximizar los beneficios de la vegetación (Dahanayake et al., 2017). Finalmente, se ha comprobado que algunos parámetros que caracterizan la especie vegetal inciden en la magnitud del impacto, tales como el área de cobertura foliar (Pérez et al., 2022) y espesor de la planta (Li et al., 2019).

El presente estudio se desarrolla en un clima árido, el Área Metropolitana de Mendoza, Argentina. Desde el punto de vista urbanístico y ecológico, la mancha urbana se ha densificado sin que se haya acompañado por un incremento de los espacios con vegetación. En consecuencia, la reducción de vacíos urbanos limita la posibilidad de incorporar estructuras verdes tradicionales, por lo que surge la

necesidad de implementar nuevas estrategias de enverdecimiento, como son los SEV. De modo puntual, las FVT se han desarrollado en forma espontánea en áreas residenciales de baja densidad. En la bibliografía internacional, estudios que abordan el uso de tecnologías verdes de aplicación vertical en contextos de aridez muestran mayor eficiencia térmica y ahorro energético, respecto al uso de dicha tecnología en climas húmedos. Y, finalmente, son eficientes para aumentar el confort ambiental en climas con amplitud térmica (De Lima Junior et al., 2017).

Los beneficios termoenergéticos de las FVT se relacionan con múltiples variables. De modo particular, respecto a la orientación, Othman y Sahidin (2016) establecen que este parámetro es importante en climas con altos niveles de irradiación solar, como es el caso del área de estudio. Diversas investigaciones han demostrado que su efectividad aumenta en orientaciones este y oeste, respecto a orientación sur y norte (Susorova et al., 2013). Esto puede deberse a la mayor incidencia de la radiación solar en dichas orientaciones, que demuestran la importancia de implementar protecciones como las FVT.

Figura 1. Ejemplo de FVT



Fuente: elaboración propia (2022).

El presente trabajo persigue evaluar la respuesta térmica de distintas especies trepadoras perennes incorporadas como FVT en la envolvente edilicia tradicionalmente utilizada en el Área Metropolitana de Mendoza, en orientación oeste por ser la más

demandante en la estación estival. A tal fin, se expone la metodología empleada para evaluar las FVT, los resultados obtenidos, su comparación con la literatura científica internacional y las conclusiones que se derivan de esta investigación.

METODOLOGÍA

Ensayo experimental

Se diseñó y construyó un experimento controlado en el área destinada a experimentación del CCT-Me CONICET (Argentina) (figura 2). El mismo está compuesto por tres muros de ensayo orientados al oeste (orientación más desfavorable en verano): un muro testigo sin vegetar —MT— y dos muros desti-

nados a evaluar el impacto de distintas FVT compuestas por las siguientes especies: madre-selva (*Lonicera Japonica*) —M1— y bignonia blanca (*Pandorea Jasminoides*) —M2—. Las especies fueron seleccionadas en función de su adaptabilidad al clima local y desarrolladas en estructuras independientes para su posterior adosamiento a los muros.

Figura 2. Ubicación del ensayo experimental



Fuente: elaboración propia (2022).

En Argentina, el sistema tradicional de construcción masiva continúa siendo de carácter húmedo, es decir, se usa ladrillo con cemento y arena como componentes ligantes. En la ciudad de Mendoza, dicho sistema se configura con estructura de hormigón armado y paredes portantes de ladrillo cocido de 17 cm de espesor, debido al carácter sísmico de la región. En consecuencia, la materialización del ensayo experimental respeta esta tecnología en la construcción de los tres muros, cuyas dimen-

siones son de 1,3 m de ancho por 2,3 m de alto y 0,17 m de espesor, enmarcados en columnas y vigas de hormigón armado. Estas dimensiones están en el rango de medidas observadas en modelos experimentales similares llevados a cabo en la literatura internacional (Coma et al., 2017; Vox et al., 2018). Los muros se aislaron con 0,05 m de poliestireno expandido de alta densidad, en sus caras N, S y E, y en esta última orientación hay una cámara de aire de 0,10 m de espesor (figura 3).

Figura 3. Imagen de ensayo M1, M2 y MT



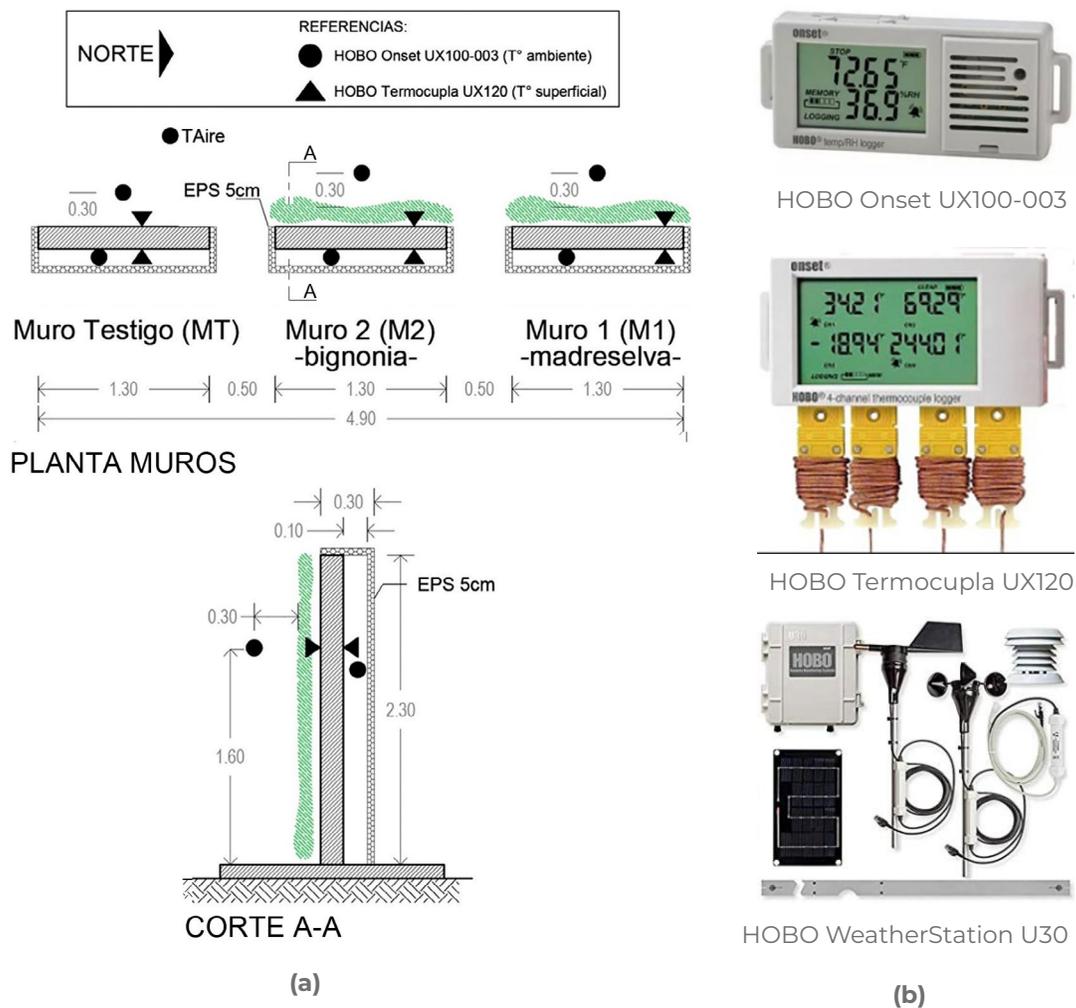
Fuente: elaboración propia (2022).

Toma de datos en los casos de estudio

Con el objeto de evaluar la respuesta térmica de las FVT, se monitorearon durante un mes —03 de febrero al 03 de marzo— de 2021 las siguientes variables: temperatura, humedad, radiación solar y velocidad de viento en el espacio exterior; temperatura y humedad en el interior de la cámara de aire y temperatura en la superficie de la cara externa e interna de

muros. Los datos se registraron cada 15 minutos. Los sensores utilizados fueron: termistores y termocuplas —HOBO Onset— y una estación meteorológica —Onset U30—. El equipamiento de medición fue colocado a 1,60 m de altura promedio, de acuerdo con criterios de habitabilidad térmica. Los mismos se calibraron antes del ensayo con el fin de asegurar la fiabilidad de los datos por obtener (figura 4).

Figura 4. Casos de estudio: (a) localización de sensores y (b) equipamiento



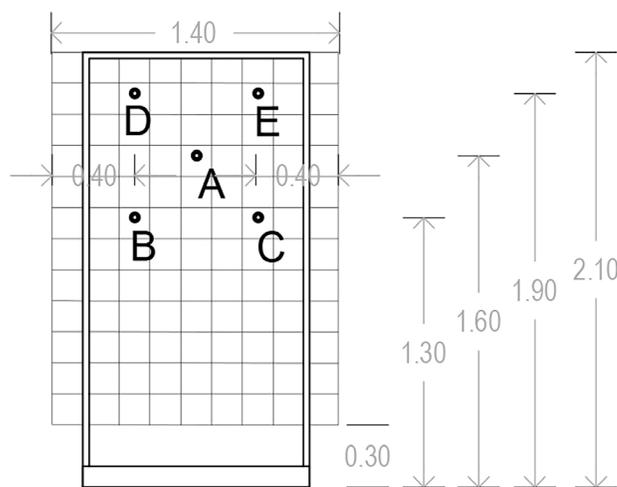
Fuente: elaboración propia (2022).

Caracterización de la cubierta vegetal

La estructura vegetal fue caracterizada mediante el análisis de dos variables: espesor y cobertura. La evolución temporal del espesor de la cubierta vegetal fue medida con una frecuencia semanal, durante el periodo de

medición, en cinco puntos equidistantes, tomando como centro la localización del sensor de temperatura superficial del muro (figura 5). Dichos datos fueron promediados con el objeto de determinar un valor que representara la tendencia de crecimiento de la planta que conforma la FVT.

Figura 5. Puntos de medición de espesores



Fuente: elaboración propia (2022).

La cobertura vegetal fue estimada a partir de la toma de imágenes fotográficas semanales, a lo largo del periodo de medición, en horarios de

mínima radiación solar. Las imágenes fueron procesadas mediante el *software* MultiSpec, con el fin de determinar la proporción entre

vacíos y llenos que representa el grado de cobertura de la especie evaluada.

Selección de días de análisis

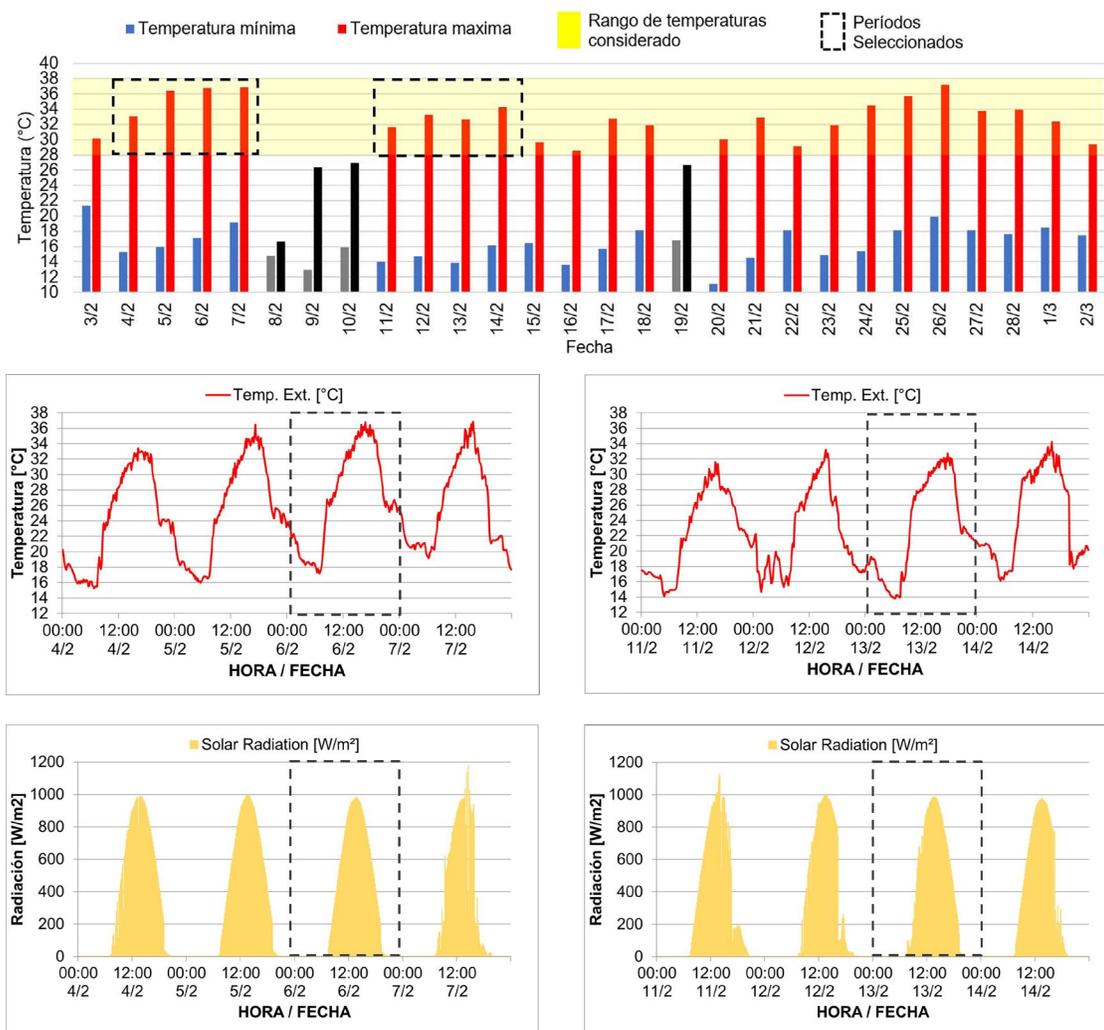
Las tecnologías verdes de aplicación vertical muestran mayor eficiencia para el ahorro de energía en edificios cuanto mayor es el efecto de sombreado (Pérez et al., 2017). Por este motivo, para la selección de días de análisis se consideraron aquellos cuyo rango muestral de temperatura y radiación solar correspondiera a días soleados. Para lo cual, se seleccionaron el 82 % de jornadas cuya curtosis de curva responden a este requerimiento (figura 6a).

Con el fin de obtener parámetros de temperaturas máximas y mínimas de un mes típico de verano en el microclima local, se compararon los datos obtenidos de estas variables para los días seleccionados de febrero de 2021 mediante un análisis de frecuencia. En este se ven reflejadas magnitudes de temperatura máxima diaria entre 36 °C y 38 °C para el 17 % de los días; entre 34 °C y 36 °C para el 9 % de los días; entre 32 °C y 34 °C

para el 44 % de los días; entre 30 °C y 32 °C para el 13 % de los días, y entre 28 °C y 30 °C para el 17 % de los días estudiados. En cuanto al análisis de las temperaturas mínimas diarias, de los días considerados se registraron valores entre 18 °C y 20 °C para el 30 % de los días; entre 16 °C y 18 °C para otro 30 % de los días, y entre 14 °C y 16 °C para el 40 % restante de los días analizados.

Con la hipótesis de que los beneficios termoenergéticos de las FVT pueden variar en función de diferentes temperaturas de operación, se eligieron dos conjuntos de días de análisis cuyos rangos corresponden a los que presentaron mayores magnitudes (36 °C a 38 °C) y los que presentaron mayor frecuencia en las máximas (32 °C a 34 °C). En función de ello, se tomaron dos periodos de análisis de cuatro días cada uno —del 4 al 7 de febrero y del 11 al 14 de febrero de 2021— de los cuales se seleccionó para la contrastación térmica el tercer día de cada periodo que corresponde al 6 y al 13 de febrero, respectivamente (figura 6b). Las características de los días evaluados se presentan en la tabla 1.

Figura 6. a) Análisis de frecuencia. (b) Días de análisis. (c) Temperatura ambiente exterior y radiación solar



Nota: Ciclo de medición 3 de febrero al 3 de marzo
 Primer periodo del 4 al 7 de febrero
 Segundo periodo del 11 al 14 de febrero

Fuente: elaboración propia (2022).

Tabla 1. Temperaturas máximas, mínimas y amplitud térmica para los periodos

Periodo	Temp. máx. °C	Temp. mín. °C	Amplitud térmica
Periodo 1: 06/02	36,5	17,2	18,0
Periodo 2: 13/02	32,2	13,9	18,3

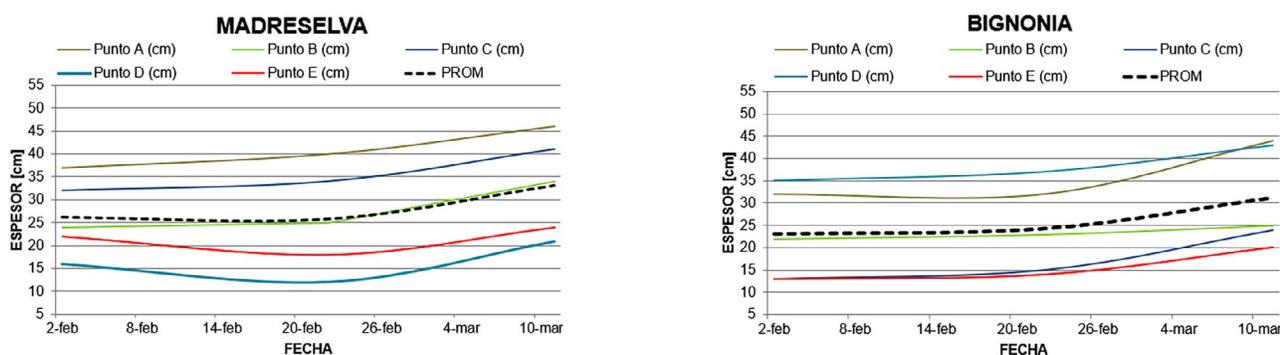
Fuente: elaboración propia (2022).

RESULTADOS

Se presenta el análisis de los resultados asociados a la caracterización de la estructura vegetal y el comportamiento térmico de acuerdo con las siguientes variables: temperatura ambiente exterior, temperatura superficial exterior e interior del muro y temperatura

ambiente interior de la cámara de aire. Dicho análisis se realizó en forma comparativa entre el muro desnudo —definido como MT— y los muros cubiertos con FVT —M1 (madreselva) y M2 (bignonia)—; y en términos de diferencia incremental entre las especies analizadas.

Figura 7. Espesores por punto y promedio



Fuente: elaboración propia (2022).

Caracterización de la estructura vegetal

Espesor

Los resultados obtenidos correspondientes al espesor del follaje promedio entre los cinco puntos considerados mostraron valores semejantes del orden de: 0,26 m para madreselva —M1— y 0,24 m para bignonia —M2—. La madreselva tuvo un crecimiento levemente decreciente al inicio del periodo medido, que se revirtió con una tendencia clara al crecimiento hacia el final del periodo. En el caso de la bignonia, se observó que el espesor se mantuvo constante al comienzo y crecimiento hacia el final (figura 7). Sin embargo, en los dos periodos considerados para evaluar el comportamiento térmico de las FVT —temperaturas altas y moderadas—

no se observaron diferencias significativas en el espesor de las especies.

Cobertura vegetal

Del seguimiento y procesamiento de las imágenes tomadas durante ambos periodos seleccionados de análisis, se observó que las trepadoras tuvieron índices diferentes de cobertura. Para el primer periodo —altas temperaturas—, los porcentajes de cobertura fueron del orden del 48,7 % (madreselva) y del 65,2 % (bignonia). En el segundo periodo —temperaturas moderadas—, los porcentajes variaron levemente, alcanzando valores entre el 46,9 % (madreselva) y el 66,8 % (bignonia) (figura 8). Entre el primer y el segundo periodo, las diferencias entre especies se ubicaron en un porcentaje de cobertura del 16,5 % y el 20 %, respectivamente.

Figura 8. Resultado del procesamiento de imágenes de cobertura vegetal en ambos periodos de medición



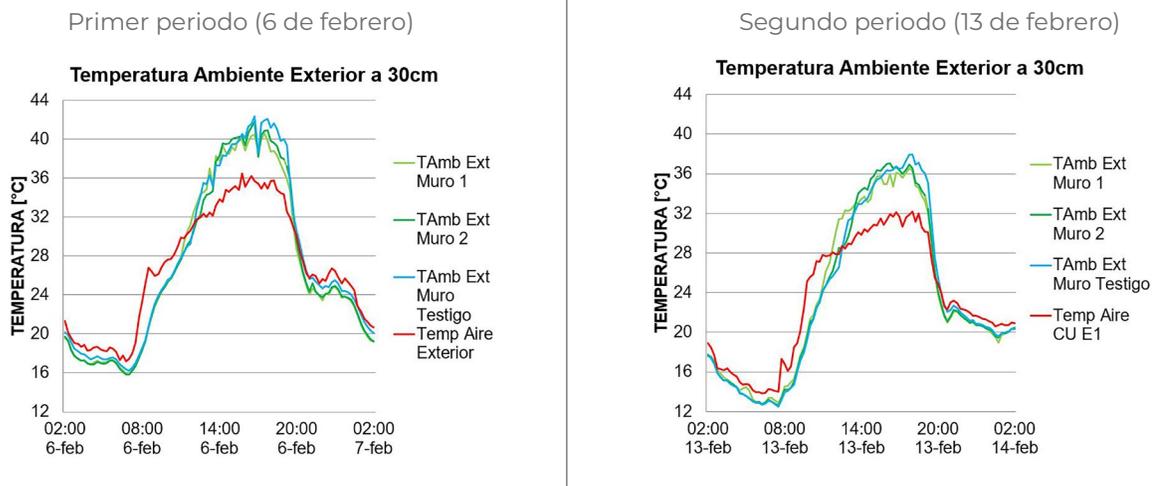
Fuente: elaboración propia (2022).

Temperatura ambiente exterior mediata

A partir de la comparación de las temperaturas ambiente exteriores entre el muro testigo y los muros con FVT, monitoreadas a 0,30 m de follaje y pared, respectivamente, se observó que la máxima reducción de temperatura ambiente exterior correspondió a FVT con madreselva, con una magnitud de 3,5 °C a las 18:30 h del periodo de altas temperaturas y de 2,6 °C a las 19:15 h en el periodo de temperaturas moderadas (figura 9).

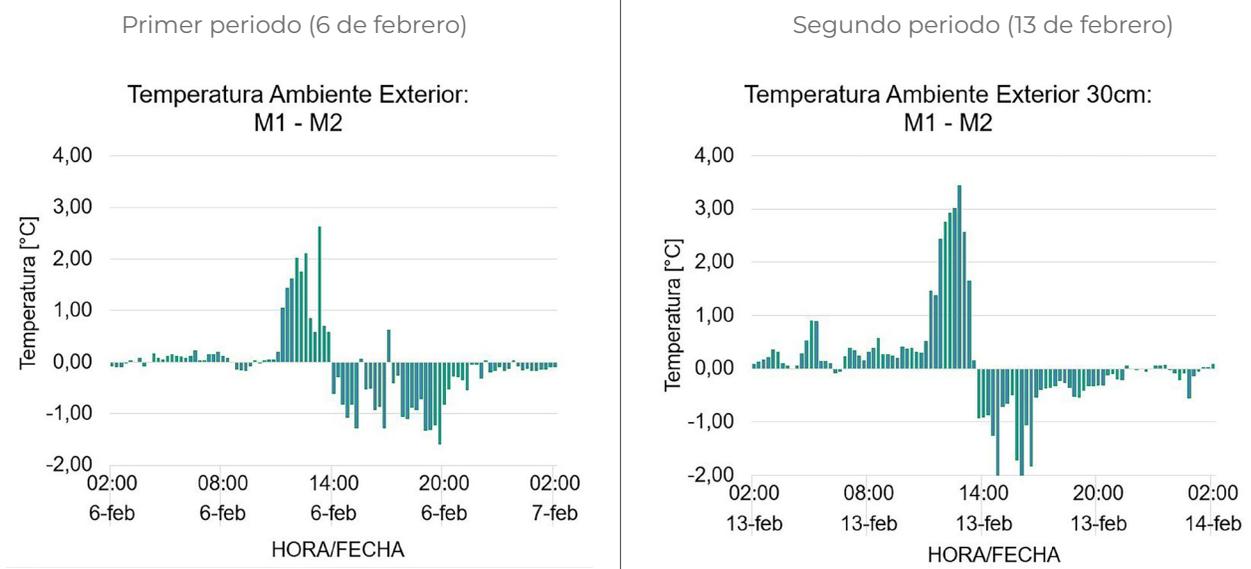
De lo descrito se desprende que las FVT reducen la temperatura ambiente exterior mediata, y que el tipo de especie empleada tiene efecto sobre la magnitud de la diferencia alcanzada (figura 10). Estas diferencias son del orden de 2,5 °C y 3,5 °C para el periodo de altas temperaturas y el periodo de temperaturas moderadas, respectivamente. Este comportamiento se debe probablemente a las características propias de las plantas trepadoras evaluadas.

Figura 9. Temperatura ambiente exterior a 0,30 m



Fuente: elaboración propia (2022).

Figura 10. Diferencial hora a hora de la temperatura ambiente exterior a 0,30 m



Fuente: elaboración propia (2022).

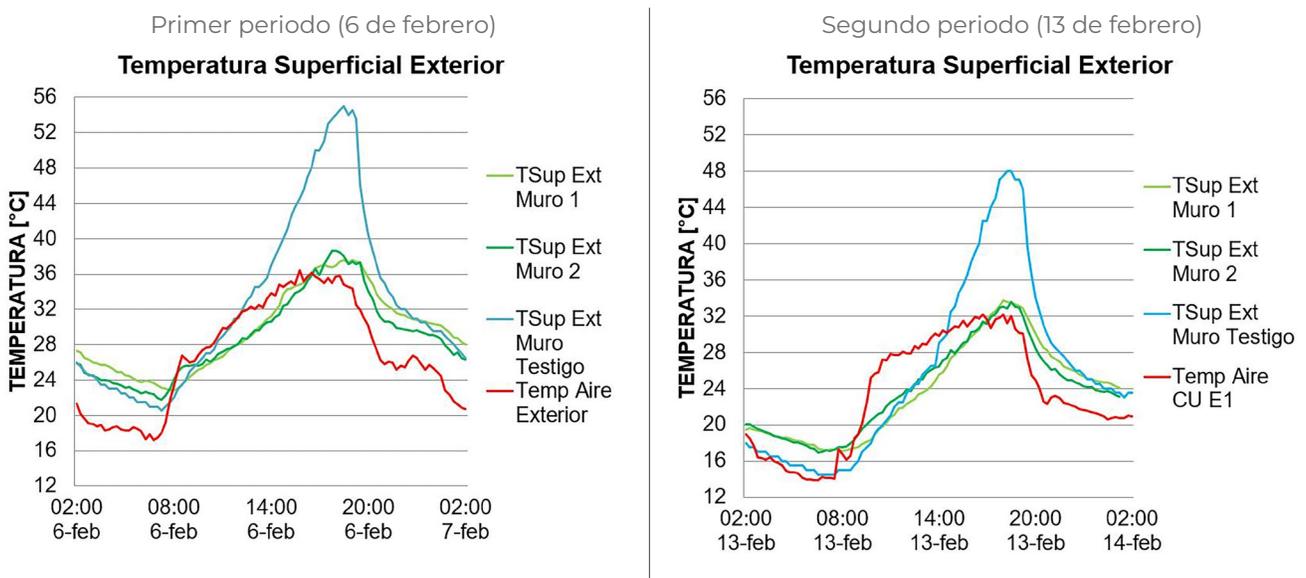
Temperatura superficial exterior

Los resultados de la comparación de las temperaturas superficiales exteriores entre FVT y muro testigo determinaron una máxima reducción de 17,8 °C en el periodo de altas temperaturas y de 14,5 °C en el periodo de temperaturas moderadas a las 18:30 h para ambas especies evaluadas. Las diferencias observadas entre los dos periodos analizados reflejan que frente a un incremento de la temperatura ambiente exterior del 11,5 %, la diferencia de temperatura superficial exterior aumentó un 18,5 %. Es decir, al incrementar la temperatura

ambiente exterior, es mayor el impacto de la FVT (figura 11).

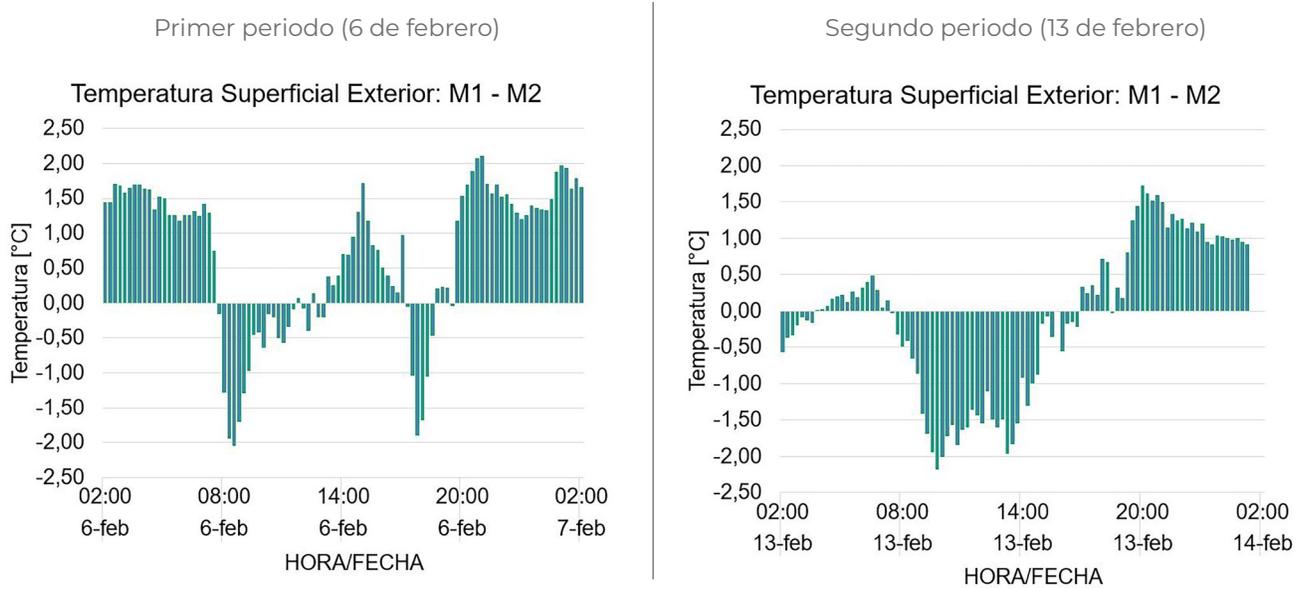
Si se comparan los muros con FVT entre sí, se observan diferencias que alcanzan máximas magnitudes de 2,0 °C para ambos periodos medidos, donde la FVT con mayor espesor—madreselva—disminuye y aumenta su temperatura más lentamente durante los periodos de enfriamiento y calentamiento, respectivamente (figura 12). Esto parecería indicar que el espesor de la planta tiene incidencia sobre la mitigación de las temperaturas superficiales exteriores edilicias.

Figura 11. Temperatura superficial exterior



Fuente: elaboración propia (2022).

Figura 12. Diferencial hora a hora de la temperatura superficial exterior



Fuente: elaboración propia (2022).

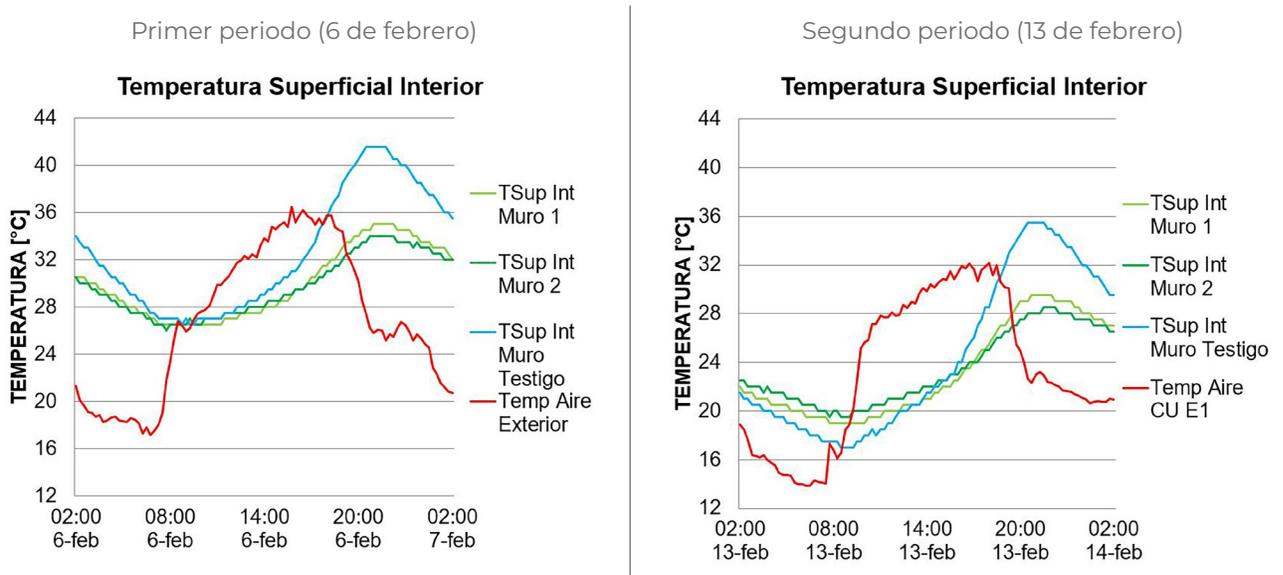
Temperatura superficial interior

Los resultados de la comparación de las temperaturas superficiales interiores muestran una máxima reducción de 7,5 °C a las 21:30 h en el periodo de altas temperaturas, y de 6,5 °C a las 21:45 h del periodo de temperaturas moderadas para el caso de FVT con bignonia respecto del caso testigo. Al igual que se observó en las curvas de temperatura superficial exterior, las diferencias entre los dos periodos analizados reflejan que frente a un incremento de la temperatura exterior del orden del 11,5 %, la diferencia de temperatura superficial interior aumentó; aunque el porcentaje de incremento es levemente menor (13,5 %). Sin embargo, en ambos casos es positivo

el impacto en la reducción de la temperatura superficial interior del muro (figura 13).

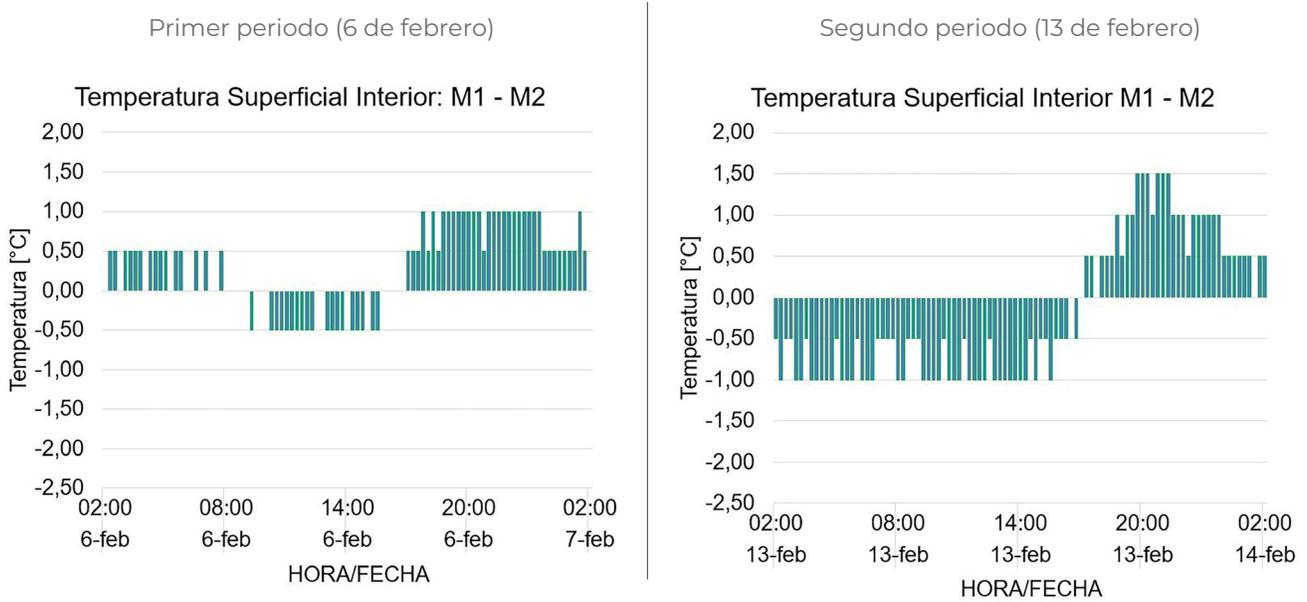
Si se comparan los muros con FVT en ambos periodos medidos durante las horas de enfriamiento, la temperatura del muro con bignonia se encuentra hasta 1 °C y 1,5 °C más fresca que el muro con madreselva para el periodo de altas y moderadas temperaturas, respectivamente. Durante las horas de calentamiento, la temperatura del muro con bignonia se mantiene hasta 0,5 °C y 1,0 °C más caliente que el muro con madreselva para el periodo de altas y moderadas temperaturas, respectivamente (figura 14). Lo observado parece indicar que la temperatura superficial interior está comandada por el mayor porcentaje de cobertura de la especie (bignonia 65,2 % y madreselva 48,7 %).

Figura 13. Temperatura superficial interior



Fuente: elaboración propia (2022).

Figura 14. Diferencial hora a hora de la temperatura superficial interior



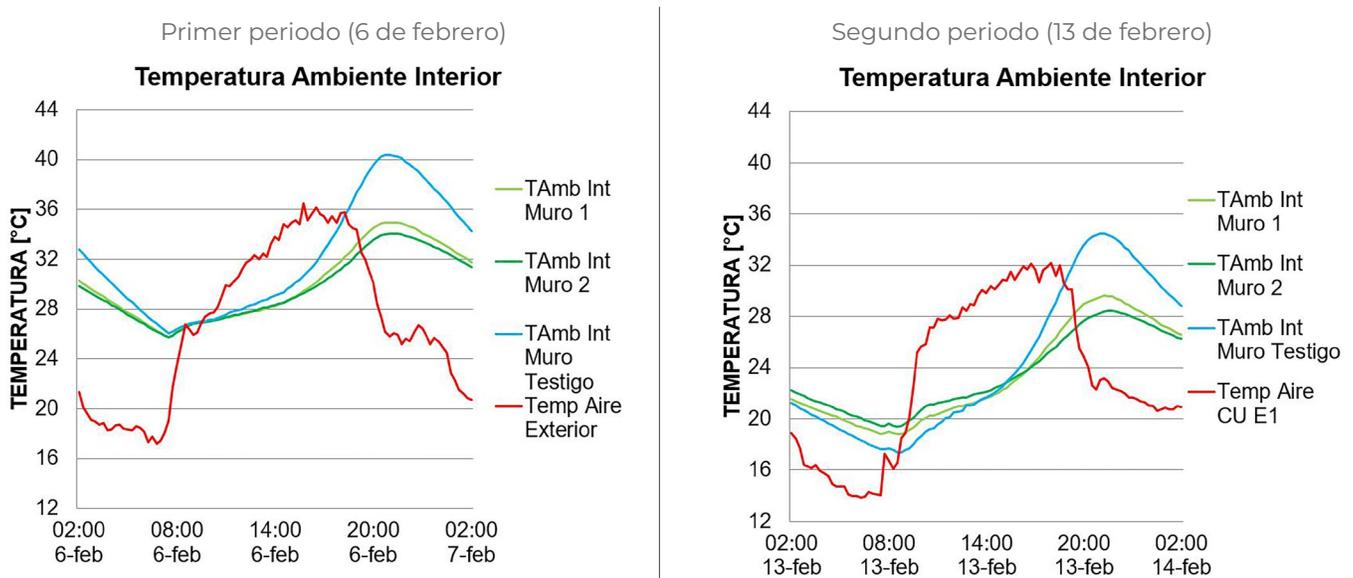
Fuente: elaboración propia (2022).

Temperatura ambiente interior

Las magnitudes de reducción de temperatura ambiente interior —por efecto del uso de FVT—, entre muro con FVT y muro testigo, alcanzan una diferencia máxima de 6,2 °C a las 21:30 h del periodo de altas temperaturas y 5,8 °C a las 20:45 h del periodo de temperaturas moderadas para el muro cubierto con bignonia. Del mismo modo que en el análisis de la temperatura superficial interior, se verifica que, frente a temperaturas mínimas más bajas, la temperatura ambiente interior de los muros con FVT en horarios nocturnos son mayores que las del muro desnudo, evidenciando el efecto de conservación de las plantas —periodo de temperaturas moderadas— (figura 15).

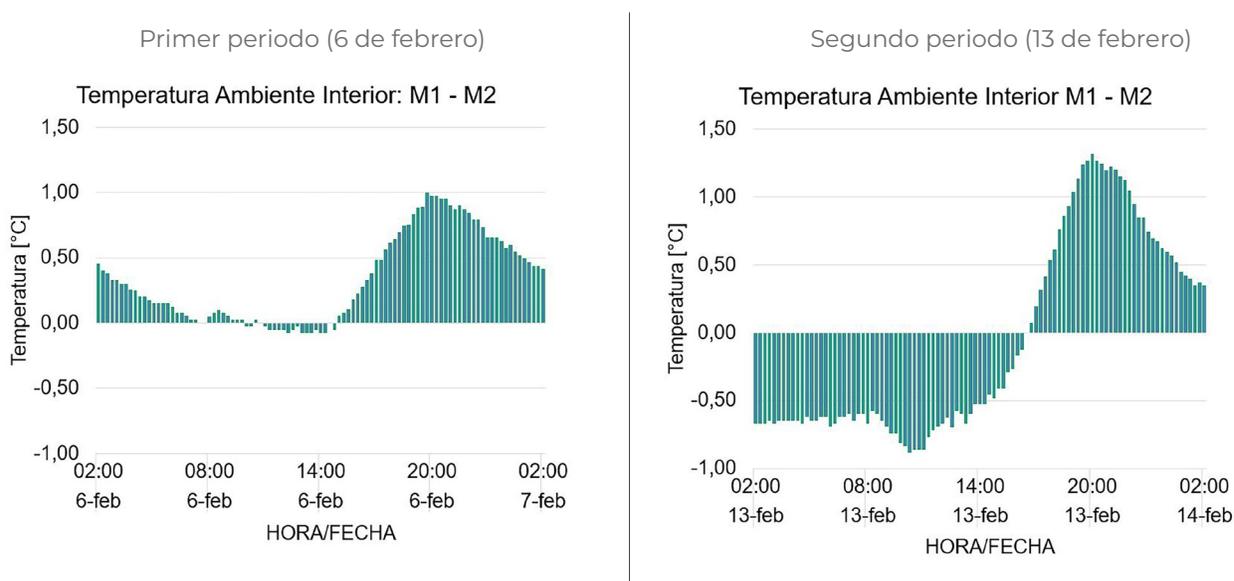
En términos de diferencias entre las especies de FVT durante el periodo de enfriamiento, la FVT con madreselva —menor cobertura— se encuentra hasta 0,8 °C más fresca que la FVT con bignonia para el periodo de temperaturas moderadas. Durante las horas de calentamiento, la temperatura del muro con madreselva se mantiene entre 1 °C y 1,2 °C más caliente que el muro con bignonia en el periodo de temperaturas altas y moderadas, respectivamente (figura 16). El menor porcentaje de cobertura de la madreselva incrementa las posibilidades de enfriamiento durante las horas de la noche e impacta en una mayor ganancia solar durante las horas de calentamiento.

Figura 15. Temperatura ambiente interior



Fuente: elaboración propia (2022).

Figura 16. Diferencial hora a hora de la temperatura ambiente interior



Fuente: elaboración propia (2022).

DISCUSIÓN

El presente trabajo explora los beneficios de la aplicación de una tecnología de enverdecimiento de envolventes edilicias en ciudades emplazadas en contextos áridos. Los resultados obtenidos muestran valores de reducción de temperatura exterior e interior, cuyas magnitudes son superiores a las halladas en la bibliografía internacional. Esto se debe a que el efecto de sombra y aislamiento de las FVT impacta en mayor medida en climas caracterizados por elevadas temperaturas en verano, la predominancia de días claros y la intensidad de radiación solar —BWk Köppen-Geiger—, ámbito en el cual se ha desarrollado el presente estudio.

Hacia el exterior, en términos de temperatura del aire, Zhang et al. (2019) hallan reducciones de hasta 1,9 °C para un día cálido a 0,30 m del follaje de una FV en orientación oeste respecto de un muro testigo en contexto de clima Cfa (subtropical); y de hasta 3,0 °C en verano a 0,08 m del follaje de una FV —hiedra— en orientación sur —hemisferio norte— respecto a muro testigo en clima Cfb (oceánico) (Cameron et al., 2014). En términos de temperatura superficial externa de la pared, Vox et al. (2018) y Hoelscher et al. (2016) reportan reducciones de hasta 9,0 °C y 15,5 °C para FVT orientadas al norte (clima Csa, mediterráneo) y al noroeste (clima Dfb, continental), respectivamente. En el presente estudio se determinan magnitudes mayores, del orden de 3,5 °C a 0,30 m del follaje para la temperatura

del aire exterior y de 17,8 °C para la temperatura superficial exterior. El mayor beneficio por el uso de las FVT en clima árido se debe a que, en la primera, la temperatura radiante promedio de la pared sin cobertura es más alta respecto a la del vegetal y, la segunda, debido al bloqueo de mayor radiación solar incidente en la cara externa del muro producido por la cobertura foliar de la FVT.

Hacia el interior, en relación con la temperatura superficial, Hoelscher et al. (2016) y Susorova et al. (2013) hallan magnitudes de reducción de hasta 1,7 °C y 2,0 °C para FVT orientadas al oeste (clima del tipo Dfb, continental) y al norte (clima del tipo Dfa, templado cálido), respectivamente. Finalmente, y asociado a la temperatura de aire interna en una cámara de aire, Kontoleon y Eumorfopoulou (2010) registran reducciones de hasta 0,5 °C para FVT orientadas al este (clima del tipo Cfb, oceánico). En este trabajo, las magnitudes encontradas son mayores, del orden de 7,5 °C para la temperatura superficial interior y de 6,2 °C para la temperatura ambiente en la cámara de aire. Los mayores valores encontrados en las temperaturas internas, respecto a la bibliografía internacional, se deben a que estas son la resultante de un efecto combinado de sombra y aislamiento que, como se observó, tienen mayor impacto en este tipo de clima. Esto incide en una mayor disminución en la transferencia de calor desde el exterior del muro mástico hacia el interior.

CONCLUSIONES

Este trabajo evalúa la incidencia de la aplicación de FVT, en muros de orientación oeste en verano, sobre las magnitudes de temperaturas ambiente y superficiales, exteriores e interiores, en un ensayo en condiciones controladas desarrollado en clima seco-desértico del Área Metropolitana de Mendoza —BWk—, en días representativos de esta estación.

Se observa una máxima disminución de la temperatura ambiente exterior mediata a las FVT del orden de 3,5 °C entre el muro testigo y el muro con trepadoras. A su vez, se registran diferencias de hasta 2,0 °C entre las FVT con distintas especies vegetales. Es decir, la magnitud del impacto de la estrategia está asociado a las características intrínsecas de las plantas. Esto pone de manifiesto que la correcta selección de especies incide en el potencial de las FVT para reducir la temperatura ambiente exterior mediata.

Los muros con cobertura vegetal alcanzan una máxima reducción de temperatura superficial exterior de 17,8 °C. Este beneficio se debe al sombreado que produce la especie trepadora respecto al caso testigo con total exposición solar. Además, se observan diferencias entre el desempeño de las FVT en relación con el espesor de la planta. En este sentido, esta variable impacta en la capacidad conservativa de la envolvente, mejorando su desempeño térmico para mantener temperaturas de confort en las estaciones extremas con su consecuente ahorro de energía auxiliar.

En relación con las variables interiores, se encontró una magnitud de máxima reducción de temperatura superficial de 7,5 °C y una magnitud de máxima reducción de temperatura ambiente de 6,2 °C. Las temperaturas más cercanas a las de confort están asociadas a la especie vegetal que muestra mayor cobertura, dado que esta variable impacta en una menor ganancia solar durante las horas de calentamiento y limita las posibilidades de enfriamiento durante las horas de la noche.

En comparación con las magnitudes encontradas por otros autores, en climas diferentes al estudiado y en ensayos similares, se observan mejores rendimientos térmicos dados por el

uso de la estrategia de FVT en condiciones de aridez.

Si se relacionan las diferencias halladas con las variaciones térmicas entre ambos periodos analizados —altas y moderadas temperaturas—, se observa que el impacto de la implementación de FVT en relación con el muro testigo es mayor en periodos de altas temperaturas. Mientras que el impacto de la selección de las especies es más evidente en periodos de temperaturas moderadas.

Finalmente, este estudio es un aporte al avance del conocimiento en torno al uso de FVT en envolventes edilicias del tipo másico, emplazadas en climas de condición árida. En los resultados queda demostrada la eficiencia de una de las estrategias de enverdecimiento vertical para disminuir temperaturas interiores y exteriores de las envolventes y para contribuir en la reducción de las temperaturas medias radiantes de las envolventes exteriores, mejorando la sensación de confort de las personas que habitan los espacios adyacentes. Además, es eficaz para reducir la temperatura ambiente exterior con el consecuente beneficio sobre la calidad ambiental del espacio urbano.

Durante el desarrollo del estudio se presentaron limitaciones asociadas a recursos económicos insuficientes para adquirir otros tipos de instrumentos de medición, necesarios para la evaluación de variables distintas a las presentadas. Además, cambios imprevistos de las condiciones meteorológicas forzaron a reiterar los periodos de medición, con los consecuentes desvíos en los plazos iniciales establecidos para la finalización del monitoreo experimental.

En futuras etapas, se prevé evaluar mediante simulación computacional el desempeño de la estrategia vinculado a otros sistemas constructivos, con diferentes especies para conformar FVT y mayores escalas de implementación. Se plantea, como objetivo mayor, incrementar los estudios en torno a la temática, estandarizar resultados y desarrollar pautas de diseño que permitan hacer un uso eficiente de FVT para mitigar el aumento de las temperaturas en el hábitat construido tanto a escala de edificación como a nivel urbano y global.

CONTRIBUCIONES Y AGRADECIMIENTOS

Todos los autores han contribuido con una dedicación coincidente con el orden de aparición como primer, segundo y tercer autor. Asimismo, estas contribuciones son del tipo

sustancial a la formulación, diseño y monitoreo del estudio, a la extracción y análisis de los datos obtenidos, redacción del cuerpo del artículo y su revisión final para publicación.

REFERENCIAS

- Bustami, R. A., Belusko, M., Ward, J., & Beecham, S. (2018). Vertical greenery systems: A systematic review of research trends. *Building and Environment*, 146(August), 226-237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.045>
- Cameron, R. W. F., Taylor, J. E., & Emmett, M. R. (2014). What's "cool" in the world of green façades? How plant choice influences the cooewing properties of green walls. *Building and Environment*, 73, 198-207. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.005>
- Coma, J., Pérez, G., de Gracia, A., Burés, S., Urrestarazu, M., & Cabeza, L. F. (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*, 111, 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014>
- Dahanayake, K. C., Chow, C. L., & Long Hou, G. (2017). Selection of suitable plant species for energy efficient Vertical Greenery Systems (VGS). *Energy Procedia*, 142, 2473-2478. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.185>
- De Lima Junior, J. E., De Medeiros, M. H. F., & Tavares, S. F. (2017). Fachadas vegetais para melhora do conforto ambiental de edificações: Escolha para Curitiba usando análise hierárquica. *Arquitetura Revista*, 13(1), 50-60. <https://doi.org/10.4013/arq.2017.131.06>
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure. *Built Environment*, 33(1), 115-133. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115>
- Haggag, M., Hassan, A., & Elmasry, S. (2014). Experimental study on reduced heat gain through green façades in a high heat load climate. *Energy and Buildings*, 82, 668-674. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.087>
- Hoelscher, M. T., Nehls, T., Jänicke, B., & Wessolek, G. (2016). Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, 114, 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.047>
- Kontoleon, K. J., & Eumorfopoulou, E. A. (2010). The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment*, 45(5), 1287-1303. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.11.013>
- Li, C., Wei, J., & Li, C. (2019). Influence of foliage thickness on thermal performance of green façades in hot and humid climate. *Energy & Buildings*, 199, 72-87. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.045>
- International Energy Agency (IEA). (2017). *Energy Technology Perspectives 2017*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>
- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). (2022). *Panorama energético de América Latina y el Caribe 2022*. http://www.joi.isoss.net/PDFs/Vol-7-no-2-2021/03_J_ISOSS_7_2.pdf
- Osuna-Motta, I., Herrera-Cáceres, C., y López-Bernal, O. (2017). Techo plantado como dispositivo de climatización pasiva en el trópico. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 19(1), 42-55. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2017.19.1.1109>
- Othman, A. R., & Sahidin, N. (2016). Vertical greening façade as passive approach in sustainable design. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 222, 845-854. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.185>
- Pérez, G., Coma, J., Chàfer, M., & Cabeza, L. F. (2022). Seasonal influence of leaf area index (LAI) on the energy performance of a green facade. *Building and Environment*, 207(2021). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108497>
- Pérez, G., Coma, J., Sol, S., & Cabeza, L. F. (2017). Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect. *Applied Energy*, 187, 424-437. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.055>

- Pérez Gallardo, N., Rogério, A., Neves, G. Z. F., Vecchia, F. A., & Roriz, V. F. (2018). Reacción frente al frío de edificaciones con envolventes vegetales para climas tropicales. Fachadas verdes y cubiertas ajardinadas. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(1), 15-28. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732018000100015>
- Suárez, P., Cantón, M. A., & Correa, É. (2018). Impacto de sistemas de enverdecimiento vertical en el comportamiento termo-energético de espacios urbano edificios. Análisis crítico del estado del arte. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - AVERMA*, 22, 37-48. <https://portalde-revistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/1186>
- Suklje, T., Saso, M., & Arkar, C. (2016). On detailed thermal response modeling of vertical greenery systems as cooling measure for buildings and cities in summer conditions. *Energy*, 115, 1055-1068. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.095>
- Susorova, I., Angulo, M., Bahrami, P., & Brent Stephens. (2013). A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. *Building and Environment*, 67, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.027>
- Susorova, I., Azimi, P., & Stephens, B. (2014). The effects of climbing vegetation on the local microclimate, thermal performance, and air infiltration of four building facade orientations. *Building and Environment*, 76, 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.011>
- Vox, G., Blanco, I., & Schettini, E. (2018). Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment*, 129(2017), 154-166. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.002>
- Wong, N. H., Kwang Tan, A. Y., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P. Y., Chan, D., Chiang, K., & Wong, N. C. (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 45(3), 663-672. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.005>
- Xing, Q., Hao, X., Lin, Y., Tan, H., & Yang, K. (2019). Experimental investigation on the thermal performance of a vertical greening system with green roof in wet and cold climates during winter. *Energy and Buildings*, 183, 105-117. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.038>
- Zhang, L., Deng, Z., Liang, L., Zhang, Y., Meng, Q., & Wang, J. (2019). Energy & Buildings Thermal behavior of a vertical green facade and its impact on the indoor and outdoor thermal environment. *Energy and Buildings*, 204, 109502. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109502>

