

SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA COMO ESTRATEGIA DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA EN VIVIENDAS MÁSICAS. SISTEMAS DE ENVERDECIMIENTO VERTICAL

Pablo Suárez^{1,2}, Claudia Martínez^{1,3}, Érica Correa^{1,3}

¹ Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) Centro Científico Tecnológico Mendoza. C. P. 5500 – Mendoza.

Teléfono +54 261-5244050 e-mail: psuarez@mendoza-conicet.gob.ar

² Facultad de Ambiente Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Congreso. Mendoza Argentina.

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza Argentina.

RESUMEN: La estrategia de conservación de energía más usada en arquitectura es la incorporación de aislantes tradicionales a los paquetes constructivos. Los Sistemas de Enverdecimiento Vertical (SEV) constituyen una alternativa basada en la naturaleza, que contribuyen a recuperar los ecosistemas degradados. Esta investigación evalúa la eficiencia de las Fachadas Verdes Tradicionales (FVT) para reducir consumos energéticos en verano de una vivienda unifamiliar en planta baja y perímetro expuesto en el Área Metropolitana de Mendoza, y comparar su prestación con el de una tecnología de aislación tradicional (Poliestireno Expandido-EPS). Metodológicamente se estructura en tres etapas: caracterización de las propiedades opto-térmicas de las FVT, determinación del ahorro energético asociado a su implementación, mediante simulación térmica con EnergyPlus™, y la contrastación de los resultados alcanzados con los derivados del uso de EPS. Se observa que aislar la totalidad de los muros exteriores de un ambiente con FVT y EPS, genera ahorro energético en días estivales con temperaturas promedio hasta 59.8 % y 92.2 % respectivamente. Se identifica que las posibilidades de ahorro energético que ofrece la FVT dependen de la magnitud de las temperaturas exteriores y que su uso es más efectivo en climas áridos con altos niveles de irradiancia solar y cielos despejados.

Palabras clave: sistemas de enverdecimiento vertical, ahorro de energía, arquitectura sustentable, desarrollo sostenible, simulación térmica, fachadas verdes.

INTRODUCCIÓN

Las ciudades de América Latina y el Caribe poseen una población urbana residencial del 81%, esto implica una alta vulnerabilidad a los efectos del calentamiento global y el riesgo frente a eventos climáticos de calor extremo pronosticados por el IPCC (2022). Para restablecer el equilibrio entre entorno natural y hábitat construido, y mitigar las emisiones de carbono, es necesario adoptar tecnologías que promuevan una urbanización sostenible y tiendan a la transición energética hacia energías renovables. En este sentido los sistemas basados en la naturaleza, entre los que se encuentran los Sistemas de Enverdecimiento Vertical (SEV), constituyen una alternativa natural a la estrategia de conservación térmica con aislantes tradicionales. Los SEV han mostrado un crecimiento sostenido en su estudio y utilización en los últimos años (Bustami et al., 2018; Suárez et al., 2024).

En Argentina, existen en el mercado diversas opciones de aislamiento térmico para construcciones, siendo el poliestireno expandido el más comúnmente utilizado por su bajo costo. Se ha demostrado su eficiencia térmica y efectividad de aislación ante diversas condiciones climáticas (Khoukhi, 2019). Sin embargo, el análisis de ciclo de vida de este aislante artificial muestra que son intensivos en emisiones contaminantes a la atmósfera (Y. S. Lim, 2021). Además, su aplicación en climas áridos con altas amplitudes térmicas trae aparejado el problema del sobrecalentamiento durante días cálidos en verano



y estaciones intermedias. Esto se produce porque la baja conductividad de estos materiales evita el refrescamiento nocturno de la masa de la envolvente elevando la temperatura de aire interior promedio diaria de los ambientes habitables.

Dentro de las nuevas tecnologías basadas en la naturaleza, las Fachadas Verdes Tradicionales (FVT) están compuestas por plantas trepadoras que se adosan a la pared del edificio sin espacio de separación entre ésta y el follaje. Los beneficios térmicos de las tipologías de FV son el sombreado y el enfriamiento por evapotranspiración, siendo el primero el que tiene mayor relevancia en el potencial para la mitigación de la isla de calor urbana y el ahorro de energía en edificios (Pérez et. al., 2017). Esto es importante para ciudades en contexto de aridez, por la alta incidencia de radiación solar sobre la envolvente arquitectónica y por presentar elevadas temperaturas de aire en verano. Esto se demuestra en Djedjig et. al. (2015) donde informan magnitudes de ahorro entre 37.3 % y 50.6 % para un edificio educacional de tres pisos con las fachadas Este y Oeste protegidas con FVT para dos tipos de clima: oceánico (Cfb) y semiárido cálido (Bsh). Además, a diferencia de los aislantes tradicionales, el uso de plantas en los edificios tiene una efectividad en la captura de CO₂ de hasta 28.2 Kg/m² por año (Jozay, 2024).

El Área Metropolitana de Mendoza (AMM) donde se localiza esta investigación, se emplaza en el centro Oeste de la República Argentina (32.5° Latitud Sur, 68.5° Longitud Oeste). Su clima es árido-desértico -Bwk, Köppen-Geiger clasificación climática-. Se caracteriza por veranos calientes e inviernos fríos, con elevados valores de amplitud térmica diaria y estacional. Su microclima presenta altos niveles de irradiación solar -principalmente en los planos orientados al este y al oeste-, bajas velocidades de viento y escasas precipitaciones. Como consecuencia, la magnitud de su Isla de Calor alcanza los 10 °C, lo que aumenta un 20% la demanda de energía auxiliar para refrigeración (Correa et. al., 2012).

En el AMM se distinguen dos áreas de desarrollo, el casco urbano consolidado donde se concentran las principales actividades económicas, comerciales y de servicios; y la periferia de la ciudad, donde domina el uso residencial. La tipología de vivienda unifamiliar representa el 98% de las edificaciones destinadas a este uso, siendo la vivienda colectiva -bloques o torres- una tipología marginal (Pujol & Bisbalgrandal, 2019). En términos de materialidad, el sistema constructivo es del tipo másico y de producción local, conformado por tabiques de ladrillo cocido y estructura de hormigón armado. Una estrategia ampliamente difundida para mejorar la aislación térmica de esta tecnología constructiva es la aplicación de dos capas exteriores a la mampostería: una capa de aislante de poliestireno expandido -EPS- protegido exteriormente con otra capa de mortero, cuyos espesores oscilan entre 3-5cm y entre 2- 3cm, respectivamente (Esteves et. al., 2009; Mazzocco et. al., 2018).

Objetivo del trabajo

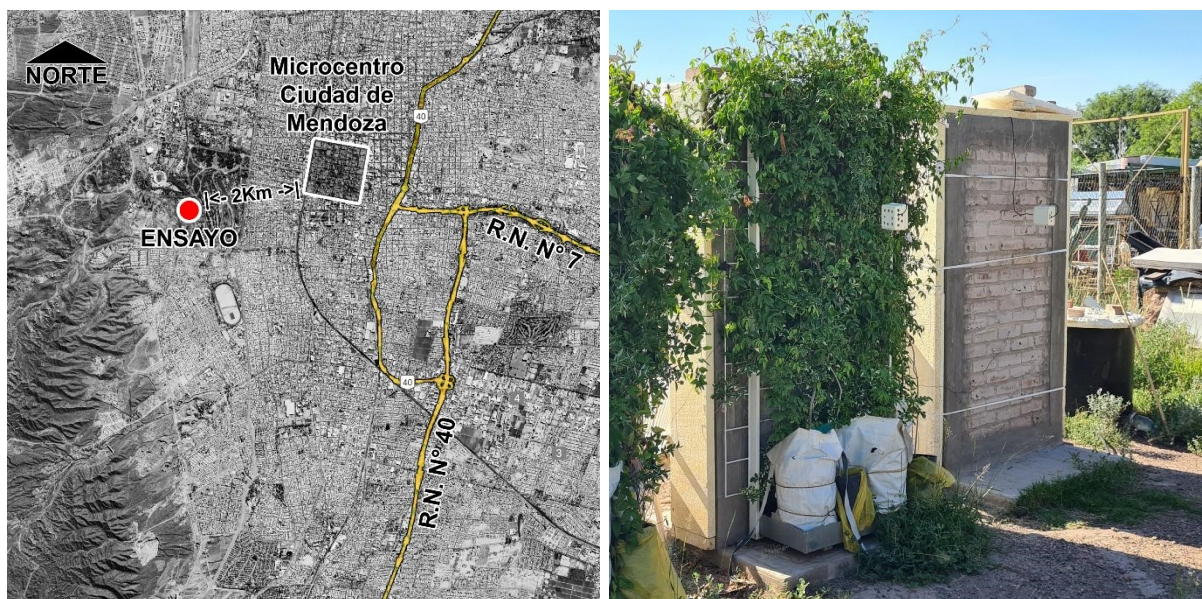
El objetivo de este trabajo es determinar la magnitud de la incidencia del uso de FVT sobre la demanda de energía de una vivienda másica representativa de la tipología residencial más frecuente en el área metropolitana de Mendoza en la estación estival. Se busca comparar la prestación de la FVT como estrategia de conservación versus la de una estrategia tradicionalmente utilizada como es el uso de aislantes térmicos.

METODOLOGÍA

El estudio se estructura en tres instancias metodológicas. La primera busca establecer el conjunto de propiedades ópticas y térmicas que representan el comportamiento de una FVT a fin de insertar este modelo en el software de simulación EnergyPlusTM. Para ello se lleva a cabo una medición, simulación y ajuste de un ensayo experimental en condiciones controladas a fin de integrar la FVT a los modelos de simulación dinámica de comportamiento térmico de edificios. La segunda instancia persigue identificar, monitorear y simular un caso de la tipología residencial representativa del área de estudio -vivienda unifamiliar en contexto de baja densidad- para, posteriormente evaluar los beneficios termoenergético de la implementación de la FVT. Finalmente, la tercera instancia tiene por objetivo identificar el ahorro energético asociado al uso de las FVT en verano, comparando además su desempeño con el de un aislante tradicional utilizado en el medio local, el poliestireno expandido -EPS-.

Desarrollo de un procedimiento para la determinación de las propiedades de la FVT

Para determinar el conjunto de propiedades ópticas y térmicas que representan el comportamiento de una FVT, a fin de insertar la tecnología en el software de simulación, se midió y ajustó un ensayo experimental en condiciones controladas durante el verano 2022. El mismo se ubica en el área experimental del CCT CONICET, situado a 2 kilómetros al oeste del microcentro de Mendoza, Argentina. Ver Fig. 1 (a). Comprende dos muros de mampostería orientados al Oeste (orientación más desfavorable en verano), aislado en el resto de sus caras para conformar una cámara de aire interior. El primer muro está cubierto con una FVT -Pandorea jazminoides “bignonia blanca”- (MB) que reportó mejor comportamiento entre las especies trepadoras evaluadas (Suárez, 2024). El otro muro se encuentra sin cobertura vegetal y se denomina muro testigo (MT). Ver Fig. 1 (b). La especie trepadora fue seleccionada en función de su adaptación al clima local, el desarrollo de una cobertura foliar próxima al 90% y un valor de espesor vegetal promedio de 0,27 m (Suárez et. al., 2023).



a- Ubicación del ensayo en el AMM *b- Ensayo experimental*
Figura 1: a- Ubicación del ensayo experimental; b- Ensayo experimental. Fuente: elaboración propia.

Los muros fueron monitoreados durante febrero de 2022 en 4 días de análisis representativos del clima local (cálidos y con cielo despejado). Los sensores utilizados se colocaron a alturas de 1,30 m de altura en la cámara aire y a 1,60 m de altura en el espacio exterior. Las dimensiones del ensayo están en el rango de medidas observadas en modelos experimentales similares reportados en la bibliografía internacional (Coma et al., 2017; Vox et. al, 2018; Zhang et al., 2022). Los detalles del monitoreo y el ajuste se detallan en Suarez (2024).

Se realiza una modelización térmica mediante el software EnergyPlus™ para ajustar la curva de los valores de temperatura del aire interior resultante de la simulación a los valores monitoreados en los boxes de ensayo. Este procedimiento se divide en dos etapas, la primera consiste en el ajuste del muro de mampostería -MT- en el cual apoyará la vegetación, con el objetivo de caracterizar las propiedades opto-térmicas reales de los muros construidos como soporte de la FVT. Y una segunda etapa donde se cargan las propiedades obtenidas del ajuste del muro testigo y se ajusta la curva de temperatura interior del muro con la FVT -MB- mediante simulación. Las propiedades de la FVT cargadas en el simulador y resultantes del proceso experimental de ajuste son semejantes a una capa exterior aislante al paquete constructivo del muro de mampostería, entre las más relevantes se encuentra: espesor 0.03m, densidad 1000 Kg/m², conductividad 1 W/m²K y calor específico 2000 J/Kg²K y un valor de transmitancia solar de 0.34.

Monitoreo y ajuste de la tipología residencial

Se establecen dos criterios de selección de caso para asegurar representatividad dentro del ámbito residencial en el AMM. El primero identifica el entorno urbano que tenga un mayor desarrollo en la última década. Esto se refleja en el área de baja densidad constructiva ($< 2m^3/m^2$) que se ubica en la periferia de la ciudad. El segundo criterio considera la tipología edilicia con mayor presencia en la trama urbana, que es la de vivienda en un nivel con perímetro expuesto y posibilidades de incorporación de la estrategia de FVT. Por tanto, el caso de estudio seleccionado corresponde a una vivienda unifamiliar de sistema constructivo másico en planta baja, de perímetro expuesto y que ofrece posibilidades viables para la incorporación de la estrategia de FVT.

Para asegurar la validez de los resultados, el modelo de simulación sin la aplicación de estrategias fue ajustado contrastando la curva de temperatura del aire interior medida, con la obtenida mediante simulación. Los valores analizados corresponden a los resultados registrados en un espacio de la tipología -zona térmica-.

Luego de ajustar la vivienda con los datos cargados en el simulador, se evalúa sobre este modelo, y mediante EnergyPlus™, el impacto termo-energético de la aplicación de FVT y EPS en la envolvente. La vivienda se localiza a 18 km del microcentro de la ciudad, hacia la periferia urbana $-33^{\circ}1'48.03''S$, $68^{\circ}54'20.84''O$ -. Su microclima muestra una elevada amplitud térmica, máximas y mínimas temperaturas más moderadas que en áreas centrales del AMM donde se encuentra la mayor densidad poblacional. Ver Fig. 2 (a). La edificación analizada presenta las caras Norte y Oeste con plena exposición solar y las caras Sur y Este en sombra debido a la incidencia de la vegetación colindante. Ver Fig. 2 (b).

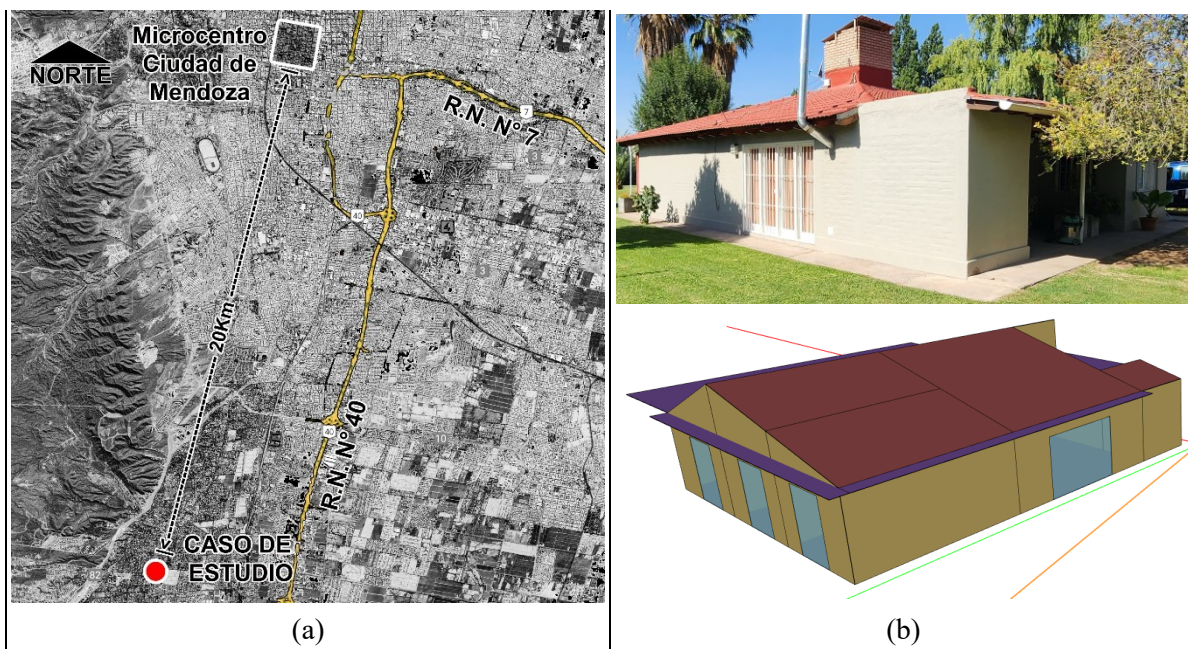


Figura 2: Ubicación (a) y Tipología de vivienda unifamiliar másica de perímetro expuesto (b).

La vivienda se monitorea durante 4 días del mes de febrero (verano) -13/02/23 al 16/02/23-. Las variables medidas son temperatura y radiación solar en el espacio exterior; y en el interior del ambiente interior estudiado. Esta zona térmica ajustada, en la cual se realizan las simulaciones, corresponden al DORMITORIO 1. Considerando que en términos de materialidad la casa muestra los mismos paquetes constructivos para pisos, muros y techos, la elección de este ambiente está asociada a su condición térmica más demandante frente al resto de los ambientes. Primeramente, porque es el espacio con mayor proporción de muro orientado al Oeste respecto a su volumen de aire interior y en segundo lugar, por ser el ambiente con mayor superficie de envolvente expuesta al exterior y a la radiación solar -cubierta, muro Norte y muro Oeste-. Dada esta condición, es esperable que la aplicación de estrategias

conservativas en la cara externa de la envolvente del espacio propuesto muestre las mayores magnitudes de ahorro energético. Ver Fig. 3 (a).

Los datos se registran cada 15 minutos. Los sensores utilizados son del tipo termistor -HOBO Onset, MX2201- (colocado a 1,60 m de altura en el interior de la vivienda) y estación meteorológica del tipo U30 USB Weather Station (ubicada en un espacio de plena exposición solar en el patio de la misma). Ver Fig. 3 (b).

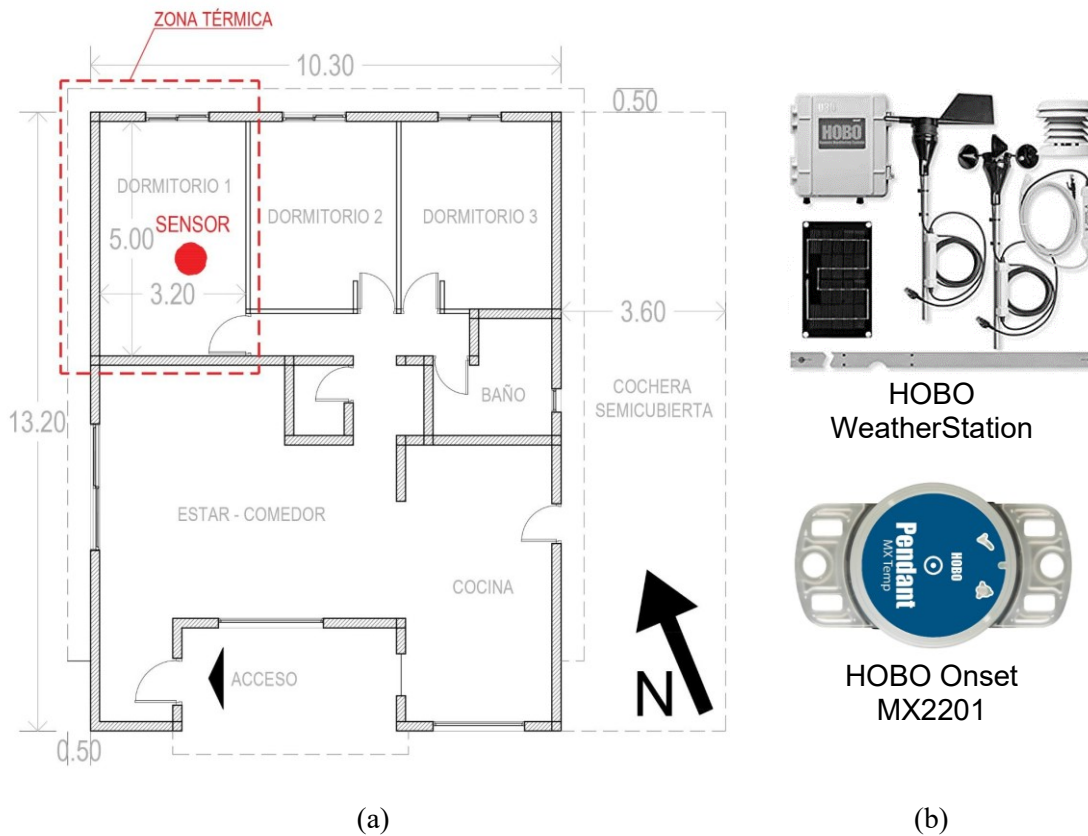


Figura 3: Zona térmica evaluada (a) y equipamiento utilizado (b).

Como puede observarse a continuación, los días seleccionados y medidos en el entorno microclimático, son representativos de días cálidos y con cielo claro en verano para el AMM. Ver Fig. 4.

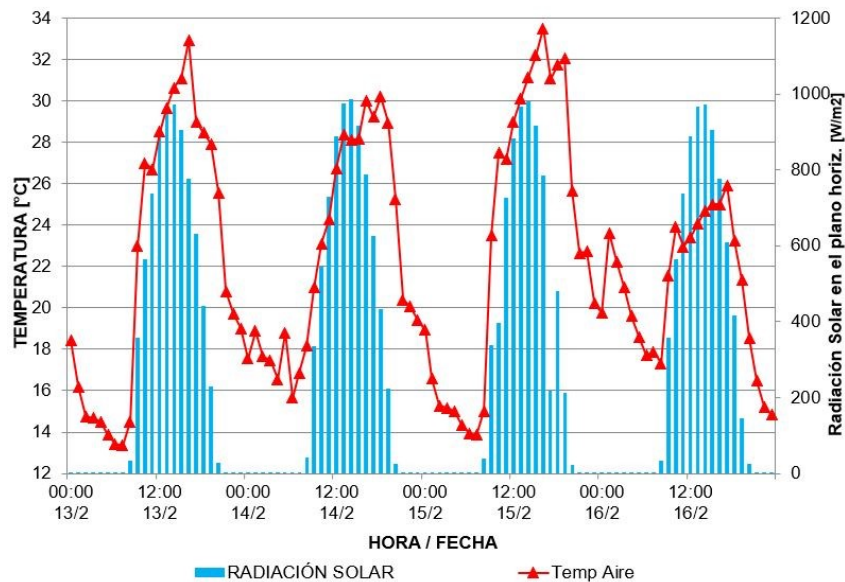


Figura 4: Curvas correspondiente temperatura y radiación solar en el período monitoreado.

Determinación del impacto energético asociado al uso de las FVT en verano

Se programa la temperatura de termostato del simulador en 24°C , temperatura de confort sugerida para determinar los consumos de energía en refrigeración para el verano. Posteriormente, se corren simulaciones tanto con FVT como con EPS aplicados en toda la envolvente edilicia, con el objeto de identificar magnitudes de reducción de consumo energético en distintos escenarios de temperatura ambiente exterior.

Se plantean tres escenarios distintos correspondientes a días diferentes dentro del archivo climático -epw-: a) un día que registra altas temperaturas de verano correspondiente al TMY 2003-2017, 11 de enero; b) un día que reporta temperaturas medias correspondientes a la estación de verano del TMY 2003-2017, 16 de enero; c) un día de verano configurado a partir de los datos microclimáticos monitoreados en los alrededores de la vivienda, 14 de febrero. El primero representa las temperaturas máximas registradas en el AMM; el segundo las temperaturas promedio históricas; y el tercero variables medidas en el microclima local. Al incorporar los dos primeros se obtienen resultados representativos de dos días de verano característicos de la última década, uno con mayor demanda energética (más cálido) y el otro, de mayor ocurrencia. Y el último, permite obtener resultados que reflejan la respuesta de las estrategias en condiciones del entorno microclimático actual. Ver Fig. 5.

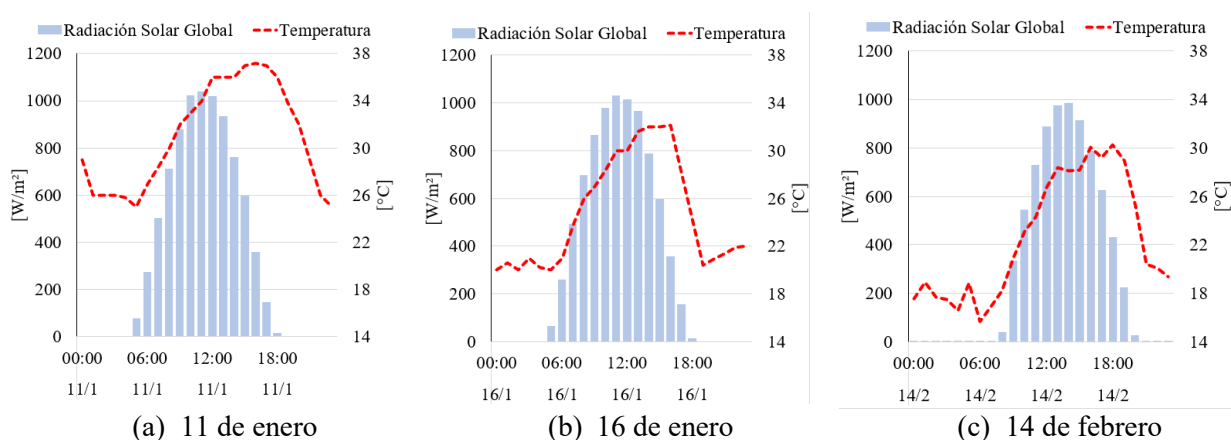


Figura 5: Temperatura y la radiación solar global durante los días de análisis. (a) 11 de enero; (b) 16 de enero, (c) 14 de febrero.

Los valores de temperatura máximos y mínimos de los días analizados se muestran en la Tabla 1, en comparación con datos de temperaturas máximas y promedio históricas registrados por el SMN para el área de estudio (Estadísticas climatológicas 1991-2020).

Tabla 1: característica de los días de análisis y datos del SMN

	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máxima media (SMN)	Temp. mínima media (SMN)	Temp. máxima extrema (SMN)
Altas temperaturas: 11/01	37.2	25.0			
Temperaturas promedio: 16/01	32.1	20.0	30.7	18.3	40.2
Temperatura microclima: 14/02	30.2	15.7			

RESULTADOS

Los resultados del ajuste y simulación de los muros de ensayo en condiciones controladas, y la medición, ajuste y simulación de la tipología edilicia residencial elegida, se organiza en tres etapas:

- Determinación de las propiedades ópticas y térmicas representativas del comportamiento de la FVT en el modelo experimental, simuladas en el software EnergyPlus™.
- Ajuste y validación del modelo térmico de vivienda másica en planta baja de perímetro expuesto.
- Análisis del ahorro energético estival derivado del uso de dos tecnologías en la envolvente; FVT y EPS.

Determinación de las propiedades opto-térmicas que caracterizan la FVT

Se construye en el software EnergyPlus™ un modelo representativo de las características ópticas y térmicas de la FVT con la especie trepadora que reportó mejor desempeño térmico y vegetativo (espesor y cobertura) durante el verano 2022 (Pandorea jasminoides “bigonia blanca”) -MB- en el ensayo en condiciones controladas. Posteriormente, el modelo ajustado indicado en forma previa se utiliza para caracterizar el funcionamiento de la FVT -MB- durante el verano y para los cuatro días analizados. Ver Fig. 6. En el ajuste final del muro con cobertura de FVT, los resultados de la temperatura ambiente interior en la cámara de aire simulada contrastada con la medida muestra un Coeficiente R2 de 0.98.

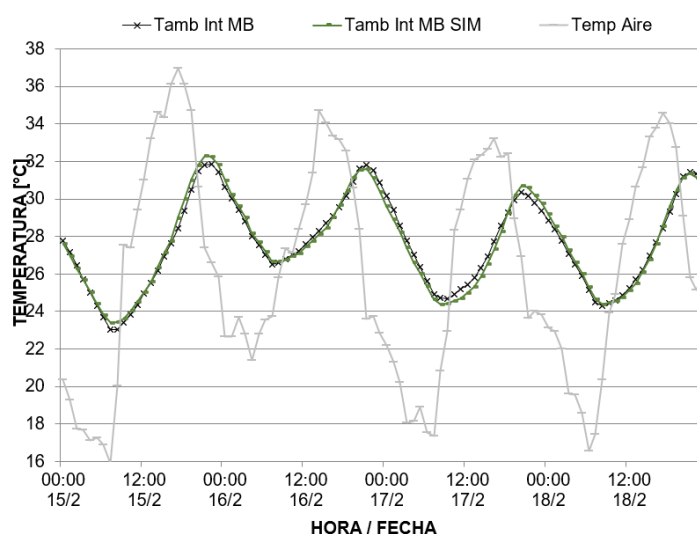


Figura 6: Temperatura medida (Tamb MB) y Temperatura simulada (Tamb MB SIM) en la cámara de aire.

A continuación, las propiedades opto-térmicas de la FVT ajustadas mediante simulación se extrapolan a la tipología de vivienda en estudio.

Caso de estudio: Ajuste y validación del modelo térmico

Este modelo se valida mediante mediciones higro-térmicas in situ en el interior de la vivienda y su posterior ajuste, específicamente en un dormitorio inhabitado con orientación Norte y Oeste. Los resultados muestran un R2 de 0.97. Ver Fig. 7.

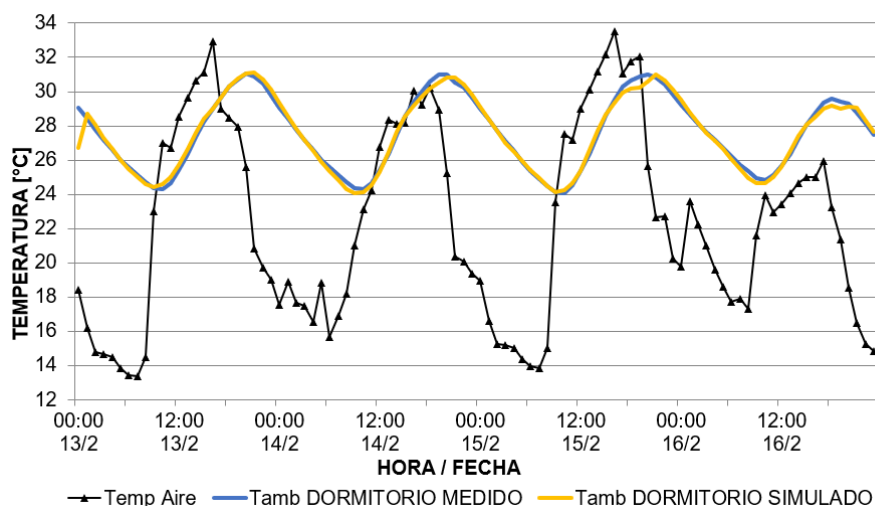


Figura 7: temperatura ambiente interior simulada contrastada con la medida

El paquete constructivo de la envolvente vertical de la vivienda es del tipo másico con muros de ladrillo, que es la tecnología constructiva de mayor difusión en el país. Esta tecnología es adecuada al clima de localización de la vivienda dado que ofrece la ventaja de la masa térmica cuya inercia permite amortiguar las oscilaciones de temperatura día/noche características de la región. Esto contribuye a disminuir la amplitud térmica interior de la vivienda y mejora las condiciones de confort interior aprovechando los beneficios de la acumulación térmica como mecanismo de acondicionamiento bioclimático de la misma. Sumado, esta tecnología ofrece posibilidades de mejorar su desempeño térmico mediante aislación exterior, ya sea mediante la aplicación de los aislantes tradicionales o las nuevas tecnologías de enverdecimiento vertical, oportunidad que no ofrecen las tecnologías livianas de construcción de viviendas. Por todo lo expuesto se considera que el caso es representativo y su elección es oportuna para verificar los beneficios que ofrecen las FVT. Se especifican las propiedades másicas de los materiales de construcción empleados en el modelo de simulación en la Tabla 2.

Tabla 2: características másicas de los materiales empleados en EnergyPlusTM

Capa	Rugosidad	Espesor [m]	Conductividad [W/m ² K]	Densidad [kg/m ³]	Calor específico [J/Kg ^o K]	Absortancia solar
MURO -EXT-						
Revoque ext.	Liso	0.02	1.16	1900	1000	0.8
Ladrillón	Liso	0.18	1.5	1800	800	0.85
Revoque int.	Liso	0.02	1.16	1900	1000	0.8
MURO -INT-						
Revoque	Liso	0.02	1.16	1900	1000	0.8
Ladrillón	Liso	0.18	1.5	1800	800	0.85
Revoque	Liso	0.02	1.16	1900	1000	0.8
TECHO						
Teja cerámica	Rugoso	0.02	0.7	1650	920	0.8
Lana vidrio	Liso	0.01	0.041	100	750	0.7

Machimbre	Liso	0.025	0.13	600	1380	0.7
PISO						
Contrapiso	Rugoso	0.12	1.63	2400	1050	0.6

Máximo ahorro energético asociado a la aplicación de FVT versus un aislante tradicional -EPS-.

Los datos obtenidos de las simulaciones muestran que, para el día correspondiente a las temperaturas máximas de verano, la aplicación de la FVT de 27 cm de espesor en toda la envolvente permite alcanzar reducciones del consumo energético del orden de 18.0 % mientras que la aplicación de EPS de 5 cm de espesor posibilita un ahorro del 53.7 %. Ver Tabla 3.

Para el día correspondiente a las temperaturas promedio de verano; la aplicación de la FVT de 27 cm de espesor en toda la envolvente permite alcanzar reducciones del consumo energético del orden de 28.5 % mientras que la aplicación de EPS de 5 cm de espesor posibilita un ahorro del 58.6 %. Ver Tabla 3.

Tabla 3: Caso Vivienda Individual - Aplicación FVT y EPS en todas las fachadas.

	Período de alta temperatura -11 de enero-		Período de temperatura media -16 de enero-	
	Consumo enfriam. [kW/día]	Reducción respecto caso base [%]	Consumo enfriam. [kW/día]	Reducción respecto caso base [%]
Caso base	17.6	---	8.7	---
Caso con FVT -toda la envolvente-	14.4	18.2	6.2	28.7
Caso con EPS -toda la envolvente-	8.2	53.4	3.6	58.6

Las diferencias observadas muestran que la aislación con EPS ofrece mejor desempeño que la aplicación de FVT. Sin embargo, la tipología de vivienda analizada presenta características que benefician las prestaciones del aislante por sobre las del FVT. Entre ellas, se identifican: presencia de grandes aberturas acristaladas de vidrio simple y baja estanqueidad. Esto favorece el enfriamiento nocturno del espacio, lo que beneficia la prestación del aislante en el análisis global. Se conoce que durante el enfriamiento la aplicación del aislante retarda el enfriamiento del espacio. Esto no puede apreciarse en el caso analizado dado sus características constructivas.

Por otro lado, la presencia de aleros sombrea los muros limitando la intercepción de la radiación solar de la FVT. De esta forma las ganancias por calor conductivo a través de los muros toman mayor relevancia en el balance energético que las ganancias por calor radiante, beneficiando a la estrategia de aplicación de EPS.

En términos de calidad energética, la construcción presenta aislación térmica insuficiente en toda la envolvente, con su consecuente impacto en el confort interior. Puntualmente, la aislación térmica en la envolvente horizontal -lana de vidrio- muestra un deterioro avanzado, producto de la reiterada infiltración de agua de lluvia. Esto impacta negativamente en el potencial de mejora en el ahorro de energía que puedan generar aquellas estrategias que se aplican sobre las envolventes verticales, como son las FVT.

Es por ello que se decide mejorarla para los próximos análisis con 5 cm de EPS. De esta forma, la aplicación de FVT o EPS en la totalidad de los muros verticales expuestos eleva los valores de ahorro, los cuales ascienden a 26.4 % para la implementación de la FVT, mientras que se registra un valor de 81.8 % para el caso de EPS durante el día de temperaturas elevadas. Mientras que los valores registrados durante el día de temperaturas promedio son de 49.3 % para la FVT y de 93.8 % para el caso de EPS . Ver Tabla 4.

Tabla 4: Caso Vivienda Individual - Aplicación FVT y EPS en todas las fachadas.

	Período de alta temperatura -11 de enero-		Período de temperatura media -16 de enero-	
	Consumo enfriam. [kW/día]	Reducción respecto caso base [%]	Consumo enfriam. [kW/día]	Reducción respecto caso base [%]
Caso base con envolvente mejorada	11.9	---	4.5	---
Caso con FVT -toda la envolvente-	8.7	26.4	2.2	49.3
Caso con EPS -toda la envolvente-	2.2	81.8	0.3	93.8

Finalmente, se evalúa el ahorro energético bajo un escenario climático construido a partir de los datos microclimáticos monitoreados en febrero de 2023, y sobre el caso de la vivienda con envolvente horizontal optimizada. Dentro de este período, se elige un día con temperaturas promedio representativas del área de estudio: 14 de febrero. Cuando se contrastan estos resultados de simulación a los obtenidos en un día de temperaturas promedio con el EPW correspondiente al TMY Aeropuerto (2003-2017), se observa que la eficiencia de la implementación de la FVT aumenta alrededor de un 20 % para la condición microclimática real del sitio de implantación. Ver Tabla 5. Esto evidencia la importancia de considerar el impacto del microclima local.

Tabla 5: Caso Vivienda Individual - Aplicación FVT y EPS en todas las fachadas medido en un día típico del microclima local.

	Período de temperatura media (EPW local) -14 de febrero-	
	Consumo enfriam. [kW/día]	Reducción respecto caso base [%]
Caso base con envolvente mejorada	6.7	---
Caso con FVT -toda la envolvente-	2.7	59.8
Caso con EPS -toda la envolvente-	0.6	92.2

A modo de resumen, en la Tabla 6 se presentan los resultados máximos de ahorro por estrategia y para cada condición climática evaluada. Se observa claramente como trabajar con datos del microclima del entorno mejora las posibilidades de ahorro energético asociadas al uso de la estrategia de enverdecimiento.

Tabla 5: Tabla resumen de magnitudes máximas halladas por estrategia.

	Reducción de consumo	
	FVT [%]	EPS [%]
Día extremo (EPW)	26.4	81.8
Día promedio (EPW)	49.3	93.8
Día microclima (14/02)	59.8	92.2

Los resultados obtenidos son representativos de la aplicación de FVT, con una especie trepadora determinada, en viviendas de construcción másica en climas cálidos-secos, por lo que futuras

investigaciones podrían explorar el desempeño de la estrategia en otras tipologías, contextos climáticos y con la evaluación de diversas especies vegetales.

CONCLUSIONES

Esta investigación persigue determinar el impacto del uso de FVT sobre la demanda estival de energía para climatización de una tipología de vivienda másica representativa del área de estudio, y compara sus prestaciones con el uso de un aislante tradicional (EPS). Para ello se elabora un modelo simplificado en EnergyPlusTM que representa las características ópticas y térmicas de una FVT con *Pandorea jazminoides*. Posteriormente, estas propiedades opto-térmicas se incorporaron a la simulación del caso de estudio.

Cuando se contrastan los resultados de simulación obtenidos con el EPW correspondiente al TMY Aeropuerto (2003-2017) versus el EPW construido con los datos microclimáticos monitoreados en el entorno de la vivienda evaluada, se observa que la eficiencia de la implementación de la FVT aumenta hasta 20 %. Esto pone de manifiesto la importancia de trabajar considerando el impacto del microclima local.

El ahorro energético del uso de FVT representa el 35% del que ofrece usar EPS en verano y con altas temperaturas; y representa el 50% para el caso de temperaturas promedio. Si los datos climáticos utilizados en el simulador provienen de mediciones in-situ, este porcentaje asciende al 65%. Sin embargo, cabe señalar que el enverdecimiento genera beneficios ecosistémicos y disminuye la huella de carbono a diferencia de los aislantes artificiales tradicionales.

Se verifica que la prestación de la tecnología respecto del ahorro energético para verano es mayor en días cálidos de temperatura promedio y desciende para los días cálidos con temperaturas extremas. Sin embargo, importa aclarar que los días cálidos de temperatura media son más representativos de la condición de verano, es decir, aquella para la que el desempeño de la FVT muestra su mejor performance. Se demuestra la importancia de implementar FVT en viviendas cuya envolvente horizontal esté correctamente aislada. Bajo esta condición, la estrategia mejora sus beneficios hasta 69% para el día de altas temperaturas y hasta 58% para el día de temperatura promedio en verano.

Por todo lo enunciado, la FVT se presenta como una alternativa viable y ambientalmente ventajosa frente a estrategias de aislación convencionales, especialmente en contextos urbanos donde el microclima juega un rol clave para tender a la eficiencia energética de la edificación.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Esta investigación ha sido posible por el apoyo financiero del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Agencia Nacional de Promoción de la Ciencia y la Tecnología (ANPCyT) mediante los fondos recibidos a través de los proyectos de investigación PICT-2020-02444 y PIP 2021-0900.

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>
- Castellanos, E. J., Lemos, M. F., Astigarraga, L., Chacón, N., Cuvi, N., Huggel, C., ... Valladares, M. (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. Retrieved from https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_Chapter12.pdf
- 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>

- Correa, E., Ruiz, M. A., Canton, A., & Lesino, G. (2012). Thermal comfort in forested urban canyons of low building density. An assessment for the city of Mendoza, Argentina. *Building and Environment*, 58, 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.007>
- Djedjig, R., Bozonnet, E., & Belarbi, R. (2015). Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 86, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.057>
- EnergyPlus, Copyright (c) 1996-2021, The Board of Trustees of the University of Illinois, The Regents of the University of California, through Lawrence Berkeley National Laboratory (subject to receipt of any required approvals from the U.S. Dept. of Energy), Oak Ridge National Laboratory, managed by UT-Battelle, Alliance for Sustainable Energy, LLC, and other contributors.
- Esteves Miramont, A., Gelardi, D., & Balter, J. (2009). Vivienda unifamiliar solar pasiva en el centro-oeste de Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/98570>
- Jozay, M.; Zarei, H.; Khorasaninejad, S.; Miri, T. (2024) Maximising CO2 Sequestration in the City: The Role of Green Walls in Sustainable Urban Development. *Pollutants 2024*, 4, 91–116. <https://doi.org/10.3390/pollutants4010007>
- Maatouk Khoukhi (2019). The combined effect of heat and moisture transfer dependent thermal conductivity of polystyrene insulation material: Impact on building energy performance, *Energy and Buildings*, Volume 169, 2018, Pages 228-235, ISSN 0378-7788. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.055>.
- 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>
- Pujol, M. O., & Bisbal-grandal, I. (2019). DIVERSIDAD EN LA DISPERSIÓN: MORFOLOGÍA DE LAS ÁREAS RESIDENCIALES EN EL PERIURBANO DEL GRAN MENDOZA. *Revista Urbano*, 20, 46–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.22320/07183607.2019.22.40.03>
- Suárez, P., Cantón, M. A., & Correa, E. (2023). Comportamiento térmico estacional de fachadas verdes conformadas por especies trepadoras perennes en muros máxicos orientados al oeste. Estudio de casos en zonas áridas. *Cuaderno Urbano*, 35(35), 83–105. <https://doi.org/10.30972/crn.35356773>
- Suárez-Gómez, P. A., Cantón-Ivanishevich, 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>
- Suárez-Gómez, P. A. (2024). Tecnologías verdes de aplicación en envolventes verticales en zonas áridas. evaluación energética y ambiental. Tesis de doctorado en ingeniería – mención civil ambiental, Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza (Argentina). <https://bicyt.conicet.gov.ar/fichas/produccion/en/11836705#section-first>
- 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>
- Lim, Y & Tengku Izhar, Tengku Nuraiti & Zakarya, Irnis Azura & YUSUF, SARA & Zaaba, Siti & Mohamad, M. (2021). Life cycle assessment of expanded polystyrene. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 920. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/920/1/012030>.
- Zhang, Y., Yang, Y., Zhang, L., Zhao, C., Yan, J., Liu, M., & Zhao, L. (2022). Seasonal variation in leaf area index and its impact on the shading effects of vertical green facades in subtropical areas. *Building and Environment*, 225(May), 109629. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109629>
- Zhang, Y., Zhang, L., & Meng, Q. (2022). Dynamic heat transfer model of vertical green façades and its co-simulation with a building energy modelling program in hot-summer/warm-winter zones. *Journal of Building Engineering*, 58(March), 105008. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105008>

NATURE-BASED SOLUTIONS AS AN ENERGY CONSERVATION STRATEGY IN MASS HOUSING. VERTICAL GREENERY SYSTEMS.

ABSTRACT: The most widely used energy conservation strategy in architecture is the incorporation of traditional insulators into construction packages. Vertical Greenery Systems (VGS) are a nature-based alternative, which contributes to the recovery of degraded ecosystems. This research evaluates the efficiency of Traditional Green Facades (TGF) to reduce energy consumption in summer of a single-

family house on the ground floor and exposed perimeter in the Metropolitan Area of Mendoza, and to compare its performance with that of a traditional insulation technology (Expanded Polystyrene-EPS). Methodologically, it is structured in three stages: characterization of the opto-thermal properties of the PVT, determination of the energy savings associated with its implementation, through thermal simulation with EnergyPlus, and the comparison of the results achieved with those derived from the use of EPS. It is observed that isolating all the walls exposed to the outside of an environment with FVT and EPS, generates energy savings on summer days with average temperatures up to 59.8 % and 92.2 % respectively. It is identified that the energy saving possibilities offered by the FVT depend on the magnitude of the outdoor temperatures and that its use is more effective in arid climates with high levels of solar irradiance and mostly clear skies.

Keywords: vertical greening systems, energy saving, sustainable architecture, sustainable development.