

Comportamiento térmico estacional de fachadas verdes conformadas por especies trepadoras perennes en muros máxicos orientados al oeste.

Estudio de casos en zonas áridas

Pablo Suárez

Especialista en Proyectos de Arquitectura Sustentable, becario doctoral. Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE - CCT CONICET), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina.

suarezpablo91@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0032-3278>

María Alicia Cantón

Diplomada en Estudios Avanzados en Arquitectura, investigadora principal. Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE - CCT CONICET), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina.

macanton@mendoza-conicet.gob.ar

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8714-9697>

Érica Correa

Doctora en Ciencias, investigadora principal. Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE - CCT CONICET), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina.

ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1690-076X>



ISSN 1666-6186. Volumen 35 - N.º 35 (Agosto de 2023) Pp. 083-105

Recibido: 03/11/22. Evaluado y aprobado: 24/04/23

<http://dx.doi.org/10.30972/crn.35356773>

Pablo Suárez,
María Alicia Cantón y
Érica Correa

CUADERNO URBANO
ESPACIO, CULTURA, SOCIEDAD

ARTÍCULOS

VOL. 35 - N.º 35
(AGOSTO DE 2023)
PP. 083-105
ISSN1666-6186



Comportamiento térmico estacional de fachadas verdes conformadas por especies trepadoras perennes en muros máxicos orientados al oeste. Estudio de casos en zonas áridas

Resumen

Este trabajo evalúa el comportamiento térmico estacional de Fachadas Verdes Tradicionales (FVT), en los ambientes y superficies exteriores e interiores en ciudades de zonas áridas. Metodológicamente se desarrolló un ensayo experimental en condiciones controladas compuesto por tres muros de mampostería, dos de ellos con cobertura vegetal y uno sin ningún tipo de cobertura, todos ellos orientados al oeste y aislados al norte, sur y este. Se monitorearon variables meteorológicas —temperatura ambiente exterior e interior, y superficial exterior e interior— durante dos períodos de siete días en invierno y verano en 2021-2022. Los resultados obtenidos muestran variaciones de temperatura en los muros con cobertura vegetal respecto del muro testigo. Alcanzan magnitudes de aumento en invierno de temperatura ambiente interior de hasta 0.8 °C, reducciones en verano de hasta 4.4 °C y disminuciones de temperatura ambiente exterior mediata hasta 3.9 °C en la estación cálida. Esto muestra la efectividad de una estrategia de mínima complejidad tecnológica para mejorar el comportamiento térmico de los espacios y contribuir a la eficiencia energética residencial y la disminución de temperaturas a escala urbana en ciudades de clima árido.

Palabras clave

Fachadas verdes tradicionales; climas áridos; eficiencia térmica; arquitectura bioclimática; construcción sostenible.

Seasonal thermal behavior of green facades made up of perennial climbing species on west-facing mass walls. Case study in arid zones

Abstract

This work evaluates the seasonal thermal behavior of Traditional Green Facades (FVT), as in the environments as exterior and interior surfaces in cities of arid zones. Methodologically, an experimental trial was developed under controlled conditions consisting of three masonry walls, two of them with vegetation cover and one without any type of coverage, all facing west and isolated to the north, south and east. Meteorological variables —outdoor and indoor ambient temperature, and exterior and interior surface temperature— were monitored during two periods of seven days in winter and summer 2021-2022. The results obtained show temperature variations in the walls with vegetation cover regard to the control wall. They reach magnitudes of increase in winter indoor ambient temperature of up to 0.8 °C, reductions in summer of up to 4.4 °C, and decreases of average outdoor ambient temperature up to 3.9 °C in warm season. This shows the effectiveness of a strategy of minimum technological complexity to improve the thermal behavior of spaces and contribute to residential energy efficiency and the reduction of temperatures on an urban scale in cities with an arid climate.

Keywords

Traditional green facades; arid climates; thermal efficiency; bioclimatic architecture; sustainable construction.

Comportamento térmico sazonal de fachadas verdes compostas por espécies trepadeiras perenes em paredes de massa voltadas para oeste. Estudo de caso em zonas áridas

Resumo

Este trabalho avalia o comportamento térmico sazonal das Fachadas Verdes Tradicionais (FVT), tanto nos ambientes como nas superfícies exteriores e interiores em cidades de zonas áridas. Metodologicamente foi desenvolvido um ensaio experimental em condições controladas composto por três paredes de alvenaria, duas delas com cobertura vegetal e uma sem qualquer tipo de cobertura, todas voltadas para oeste e isoladas ao norte, sul e leste. As variáveis meteorológicas —temperatura ambiente exterior e interior e temperatura exterior e interior da superfície— foram monitorizadas durante dois períodos de sete dias no inverno e no verão em 2021-2022. Os resultados obtidos mostram variações de temperatura nas paredes com cobertura vegetal em relação à parede de controle. Eles atingem magnitudes de aumento no inverno da temperatura ambiente interior de até 0,8 °C, reduções no verão de até 4,4 °C e diminuições da temperatura ambiente exterior média até 3,9 °C na estação quente. Isso mostra a eficácia de uma estratégia de mínima complexidade tecnológica para melhorar o comportamento térmico dos espaços e contribuir para a eficiência energética residencial e à redução das temperaturas em escala urbana em cidades com clima árido.

Palavras-chave

Fachadas verdes tradicionais; climas áridos; eficiência térmica; arquitetura bioclimática; construção sustentável.

1. Introducción

El problema del cambio climático nace del vínculo generado por la interacción entre la sociedad humana y el entorno natural, con sus características climáticas y ecosistémicas (incluyendo su biodiversidad). Ante este escenario, las ciudades de América Latina y el Caribe, donde un 81 % de la población reside en áreas urbanas (OLADE, 2021), presentan una alta vulnerabilidad y riesgo (CASTELLANOS *ET AL.*, 2022). Para restablecer el equilibrio entre entorno natural y hábitat construido, se torna necesario adoptar herramientas que potencien una urbanización sostenible y restauren los ecosistemas degradados. Una de ellas es la incorporación de “infraestructura verde” a las tramas urbanas, con probados beneficios sociales, económicos y ecológicos para las ciudades.

Diversos estudios han demostrado que la integración y expansión del verde urbano en la ciudad es una estrategia efectiva para aumentar la resiliencia al cambio climático (GILL *ET AL.*, 2007). Además, las infraestructuras verdes se muestran como elementos versátiles dentro de la arquitectura urbana y son la esencia de las nuevas tendencias en el campo de la arquitectura y del urbanismo, en especial de la arquitectura verde o ecoarquitectura (GONZÁLEZ & GONZÁLEZ, 2019). Su incorporación a la ciudad trae aparejados beneficios energético-ambientales, mitiga el efecto de isla de calor y aumenta el confort de los espacios públicos y, a escala edilicia, reduce el consumo de energía para el acondicionamiento de los espacios interiores. A escala residencial, en un clima tropical una construcción protegida con techos y fachadas verdes mantiene la temperatura del aire interno casi 2°C por sobre otra sin vegetación en invierno (PÉREZ GALLARDO *ET AL.*, 2018).

Investigaciones recientes vinculadas con los Sistemas de Enverdecimiento Vertical (SEV) han mostrado una tendencia creciente en función de su relevancia a nivel mundial en la última década (BUSTAMI *ET AL.*, 2018; SUÁREZ *ET AL.*, 2018). Los resultados varían en su magnitud según el tipo de clima donde se aplican los SEV, pero muestran efectividad para aproximar las temperaturas de los edificios a valores de confort en cualquier estación del año. Para verano, se han registrado máximas disminuciones de temperatura superficial exterior del orden de los 34 °C (ŠUKLIJE *ET AL.*, 2016) en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente), de temperatura ambiente interior del orden de los 5 °C (HAGGAG *ET AL.*, 2014) en climas del tipo BWh (árido desértico, verano caliente), de temperatura ambiente exterior del orden de los 3.3 °C (WONG *ET AL.*, 2010) en climas del tipo Af (Ecuatorial húmedo) y ahorros de energía de hasta 58.9 % (COMA *ET AL.*, 2017) en climas del tipo Cfa (Subtropical húmedo). En invierno, se hallaron reducciones promedio de pérdidas de calor en envolventes con SEV, respecto de un caso testigo, del orden del 20 % (DJEDJIG *ET AL.*, 2017). Los resultados muestran similares o mejores rendimientos para los SEV, en cuanto a las reducciones de temperatura, en climas áridos respecto de climas húmedos.

Dentro de los SEV, se encuentra la tipología denominada Fachada Verde (FV), Tradicional (FVT) si es adosada al muro y Doble Piel (FVDP) si existe espacio entre esta y el muro, en la cual se adopta una planta del tipo enredadera. Es una tipología de implementación simple, de bajo costo y reducido impacto en la construcción existente (ver figura 1). Si bien el desarrollo de conocimiento en relación con esta tipología continúa en desarrollo, diversos estudios demuestran la contribución de la estrategia al acondicionamiento térmico edilicio, asociada al

Comportamiento térmico estacional de fachadas verdes conformadas por especies trepadoras perennes en muros másicos orientados al oeste. Estudio de casos en zonas áridas

efecto aislante de la fachada verde, en invierno y verano. Para la estación verano, una FVDP puede reducir los consumos de energía de la edificación hasta un 33.8 % (COMA ET AL., 2017) en climas del tipo Csa (Templado mediterráneo). Para la estación invierno, se identificó que la temperatura del aire exterior era el factor que más influía: a medida que baja, aumenta el efecto de conservación (CONVERTINO ET AL., 2022).

En el caso de la ciudad de Mendoza, Argentina, cuyo clima es del tipo árido desértico (BWk - Köppen-Geiger); en sus orígenes fue concebida con el modelo de “ciudad oasis”. Su concepción urbanística se basa en la presencia de vegetación como estrategia de sombreado, que minimiza la exposición solar del conjunto y mejora la habitabilidad de los espacios al aire libre (STOCCO ET AL., 2017). Sin embargo, el proceso de crecimiento y densificación urbana no ha sido acompañado por una densificación de los espacios verdes y, además, ha limitado la disponibilidad de vacíos urbanos. En consecuencia, incrementar las áreas verdes implica implementar nuevas tecnologías de vegetación, como lo son, entre otras, los SEV. Localmente, la aplicación de tipologías de FVT es espontánea y ampliamente difundida en las áreas residenciales de baja densidad. Los beneficios termo-energéticos de estos sistemas están asociados a diversos efectos, como *sombreado*, *enfriamiento por evapo-transpiración*, *aislamiento* y *reducción de la velocidad de viento*. De modo particular, respecto de la orientación, OTHMAN & SAHIDIN (2016) establecen que este parámetro es importante en climas con altos niveles de irradiancia solar, como es el caso del área de estudio. ALEXANDRI & JONES (2008) determinan que la radiación máxima recibida en verano en los planos verticales orientados al este y al oeste es 1.65 veces mayor a la recibida

en los planos norte y sur para el caso de Atenas, Grecia, cuya latitud (32° N) es equiparable con la de la ciudad de Mendoza (32° S). SUSOROVA ET AL. (2013) miden el efecto de FVT sobre muros de edificios en las cuatro orientaciones en Chicago y encuentran magnitudes mayores, del orden de 4 y 5 veces más, para las orientaciones este y oeste. De lo descripto se desprende que las FVT generan los mayores impactos en orientaciones este y oeste, cuyos planos verticales son los más demandados por la radiación solar.

En este marco, se propone evaluar la respuesta térmica estacional de las FVT, conformadas por distintas especies trepadoras, en la envolvente edilicia tradicionalmente utilizada en viviendas del Área Metropolitana de Mendoza. Se eligen especies perennes para verificar los efectos en invierno y verano, y en orientación oeste por ser la más demandante en la estación estival.

2. Desarrollo

2.1. Ensayo experimental

Se llevó a cabo un experimento en condiciones controladas en un área dedicada a tal fin, cuya ubicación es dentro del predio del CCT CONICET, Mendoza, Argentina (ver figura 1). El edificio se compone de tres muros de ensayo orientados al oeste (orientación con mayor demanda térmica en estación verano): un muro testigo sin vegetar (MT) y dos muros destinados a evaluar el impacto de distintas FVT compuestas por las siguientes especies: jazmín de lluvia (*Trachelospermum jasminoides*) (MJ) y bignonia blanca (*Pandorea Jasminoides*) (MB). La selección de especies responde a su adaptabilidad al clima local, y se desarrollaron en estructuras independientes para su posterior adosamiento a los muros.

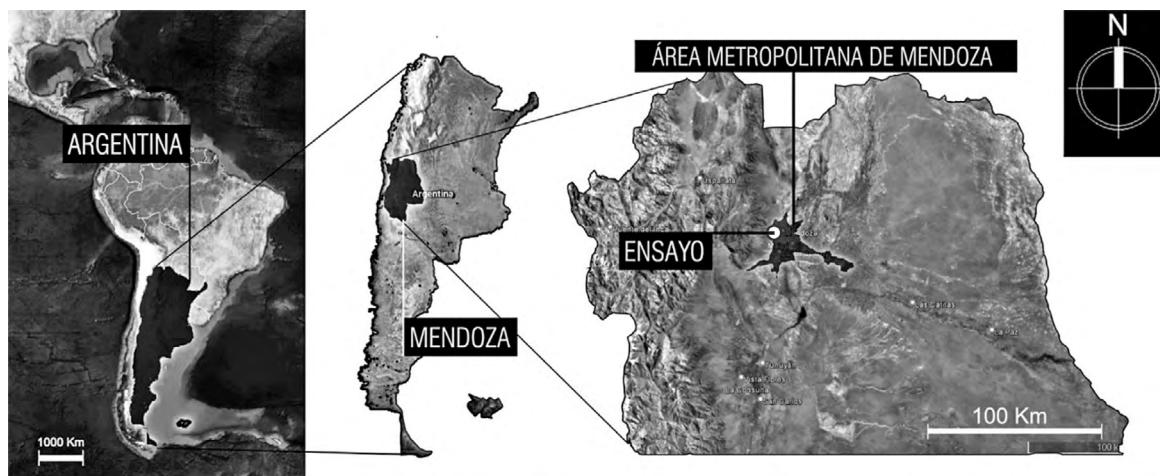


Figura 1. Ubicación del ensayo experimental. Fuente: elaboración propia

El sistema de construcción tradicional en Argentina consiste en un sistema húmedo y másico, en este caso, ladrillo cocido, cemento y arena. En el caso específico de la ciudad de Mendoza, emplazada en zona sísmica, se configura con estructura de hormigón armado y paredes portantes de ladrillo cocido de 17 cm de espesor, eventualmente con revoque en ambas caras. Se adopta esta tecnología, sin revoque, con unas dimensiones 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, para cada muro. 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). Además, se aplica aislación de 0.05 m de poliestireno expandido de alta densidad, en las caras N, S y E de los muros. Se alberga en esta última orientación una cámara de aire cuyo espesor es de 0.10 m (ver figura 2).

2.2. Monitoreo de casos de estudio

Con el objetivo de evaluar la incidencia de la FVT en el comportamiento térmico de los muros que conforman el ensayo experimental, estos se monitorearon durante veinte días en invierno y en verano (09/08/21 al 29/08/21 y 28/01/22 al 17/02/22). Las variables monitoreadas fueron: temperatura, humedad, radiación solar sobre plano horizontal y velocidad de viento en el espacio exterior; temperatura y humedad en el interior de la cámara de aire y temperatura superficial interior y exterior en muros. Los datos se registraron cada quince minutos. Los sensores utilizados son del tipo termistor y termocupla —HOBO Onset, UX100-003, UX120, U30 USB Weather Station—, colocados a 1.00 m y 1.60 m de altura, con el objetivo de analizar la incidencia del crecimiento heterogéneo de las especies y el efecto de estratificación del aire con la altura. Fueron calibrados previamente para garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos, y su ubicación se muestra en la figura 2.

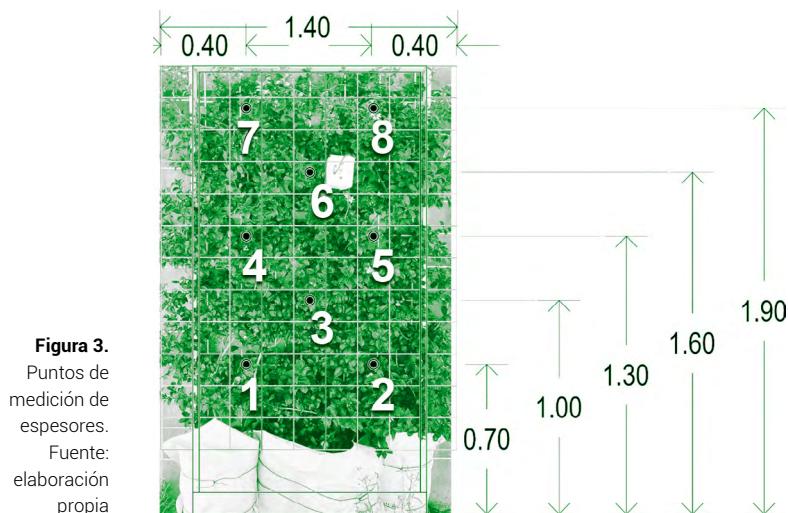
Comportamiento térmico estacional de fachadas verdes conformadas por especies trepadoras perennes en muros máscicos orientados al oeste. Estudio de casos en zonas áridas



2.3. Caracterización de las especies vegetales

Con el objetivo de caracterizar las especies vegetales que conforman las FVT, se consideraron dos variables: espesor y cobertura. La evolución temporal del espesor de la especie vegetal fue medida con una frecuencia semanal, en invierno y verano, en ocho puntos equidistantes. Los datos

fueron promediados con el objeto de determinar un valor que fuera representativo del crecimiento de la especie que integra cada FVT (ver figura 3). A los efectos del análisis del impacto de la FVT en la respuesta térmica del muro, los valores de espesor empleados son los correspondientes al periodo monitoreado en invierno y en verano.



En el caso de la cobertura vegetal, fue estimada mediante la toma de imágenes fotográficas en los períodos de medición, en horario de mínima radiación solar para evitar distorsiones en la generación de la imagen que procesar. Fueron procesadas mediante el *software* MultiSpec, a los efectos de determinar la proporción entre vacíos y llenos que representa el grado de cobertura de cada especie que compone las FVT.

2.4. Selección de días de análisis

Durante la estación invierno, mientras menor es la temperatura de aire exterior mayor es el efecto de conservación de calor de la envolvente producido por una enredadera (CONVERTINO ET AL., 2022). Es por ello que se seleccionó como día de análisis el más frío, el cual representa las condiciones típicas de la estación analizada en un período estable de seis días. Es decir, con valores de temperatura y

radiación solar característicos de días soleados y con baja velocidad de viento. Dicho día corresponde al 10 de agosto de 2021 (ver figura 4).

En verano, la aplicación de Fachadas Verdes Tradicionales muestra mayor eficiencia para el ahorro de energía en edificios cuanto mayor es el efecto de sombreo (PÉREZ ET AL., 2017). Por este motivo, para la elección del día de análisis en verano, se consideró aquel que representa las condiciones típicas de la estación analizada en un período estable de seis días. Es decir, muestran valores de temperatura y radiación solar correspondiente a días soleados y con baja velocidad de viento. Dicho día corresponde al 29 de enero de 2022 (ver figura 4).

Con el fin de verificar si los días elegidos son representativos de los días típicos de invierno y verano en el área de estudio, se compararon los datos

Comportamiento térmico estacional de fachadas verdes conformadas por especies trepadoras perennes en muros mäsicos orientados al oeste. Estudio de casos en zonas áridas

de temperatura máxima, mínima y de amplitud promedio de ambos períodos de medición con los valores de los meses de agosto y enero históricos. Según datos del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina —estación homologada N.º 87418 correspondiente a “Mendoza AERO”—, para agosto

la temperatura mínima promedio es de 5 °C (-5.5 °C extrema) y una amplitud promedio de 16.4 °C. A su vez, para enero la temperatura máxima promedio es de 30 °C (40.2 °C extrema) y la amplitud promedio 16.6 °C. La tabla N.º 1 muestra los valores registrados en los días de análisis seleccionados.

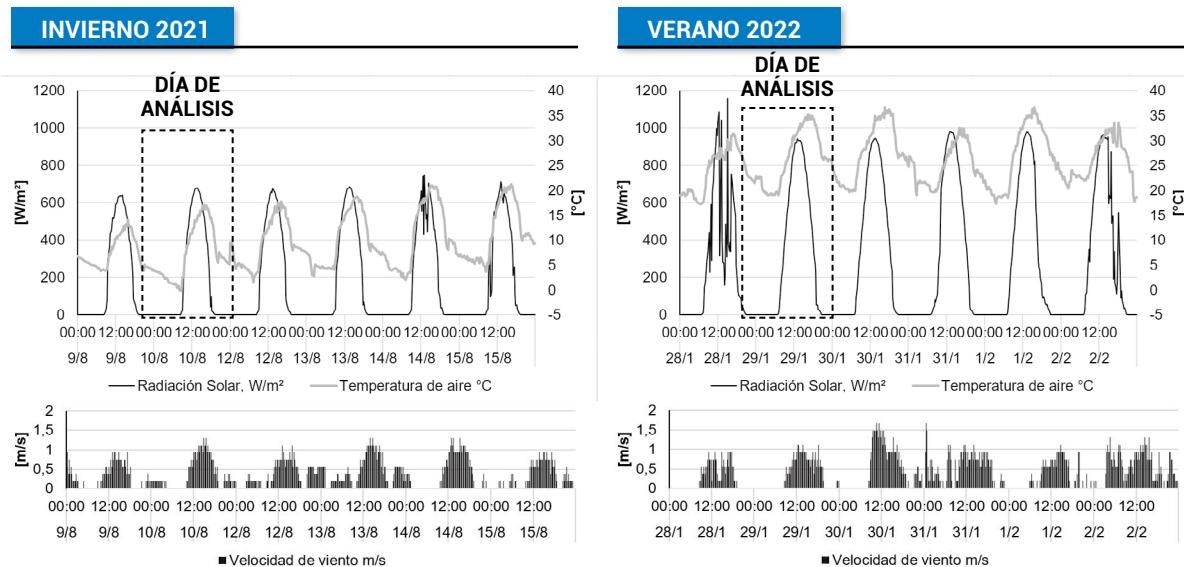


Figura 4. Temperatura ambiente exterior, radiación solar en plano horizontal y velocidad de viento. Selección de día de análisis.
Fuente: elaboración propia

Tabla 1

Temperaturas máximas, mínimas y amplitud térmica para los días elegidos.

	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Amplitud térmica
Invierno 2021: 10 de agosto	17.1	-0.2	16.9
Verano 2022: 29 de enero	35.2	18.9	16.3

Fuente: elaboración propia

3. Resultados y discusión

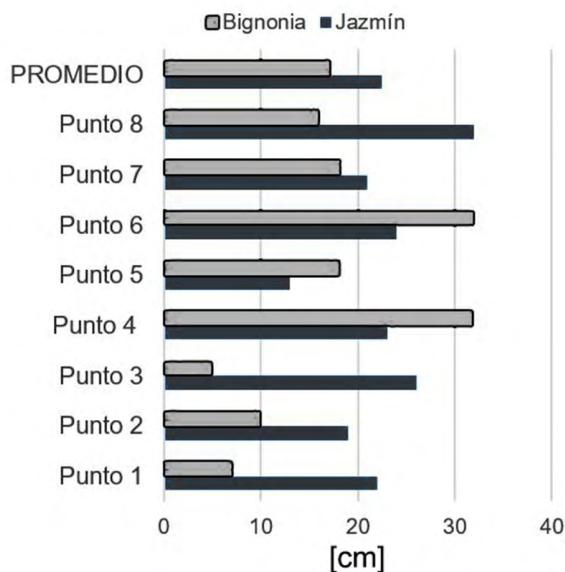
Los resultados obtenidos están asociados con la caracterización de la estructura vegetal y el comportamiento térmico resultante del monitoreo llevado a cabo en el ensayo experimental con el objetivo de analizar comparativamente el desempeño térmico de un muro desnudo —definido como MT— y dos muros cubiertos con FVT —MJ (jazmín) y MB (bignonia)—.

3.1. Caracterización de la estructura vegetal

3.1.1. Espesor Vegetal

La figura 5 muestra los valores de espesor obtenidos en los puntos medidos y el valor promedio para cada especie en ambas estaciones. En invierno, el espesor promedio de MJ es del orden de 0.22 m y el de MB es del orden de 0.17 m. En verano, el espesor promedio de MJ es del orden de 0.30 m y el de MB es del orden

INVIERNO: 10 de agosto de 2021



VERANO: 29 de enero de 2022

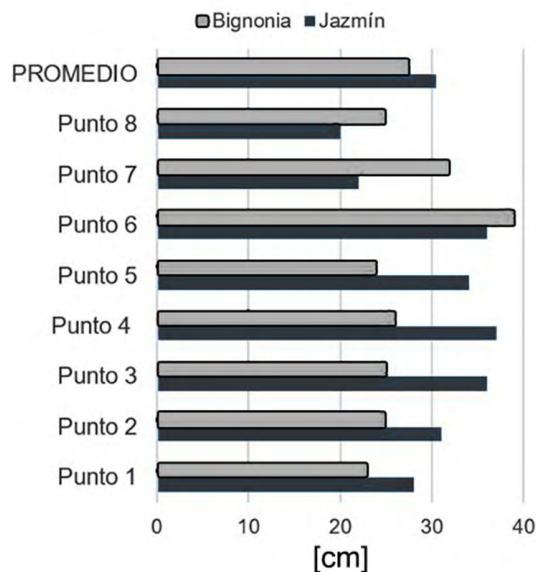


Figura 5. Espesores por punto y promedio. Fuente: elaboración propia

Comportamiento térmico estacional de fachadas verdes conformadas por especies trepadoras perennes en muros mäsicos orientados al oeste. Estudio de casos en zonas áridas

de 0.27 m. Los resultados muestran variaciones de espesor entre especies de 23% en invierno y 10% en verano (ver figura 5).

3.1.2. Cobertura Vegetal

El procesamiento de imágenes tomadas durante ambos ciclos de medición muestra que los índices de cobertura de cada especie son semejantes entre sí, tanto en invierno como en verano. Durante el invierno, los porcentajes de cobertura son del orden

del 73,6 % (jazmín) y el 73,7 % (bignonia). Durante el verano, los porcentajes de cobertura alcanzan valores de entre 89,0 % (jazmín) y 88,0 % (bignonia). Dadas las mínimas diferencias encontradas en el análisis de esta variable, se considera que la cobertura vegetal es equivalente para ambas especies. Pero la distribución en el área analizada muestra diferenciación de acuerdo con la especie, como se observa en la figura 6.

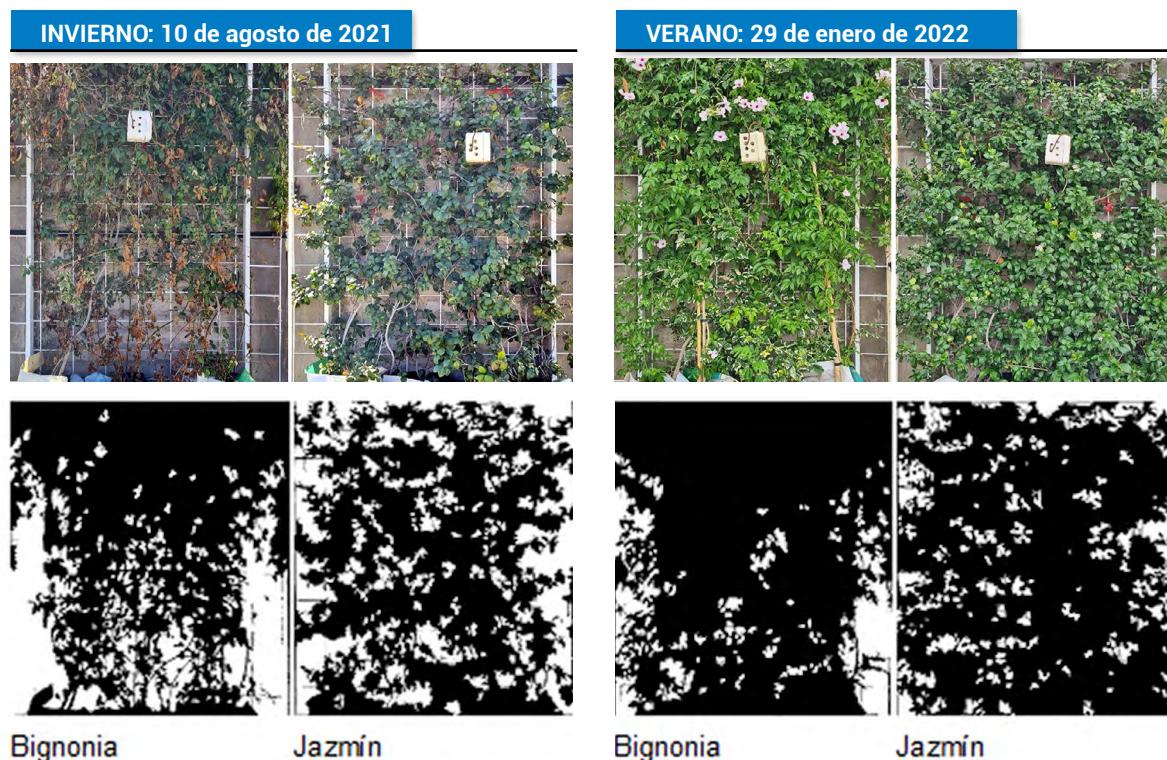


Figura 6. Resultado del procesamiento de imágenes de cobertura vegetal en ambos períodos de medición. Fuente: elaboración propia

4. Comportamiento térmico

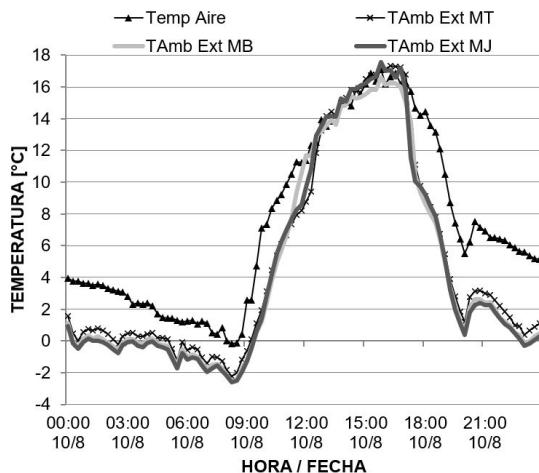
El comportamiento térmico de los tres muros se ha evaluado mediante el análisis de las siguientes variables: temperatura ambiente exterior, temperatura superficial exterior e interior del muro y temperatura ambiente interior de la cámara de aire. A continuación, se presenta un análisis de las curvas de temperatura por cada variable monitoreada en relación con dos criterios: uno orientado a valorar el impacto de la FVT en sí misma (máxima prestación) a partir de la observación del mayor impacto de la estrategia en horas de enfriamiento para invierno y de calentamiento para verano y el segundo criterio, que persigue determinar el desempeño de la estrategia en las horas de mayor demanda de refrigeración y

calefacción, es decir, a la hora en que se identifica la temperatura exterior mínima en invierno y máxima en verano (-0.2 °C de mínima a las 8:15 am en invierno y 35.2 °C de máxima a las 4:15 pm en verano). Además, se muestra un indicador global de las prestaciones de las FVT (análisis tipo Box-Plot), en el cual se integran los resultados registrados a lo largo de todo el día en cada período evaluado.

4.1. Temperatura ambiente exterior mediata

Se compararon los datos obtenidos de temperaturas ambiente exteriores entre MT y muros con FVT, tomados a 0.30 m de follaje y pared, respectivamente. En invierno, los datos obtenidos de temperaturas ambiente exteriores entre MT y muros con FVT, muestran una máxima reducción de temperatura ambiente exterior de 0.8 °C a las 8:45 am producida

INVIERNO: 10 de agosto de 2021



VERANO: 29 de enero de 2022

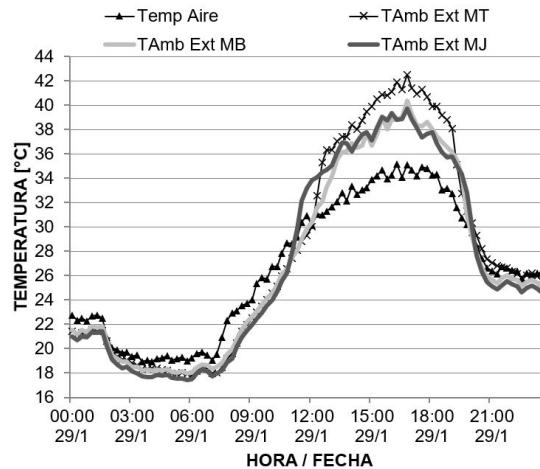


Figura 7. Diferencial hora a hora de temperatura ambiente exterior mediata. Fuente: elaboración propia

Comportamiento térmico estacional de fachadas verdes conformadas por especies trepadoras perennes en muros mäsicos orientados al oeste. Estudio de casos en zonas áridas

por la MJ. A la hora de la máxima demanda, ambas especies registran una reducción de 0.4 °C (ver figura 7). Estos valores indicarían una menor pérdida de energía del muro, dado el efecto conservativo de las especies vegetales. La bibliografía internacional no reporta magnitudes de impacto en la temperatura en el entorno inmediato de una FVT respecto de un muro testigo en invierno.

Para verano, se observa una máxima reducción de temperatura de 3.9 °C a las 5:30 pm, producida por MJ. Esto se puede explicar por el efecto combinado de dos procesos, la disminución de la temperatura radiante de la superficie vegetal y el aporte de los procesos de evapotranspiración asociados que producen el enfriamiento del aire inmediato en contacto con la FVT. En el horario de máxima demanda, ambas especies registran una reducción de 3.1 °C (ver figura 7). La máxima magnitud encontrada es mayor que la reportada en la bibliografía internacional, que muestra 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 climas del tipo Cfa (subtropical húmedo) (ZHANG ET AL., 2019).

Además, tanto en invierno como en verano, se observan diferencias térmicas menores a 1 °C entre MJ y el MB. Esto indicaría la importancia del impacto de la estrategia en la disminución de la temperatura exterior mediata, más allá del tipo de especie utilizada.

4.2. Temperatura superficial exterior

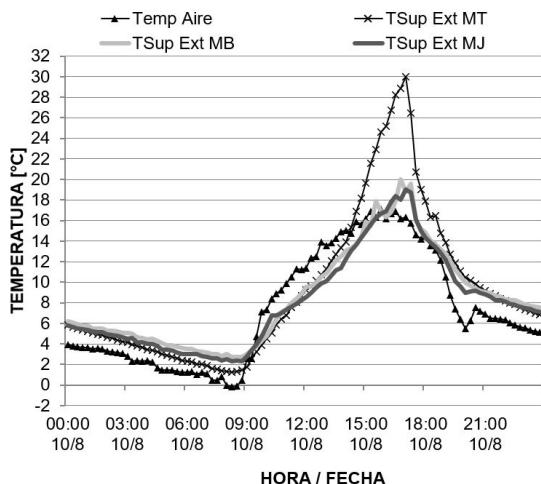
Se establecieron comparaciones entre las temperaturas superficiales exteriores de los muros con FVT y MT. Para el período de invierno, se observa que la temperatura superficial exterior en MB es de 1.7 °C mayor respecto de MT a las 8:00

am. A la hora de la máxima demanda, el muro MB se encuentra hasta 1.5 °C más caliente que MT (ver figura 8). Esto reflejaría el efecto de aislamiento de la cubierta vegetal que disminuye la pérdida de calor del muro. Estos resultados tienen correlación con los encontrados por CAMERON (2015) y CONVERTINO (2022), que son del orden de 3.0 °C y 3.5 °C (FVT en orientación norte y en clima del tipo Cfb, marítimo templado, FVT en orientación norte y en clima del tipo Csa, templado mediterráneo, respectivamente), ya que presentan temperaturas mínimas más bajas, con su consecuente incremento en la efectividad del uso de las FV.

En el análisis del período de verano, se determina una máxima reducción de 19.2 °C a las 5:30 pm para el MJ. Por otra parte, para el horario de máxima demanda, se registra una reducción máxima de 8 °C en MJ (ver figura 8). Las diferencias observadas reflejan el impacto de la sombra generada por la vegetación en la temperatura superficial del muro. Al igual que en invierno, se observan diferencias de distinta magnitud, provocadas por el uso de la estrategia, a lo largo de todas las horas del día. Las magnitudes encontradas son superiores a las halladas por VOX ET AL. (2018) y HOELSCHER ET AL. (2016) para verano, las cuales oscilan entre 9.0 °C y 15.5 °C (FVT en orientación norte y en clima del tipo Csa, mediterráneo templado cálido, FVT en orientación noroeste y clima del tipo Dfb, templado cálido, respectivamente). Estos resultados reflejan el mayor impacto de las FVT en climas áridos del tipo BWk.

Respecto del análisis comparativo entre ambos muros con FVT, en verano el tipo de especie empleada manifiesta impactos sobre la respuesta térmica de las FVT. A las 5:30 pm, hora en que se registra la máxima diferencia respecto de MT, MB

INVIERNO: 10 de agosto de 2021



VERANO: 29 de enero de 2022

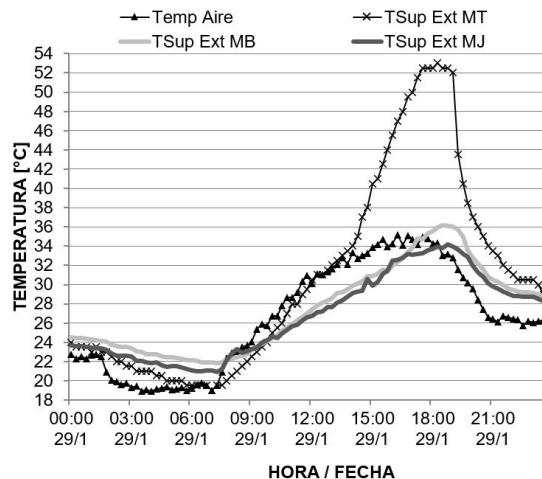


Figura 8. Diferencial hora a hora de temperatura superficial exterior. Fuente: elaboración propia

está 1.4 °C más caliente que MJ. Esto puede deberse a que, si bien en el punto de la toma de dato tienen semejante cobertura, el espesor promedio del jazmín es mayor. En invierno, no se observa un comportamiento diferencial de acuerdo con el tipo de especie empleada, en donde la magnitud de la diferencia alcanzada es inferior a 1 °C.

4.3. Temperatura superficial interior

Las temperaturas superficiales interiores de los muros con FVT y MT fueron analizadas en forma comparativa. Para el período de invierno, se observa que la temperatura superficial interior en MJ es de 2.5 °C mayor respecto de MT a las 8:15 am. Este valor es coincidente con el momento de la máxima demanda (ver figura N.º 9). Además, se observa que la

mayor temperatura superficial interior de los muros con FVT se debe al efecto de aislación que genera la estrategia, y su impacto se verifica a lo largo del día. En el estudio de la bibliografía internacional no se hallaron magnitudes de aumento de temperatura superficial interior por el uso de FVT en invierno.

En el período de verano, se monitorea una máxima reducción de 5.5 °C a las 7:30 pm para MJ. Además, a la hora de la máxima demanda —4:15pm— se registra una reducción de 0.5 °C para ambas FVT (ver figura N.º 9). Se visualiza el efecto combinado de la sombra de la estructura vegetal y la inercia del muro, que modifican la velocidad de la transferencia de calor en los muros con FVT respecto de MT. La máxima magnitud encontrada es superior a las

Comportamiento térmico estacional de fachadas verdes conformadas por especies trepadoras perennes en muros máscicos orientados al oeste. Estudio de casos en zonas áridas

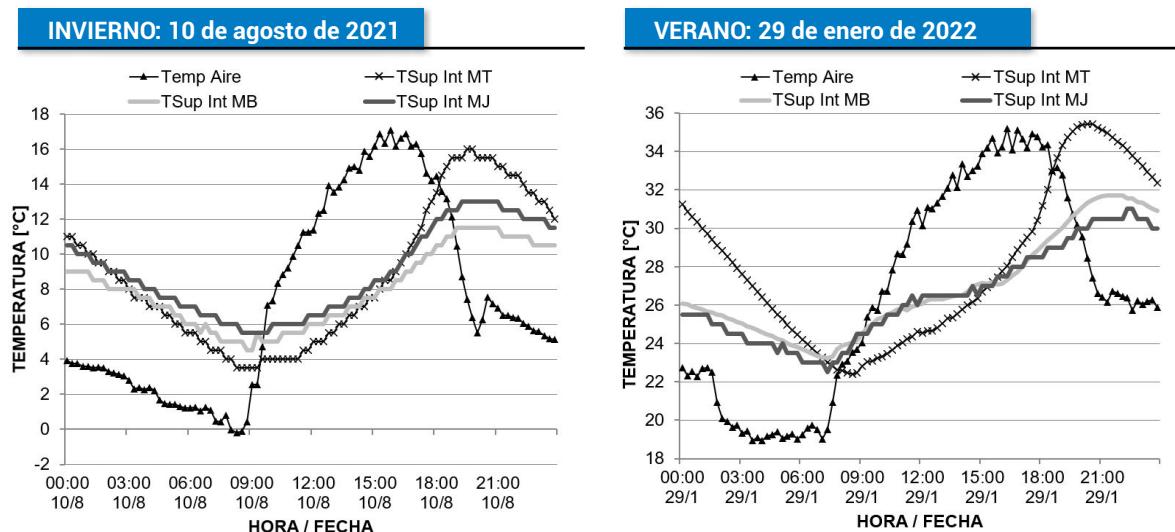


Figura 9. Diferencial hora a hora de temperatura superficial interior. Fuente: elaboración propia

reportadas por HOELSCHER *ET AL.* (2016) y SUSOROVA *ET AL.* (2013), las cuales oscilan entre 1.7 °C y 2.0 °C (FVT en orientación oeste y en clima del tipo Dfb templado cálido, FVT en orientación norte y en clima del tipo Dfa, continental verano caliente, respectivamente).

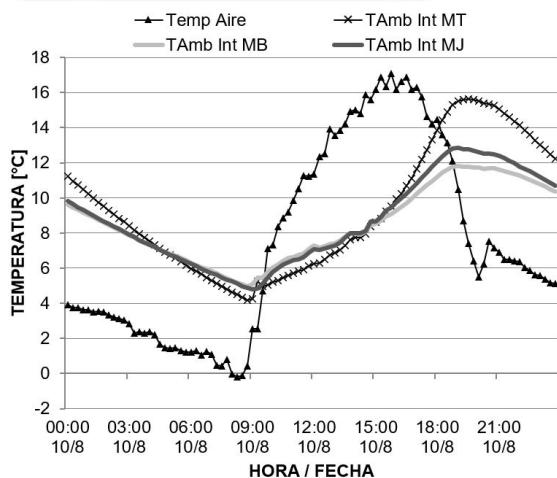
Respecto de las especies analizadas, se observa que la temperatura superficial interior de MJ es 1.0 °C más caliente en invierno y 1.1 °C más fresca en verano, respecto de MB. La mayor eficiencia del MJ se debe al mayor espesor promedio que presenta la FVT en ambas estaciones.

4.4. Temperatura ambiente interior

Las temperaturas ambiente interiores de los muros con FVT y MT fueron comparadas a fin de verificar

existencia de impactos del uso de la estrategia en espacios interiores. Para el período de invierno, se determina que la temperatura ambiente interior de MB respecto de MT es 0.8 °C más caliente a las 9:00 am. A su vez, en el momento de la máxima demanda —8:15 am— se verifica que el espacio interior en ambas FVT muestra una temperatura del orden de 0.6 °C superior respecto del espacio interior de MT (ver figura 10). Las diferencias observadas reflejan el efecto conservativo de las FVT durante todas las horas del día. Esta magnitud de reducción de temperatura del aire en el espacio interior es similar a la encontrada por OTTELÉ & PERINI (2017), la cual fue del orden de 0.7 °C (FVT hiedra en cámara climática acorde con NEN-EN 1934) en condiciones de invierno con temperaturas bajo cero.

INVIERNO: 10 de agosto de 2021



VERANO: 29 de enero de 2022

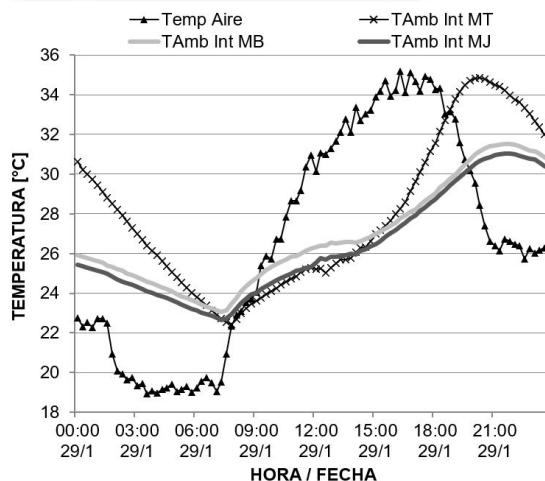


Figura 10. Diferencial hora a hora de temperatura ambiente interior. Fuente: elaboración propia

Para el período de verano, se determina una máxima reducción de 4.4 °C a las 7:45 pm para MJ (ver figura 10). Además, en la hora de máxima demanda se registra una reducción de 0.9 °C en MJ, lo que pone en evidencia los beneficios de la estrategia sobre la demanda de energía para alcanzar condiciones de confort en espacios interiores (ver figura 10). Al igual que en los casos de las variables analizadas previamente, las magnitudes halladas son superiores a las encontradas por KONTOLEON & EUMORFOPOULOU (2010), que fueron del orden de 0.5 °C (FVT en orientación este y en clima del tipo Cfb, oceánico templado verano suave).

Con relación a la temperatura ambiente interior, no se observan diferencias en el comportamiento de MB y MJ. Es decir, en el marco del estudio realizado, podría inferirse que la elección de la especie no

impacta sobre el resultado de la implementación de la estrategia en la temperatura ambiente interior. De acuerdo con este resultado, la elección de la especie está condicionada por otras variables vinculadas con los recursos climáticos y sus posibilidades de desarrollo en sistemas verticales, para garantizar cobertura y espesor.

4.5. Indicador global de las prestaciones del FVT

Con el objetivo de obtener un indicador global de las prestaciones de la tecnología, se estudia mediante un análisis Box-Plot el comportamiento diario y estacional del muro con FVT asociado a un día representativo del período monitoreado. Del mismo se desprenden las siguientes cuestiones:

- Respecto de la temperatura ambiente exterior mediata al FVT se observa que

Comportamiento térmico estacional de fachadas verdes conformadas por especies trepadoras perennes en muros máxicos orientados al oeste. Estudio de casos en zonas áridas

- En invierno, fundamentalmente en horario de enfriamiento de las edificaciones y la ciudad (considerado desde las 10:00 pm hasta las 10:00 am) la temperatura del aire de los espacios exteriores conexos a la FVT es siempre menor que la monitoreada en el muro testigo, con valores que oscilan entre $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el 95 % de los casos observados, con medias de $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ver figura 11 [a]). Un espacio conexo exterior con menor temperatura pone en evidencia que el muro pierde menor cantidad de energía, manifestando el efecto conservativo de la FVT en este período. Durante el período de calentamiento (desde las 10:00 am hasta las 10:00 pm) se observa un comportamiento similar, en el cual la temperatura del aire conexas a la FVT es menor $-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ como valor más frecuente, sin superar una disminución de $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el 95 % de los casos observados (ver figura 11 [b]). Respecto de estos resultados durante el período de

calentamiento, la FVT no tiene impacto sustancial sobre las temperaturas exteriores.

- En verano, en el período considerado de enfriamiento, se verifica el mismo comportamiento que en invierno, encontrándose la mayoría de los casos la temperatura cerca del muro $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ más fresca, lo que refuerza la idea del comportamiento conservativo del muro (ver figura 11 [c]). Durante el período de calentamiento, el comportamiento también es semejante al verificado en invierno; sin embargo, el impacto de la FVT es mayor. En verano la temperatura del aire exterior cercana a la FVT se registra hasta $-2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ más fresca en el 95 % de los casos, con valores más frecuentes que oscilan en los $-1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ver figura 11 [d]). Podríamos afirmar que la contribución de la tecnología a la disminución de la isla de calor y el calentamiento urbano tiene gran impacto en esta estación y durante el día.

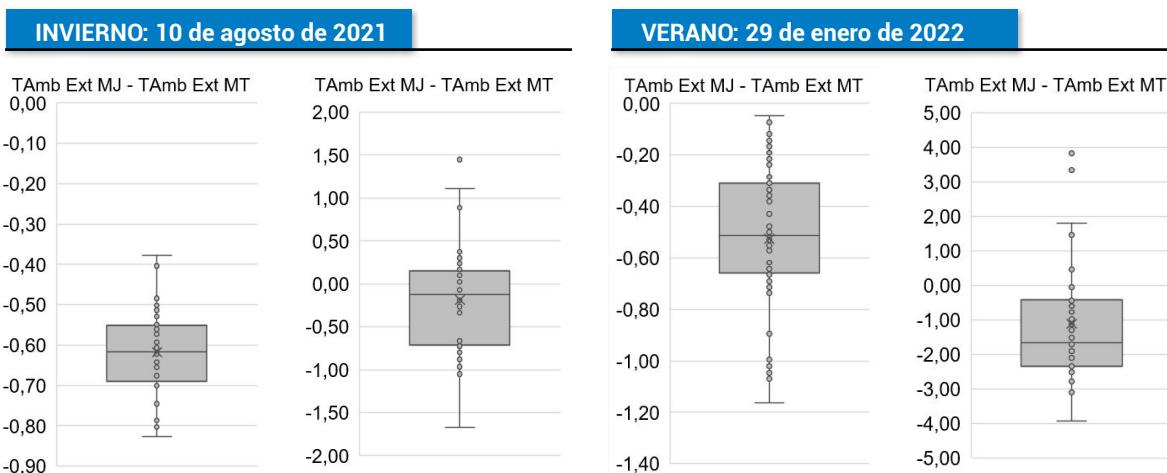


Figura 11. Análisis Box-Plot de la distribución diaria y estacional de la diferencia en la temperatura ambiente exterior mediata

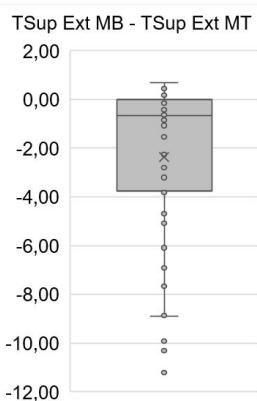
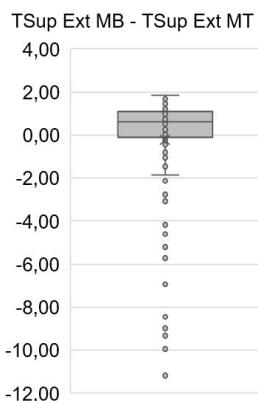
- Respecto de la temperatura superficial exterior de la FVT se observa que

- Durante el período de enfriamiento (10:00 pm - 10:00 am), tanto en invierno como en verano, la temperatura superficial del muro con FVT se encuentra más caliente que MT. En invierno, su temperatura superficial exterior es hasta 1.1 °C mayor en el 95 % de los casos observados, con medias en 0.6 °C y, en verano, su temperatura superficial es hasta 1.5 °C en el 95 % de los casos, con medias de 1 °C (ver figura 12 [a] y [c]). Comprobar que el muro con FVT está más caliente que el MT en horarios de enfriamiento pone en evidencia la conservación de la energía auxiliar necesaria, tanto para calefacción en invierno como para refrigeración en verano, puesto que cuando la cara exterior de un muro se encuentra a mayor temperatura, disminuye los

procesos de transferencia de calor desde el interior al exterior de la vivienda, ya que el salto térmico es el motor de este flujo de energía.

- Durante el período de calentamiento (10:00 am - 10:00 pm), tanto en invierno como en verano, la temperatura superficial del muro con FVT se encuentra más fría que MT. En invierno, su temperatura superficial exterior es hasta -3.8 °C menor en el 95 % de los casos observados, con medias en -0.7 °C y, en verano, su temperatura superficial es hasta -15.8 °C menor en el 95 % de los casos, con medias de -5 °C (ver figura 12 [b] y [d]). El hecho de que la cara exterior del muro con FVT se encuentre más fresca durante las horas del día es muy beneficioso para el verano, ya que posibilita disminuir la transferencia de calor desde el espacio exterior al interior de la vivienda y, consecuentemente,

INVIERNO: 10 de agosto de 2021



VERANO: 29 de enero de 2022

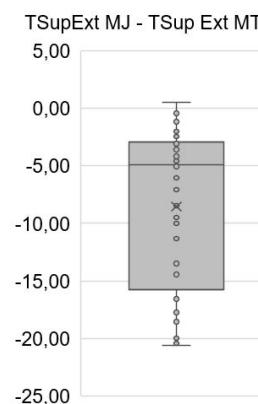
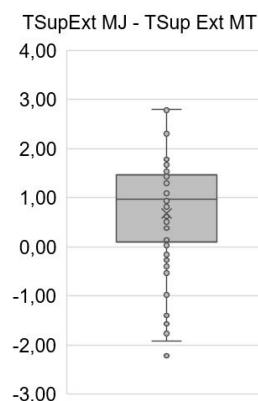


Figura 12. Análisis Box-Plot de la distribución diaria y estacional de la diferencia en la temperatura superficial exterior

Comportamiento térmico estacional de fachadas verdes conformadas por especies trepadoras perennes en muros mäsicos orientados al oeste. Estudio de casos en zonas áridas

disminuye el consumo de energía auxiliar para el acondicionamiento interior (refrigeración). Durante el invierno, este comportamiento puede verse como una penalidad, ya que el muro con FVT estaría ganando menor cantidad de energía que MT. Sin embargo, los principios de la arquitectura bioclimática establecen que la ganancia solar durante el invierno debe procurarse mediante aberturas acristaladas, ya que un muro mäsico sin aislar que gana calor durante el día lo pierde (y en mayor proporción) durante la noche.

- Respecto de la temperatura ambiente interior del muro con FVT se observa que

Para el análisis de invierno, no es posible mantener el criterio de período de enfriamiento y calentamiento. Esta dificultad deriva del hecho

de la menor disponibilidad solar en esta estación combinada con el efecto de la inercia propia del muro mäsico, que desfasan los procesos de enfriamiento y calentamiento del espacio interior respecto del comportamiento de la temperatura exterior, lo que no se verifica durante el verano debido a la mayor disponibilidad de radiación solar. Es por ello que se decidió hacer el análisis en dos franjas horarias (desde las 05:00 am hasta las 05:00 pm y desde las 05:00 pm hasta las 05:00 am), cuando se verifica una tendencia más definida en el comportamiento de las tecnologías evaluadas.

En el invierno, para el período de 05:00 pm a 05:00 am, los valores más frecuentes se ubican entre -0.9°C y -3.2°C , con un valor promedio de -2°C , donde MB se mantiene más frío (ver figura 13 [a]). Durante el período de 05:00 am a 05:00 pm, MB se mantiene

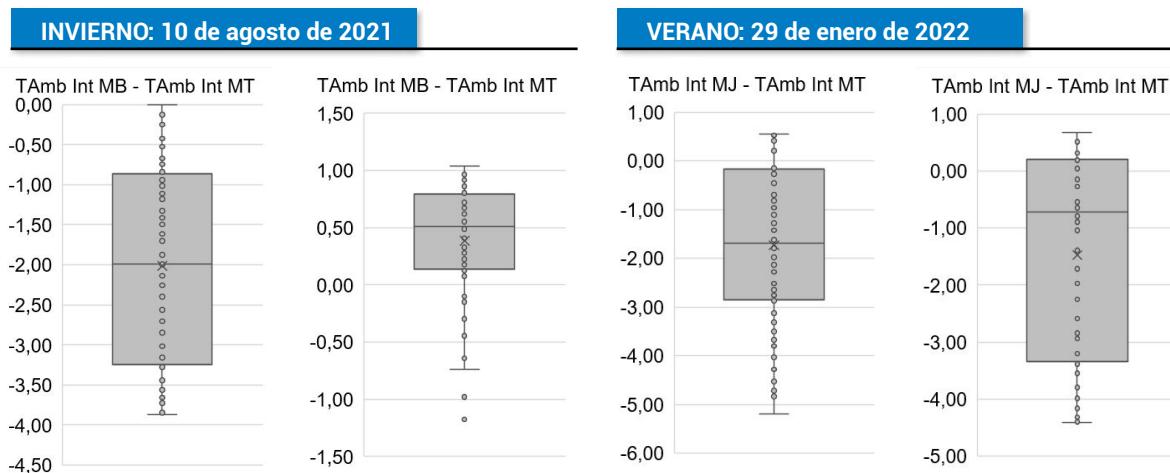


Figura 13. Análisis Box-Plot de la distribución diaria y estacional de la diferencia en la temperatura ambiente interior

mayoritariamente entre 0.1 °C y 0.8 °C más caliente, con un valor promedio de 0.5 °C (ver figura 13 [b]). Lo anterior pone de manifiesto el efecto conservativo en invierno para una FVT durante todas las horas del día. En verano, durante la mayoría de las horas de ambos períodos estudiados, MJ se encuentra más fresco que MT. Estos valores más frecuentes se ubican entre -0.2 °C y -2.9 °C, con un promedio de -1.7 °C, en las horas de enfriamiento, y entre 0.2 °C y -3.3 °C, con un promedio de -0.8 °C, en las horas de calentamiento (ver figura 13 [c] y [d]).

De los impactos observados en verano, por el uso de FVT, se desprende que el uso de la estrategia es más eficiente en climas áridos respecto de otros tipos de clima reportados en la bibliografía internacional. Esto se debe a que las FVT tienen mayor impacto en contextos climáticos con mayor disponibilidad de radiación solar; este concepto se verifica en los resultados obtenidos durante el verano.

Además, de lo discutido previamente, este trabajo contribuye a generar conocimiento respecto del impacto de las FVT en el entorno mediato y en las temperaturas superficiales interiores. Este trabajo demuestra que el uso de la estrategia genera beneficios en torno al acondicionamiento del espacio exterior mediato e influye en la temperatura superficial interior de los muros, lo que mejora las condiciones de confort en los espacios interiores tanto en invierno como en verano.

5. Conclusiones

El presente estudio evalúa experimentalmente la respuesta térmica estacional de dos FVT, conformadas por las especies perennes jazmín y

bignonia, en muros máxicos de orientación oeste y en climas de condición árida. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto el potencial de la estrategia para reducir temperaturas edilicias y urbanas en invierno y en verano, y que sus beneficios son mayores en climas áridos respecto de otros climas. En este sentido, el trabajo representa una contribución al estado del arte, de modo particular en lo que refiere al desempeño de las FVT en la estación fría, condición climática menos explorada en la literatura internacional.

La incorporación de estructuras vegetadas muestra beneficios térmicos que se ven reflejados a escala edilicia en la temperatura ambiente interior, incrementando la temperatura 0.8 °C a las 9:00 am en invierno, coincidente con el momento en que se produce la temperatura exterior más baja, y reduciendo la temperatura 4.4 °C a las 7:45 pm en verano, horario cercano a la ocurrencia de la máxima temperatura exterior. Lo expuesto indica que el efecto de las FVT en invierno está asociado con la propiedad de conservación térmica o aislamiento de las condiciones exteriores, y en verano al efecto de sombreado del muro. Finalmente, estos impactos en la edificación tienen relación con la disminución del consumo energético para el acondicionamiento térmico de los espacios interiores, tanto en invierno como en verano.

Los beneficios que las FVT tienen sobre espacios exteriores se observan en el análisis de la temperatura ambiente exterior mediata, porque las estructuras verdes se encuentran siempre más frescas, hasta 3.9 °C a las 5:30 pm en verano. Esta reducción de las temperaturas exteriores mediatas contribuye en verano a la mitigación del calentamiento urbano, la mejora de las condiciones de confort en espacios

Comportamiento térmico estacional de fachadas verdes conformadas por especies trepadoras perennes en muros máxicos orientados al oeste. Estudio de casos en zonas áridas

abiertos públicos y privados y su consecuente impacto en la disminución del consumo de energía para el acondicionamiento térmico de los espacios interiores.

Lo discutido previamente demuestra cómo una estrategia de mínima complejidad tecnológica y de simple implementación resulta efectiva, tanto en invierno como en verano, para mejorar el comportamiento térmico de las envolventes máxicas, contribuir a la eficiencia energética residencial y la disminución de temperaturas a escala urbana en ciudades de clima árido.

Los resultados obtenidos plantean nuevos interrogantes vinculados con la cuantificación de los beneficios de las FVT en condiciones reales: ¿son extrapolables los resultados encontrados mediante experimentación en ensayos controlados a condiciones reales de aplicación de la estrategia a envolventes urbano-edilicias? En este sentido, se prevé dar respuesta a este interrogante a partir de cuantificar, mediante procesos de simulación térmica ajustados, la incidencia de la aplicación de la estrategia a distintas tipologías urbano-edilicias.

Referencias bibliográficas

- Alexandri, E. & Jones, P.** (2008). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 43(4), 480-493. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.055>
- Bustami, R.; 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.; Taylor, J. & Emmett, M.** (2015). A Hedera green façade - Energy performance and saving under different maritime-temperate, winter weather conditions. *Building and Environment*, 92, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.011>
- Castellanos, E. J. et al.** (2022). IPCC WGII Sixth Assessment Report. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1-181. https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_Chapter12.pdf
- Coma, J.; Pérez, G.; Gracia, A.; Burés, S.; Urrestarazu, M. & Cabeza, L.** (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>
- Convertino, F.; Blanco, I; Vox, G. & Schettini, E.** (2022). Thermal Behaviour Of Green Façades in Winter Climatic Conditions. *International Journal of Environmental Impacts: Management, Mitigation and Recovery*, 5(1), 38-50. <https://doi.org/10.2495/ei-v5-n1-38-50>

- Djedjig, R.; Belarbi, R. & Bozonnet, E.** (2017). Experimental study of green walls impacts on buildings in summer and winter under an oceanic climate. *Energy and Buildings*, 150, 403-411. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.032>
- Gill, S.; Handley, J.; Ennos, A. & 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>
- González, L. & González, J.** (2019). Living green infrastructures: Typological characteristics, benefits and implementation. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 12(23). <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cvu12-23.ivvc>
- 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. & Eumorfopoulou, E.** (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>
- Othman, A. & 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>
- Ottelé, M. & Perini, K.** (2017). Comparative experimental approach to investigate the thermal behaviour of vertical greened façades of buildings. *Ecological Engineering*, 108(September), 152-161. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.016>
- Suárez, P.; Cantón, M. & Correa, E.** (2018). Impacto de sistemas de enverdecimiento vertical en el comportamiento termo-energético de espacios urbano edilicios. Análisis crítico del estado del arte. *Acta de la XLI Reunión de Trabajo de La Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, 6(1), 83-94.
- Pérez, G.; Coma, J.; Sol, S. & Cabeza, L.** (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.; Figueiredo Neves, G.; Arthur Vecchia, F. & Figueiredo Roriz, V.** (2018). Thermal Response to cold in buildings with Green covers for tropical climate. Green facades and green roofs. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(1), 15-28. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732018000100015>
- Stocco, S.; Cantón, M. & Correa, E.** (2017). Espacios verdes en ciudades de zona árida diagnóstico de la situación actual de plazas de la ciudad de Mendoza, Argentina. *Cuaderno Urbano* 23(23), 61-84. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.30972/crn.23232689>

Comportamiento térmico estacional de fachadas verdes conformadas por especies trepadoras perennes en muros mäsicos orientados al oeste. Estudio de casos en zonas áridas

- Šuklje, T.; Medved, S.; 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.; Stephens, B.** (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>
- Vox, G.; Blanco, I. & Schettini, E.** (2018). Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment*, 129 (september 2017), 154-166. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.002>
- Wong, N.; Yong Kwang Tan, A.; Yok Tan, P.; Chiang, K.; Wong, N.** (2010). Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 45(2), 411-420. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.017>
- Zhang, L.; Deng, Z.; Liang, L.; Zhang, Y.; Meng, Q.; Wang, J. & Mattheos, S.** (2019). Thermal behavior of a vertical green facade and its impact on the indoor and outdoor thermal environment. *Energy & Buildings* 204. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109502>

