DESEMPEÑO TERMO-ENERGÉTICO PASIVO EN CENTROS DE SALUD DE TUCUMÁN: SIMULACIÓN DINÁMICA VALIDADA

Amalita Fernández
CONICET FAU-UNT
https://orcid.org/0000-0002-5848-2685
afernandez@herrera.unt.edu.ar

DOI: https://doi.org/10.59047/2469.0724.v11.n15.49753

Resumen

El objetivo del presente trabajo es conocer y evaluar el comportamiento térmico de dos Centros de Atención Primaria de Salud (CAPS) ubicados en la ciudad de San Miguel de Tucumán, en ausencia de sistemas activos de climatización. Para ello, se generan y validan los modelos de simulación térmica dinámicos mediante mediciones in situ. Debido a la alta concurrencia y la necesidad de confort en invierno y verano, los sistemas de climatización operan casi continuamente. Para validar los modelos, se realizan monitoreos higrotérmicos durante los equinoccios períodos con menor requerimiento de calefacción y/o refrigeración. La colocación de sensores se efectúa en locales seleccionados, considerando uso, orientación y la protección y el resguardo del instrumental. Se comparan los resultados obtenidos, utilizando como indicador la diferencia media absoluta (DMA) como indicador de precisión. La DMA resulta inferior a 1 °C en cada uno de los locales considerados. Por último, se simula el comportamiento térmico, a partir de los modelos previamente validados, con datos climáticos promedio para verano e invierno, allí se evidencian deficiencias en ausencia de sistemas activos de acondicionamiento térmico y se destaca la necesidad de implementar estrategias de rehabilitación pasivas para un mejor desempeño.

Palabras clave: Simulación térmica, Comportamiento térmico-energético, Centros de salud, Validación de modelos.

Fecha recepción: 08 de agosto de 2025

PASSIVE THERMO-ENERGY PERFORMANCE IN HEALTH CENTERS OF TUCUMÁN: VALIDATED DYNAMIC SIMULATION

Beatriz Garzón
CONICET FAU-UNT
https://orcid.org/0000-0003-3130-8895
bgarzon2022@gmail.com

Abstract

The objective of this work is to understand and evaluate the thermal performance of two Primary Health Care Centers (CAPS) located in the city of San Miguel de Tucumán, in the absence of active HVAC systems. Dynamic thermal simulation models are generated and validated through in-situ measurements. Due to high occupancy and the need for comfort in winter and summer, HVAC systems operate almost continuously. To validate the models, hygrothermal monitoring is carried out during the equinoxes, periods with lower heating and/or cooling demand. Sensors are placed in selected rooms, considering their use, orientation, and the protection and safekeeping of the instruments. The obtained results are compared, using the Mean Absolute Difference (MAD) as an accuracy indicator. The MAD is less than 1 °C in each of the considered rooms. Finally, the thermal performance is simulated, using the previously validated models, with average climatic data for summer and winter. This simulation reveals deficiencies in the absence of active thermal conditioning systems and highlights the need to implement passive rehabilitation strategies for improved performance.

Key words: *Thermal simulation, Thermal-energy behavior, Health centers, Model validation*

Fecha aceptación: 15 de septiembre de 2025

Introducción

A nivel global, el sector de la edificación representa un consumo energético significativo, superando el 40 % del total (Muñoz Rojas et al., 2023, p. 5), y contribuye sustancialmente a las emisiones de CO_2, estimadas entre el 25 % y el 30 % del total anual. Este consumo impacta directamente en el cambio climático, representando entre el 10 % y el 12 % de la contribución humana al calentamiento global (Costantini Romero y Francisca, 2022, p. 116). En Argentina, el sector edilicio es responsable del 37 % del consumo energético nacional, siendo la climatización el principal factor contribuyente (Kuchen y Kozak, 2020, p. 45). Específicamente en Centros de Atención Primaria de Salud (CAPS), estudios previos (Fernández y Garzón, 2024, p. 120) indican que los sistemas de acondicionamiento térmico, especialmente la refrigeración, son los de mayor consumo energético. Por lo tanto, un conocimiento más preciso del comportamiento térmico de estos edificios resulta fundamental para desarrollar estrategias que mejoren su eficiencia energética y reduzcan su impacto ambiental.

En el contexto específico de los CAPS, la optimización del comportamiento térmico-energético adquiere una relevancia aún mayor. Estos edificios, esenciales para la prestación de servicios de salud a la comunidad, deben garantizar condiciones de confort térmico adecuadas para pacientes y personal, al tiempo que minimizan su consumo energético. La particularidad de los CAPS, con sus horarios de funcionamiento extendidos y la necesidad de mantener ambientes controlados, demanda un análisis detallado de su desempeño térmico. Para lograrlo, la simulación térmica computacional se presenta como una herramienta valiosa, permitiendo evaluar el impacto de diversas estrategias de diseño y rehabilitación.

La validación de modelos de simulación se presenta como una etapa crítica en la modelización de sistemas, permitiendo la comparación entre las predicciones del modelo y las observaciones empíricas (Barales et al., 2004). Este proceso, esencial para optimizar la simulación de escenarios, se fundamenta en la confrontación de datos simulados con datos experimentales (Rojas et al., 2016 p. 453). Para cuantificar la precisión de esta comparación, se emplea el error cuadrático medio (RMSE), un parámetro que evalúa la disociación entre los datos recolectados in situ y los resultados de la simulación. Un RMSE cercano a cero indica una alta precisión del modelo (Ali y Abustan, 2014 p. 2). La validación rigurosa del modelo proporciona una mayor certeza en la interpretación de los escenarios simulados y respalda la selección de estrategias con eficacia comprobada (Becelis et al., 2024, p. 68).

Actualmente, en la ciudad de San Miguel de Tucumán existen 35 CAPS que fueron construidos y remodelados en diferentes períodos. A cada período de construcción le corresponde una técnica diferente (Fernández y Garzón, 2020 p. 31). Este estudio se centra en la validación de los modelos de simulación térmica para dos CAPS ubicados en San Miguel de Tucumán, a partir de mediciones *in situ* e información meteorológica de fuentes locales. El objetivo principal es evaluar la precisión del modelo y su capacidad para predecir el comportamiento térmico del edificio en ausencia de sistemas activos de climatización. Los resultados obtenidos, permitirán lograr datos fehacientes, para mejorar el desempeño térmico de los centros de salud, logrando un menor consumo energético, y un mejor confort para los pacientes.

Metodología

Este estudio evalúa el comportamiento térmico energético de dos Centros de Atención Primaria de Salud (CAPS) en San Miguel de Tucumán, en ausencia de sistemas activos de climatización, mediante simulación térmica computacional. Con el objetivo de lograr una mayor precisión en la simulación, se realiza una validación de los modelos para cada CAPS. Para llevarla a cabo, se monitorean en los períodos donde es menor el uso de sistemas activos de climatización, los equinoccios. Esto se debe a que el objetivo principal de esra investigación es conocer su comportamiento térmico pasivo. Una vez validados los modelos, se procede a ejecutar la simulación de ambos con datos climáticos promedio, para conocer su temperatura durante un período típico, en ausencia de sistemas de calefacción y refrigeración.

En primera instancia se generan los modelos de simulación térmica con el software SIMEDIF 2.0 para cada CAPS a analizar, a partir de la planimetría disponible y relevamiento de los mismos. Luego se realiza la validación de ambos modelos a partir de datos obtenidos a través de monitoreos higrotérmicos. Estos se llevan a cabo durante dos períodos diferentes correspondientes a los equinoccios. Los períodos considerados, se seleccionan estratégicamente para minimizar la influencia de los sistemas activos de climatización. Se obtienen datos de humedad relativa y temperatura del bulbo seco que son directamente comparados con los resultados arrojados por las simulaciones, utilizando datos climáticos correspondientes a idénticos períodos. Para obtener los valores meteorológicos exteriores para ambos períodos, se recurre a una fuente meteorológica local, la subestación El Colmenar de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). La precisión de la validación se cuantifica contrastando los valores de temperatura interior (simulación vs monitoreo) mediante la Diferencia Media Absoluta (DMA), procurando que este indicador se mantenga inferior a 1 °C en todos los casos analizados. Se emplea este indicador, por el tamaño reducido de la muestra y por qué esta métrica minimiza la influencia de mediciones atípicas.

Una vez que los modelos de simulación para cada CAPS se consideran validados, se procede a simular su comportamiento térmico para un año típico meteorológico (TMY). Se emplean para ello archivos climáticos en formato EPW (Energy Plus Weather). Esta etapa permite analizar el desempeño térmico de los centros de salud en condiciones climáticas extremas típicas de la región, sin la influencia de los sistemas activos de climatización. A partir de las simulaciones de ambos CAPS, se generan curvas de temperatura interior que permiten visualizar su respuesta térmica.

Adicionalmente, se determinan los índices de confort térmico voto medio estimado, PMV por sus siglas en ingés (Predicted Mean Vote) y porcentaje de personas insatisfechas, PPD, por sus siglas en inglés (Predicted Percentage Dissatisfied) para cuantificar la sensación térmica de los ocupantes y la proporción de personas insatisfechas con las condiciones ambientales simuladas. Se calcula el porcentaje de horas de confort, utilizando como criterio el estándar ANSI ASHRAE 55, donde se considera un voto medio predico (PMV) neutral y un 15 % de porcentaje de personas insatisfechas (PPD) ($-0.5 < PMV < +0.5$ y $PPD < 15\%$). Finalmente, para cuantificar la demanda energética de calefacción y refrigeración en cada uno de los casos de estudio, se emplean modelos de simulación energética basados en el estándar ANSI ASHRAE 170. Estos modelos incorporan un termostato que se activa durante el horario de atención de los CAPS, de 7:00 a 19:00 horas, en los locales definidos por el estándar: espera, consultorios, enfermería y espacios de permanencia del personal (administración, admisión y office). Para la simulación en condiciones de verano, el termostato se programa a 24 °C, mientras que para el invierno se establece en 21 °C. Los valores resultantes de la simulación energética se presentan como positivos para la demanda de calefacción y negativos para la demanda de refrigeración.

En cuanto a las herramientas empleadas, el monitoreo se lleva a cabo con sensores HOBO Onset Modelo UX100-003. Se instalan en espacios interiores, registrando temperatura y humedad relativa del aire cada 15 minutos, en locales estratégicamente seleccionados por su uso y orientación, asegurando la protección del instrumental. Estos sensores registran un rango de temperatura de -20 °C a 70 °C, con una precisión de ±0.2 °C, rango de humedad relativa de 0 % a 100 %, con un error de 3.5 %. Mediante el software *HOBOware*, se definen los parámetros de medición y programa tanto la frecuencia de muestreo como el inicio y parada de registro para los sensores. Para la simulación térmica, se emplea el software SIMEDIF V2.0 (2020). Es un software que sirve como herramienta de diseño para calcular la temperatura horaria del aire dentro de los espacios de un edificio, la temperatura superficial horaria de las paredes y la energía auxiliar de calentamiento/enfriamiento que se necesita para mantener los espacios a una temperatura determinada por un termostato que puede definirse hora por hora para el año completo. También cuenta con un módulo para calcular condiciones de confort dentro de los espacios, método del Voto Medio Predicho y Porcentaje de Personas en Inconfort, PMV y PPD respectivamente, según el estándar ASHRAE55.

Caracterización climática de la región

La ciudad de San Miguel de Tucumán es la capital de la provincia, es la más poblada de la región; su urbanización consiste en una alta densidad de viviendas y edificios en altura, sobre todo en la zona céntrica (González y Ceballos, 2021 p. 360). Posee un clima subtropical con estación seca, inviernos secos y veranos lluviosos (Bomba et al. 2007 p.25). Se ubica en la zona bioclimática II (Figura 1), templado cálido, subzona b según la clasificación bioclimática de IRAM. En esta zona, es el verano la estación crítica, con valores de temperatura media mayores que 24 °C y temperatura máxima mayor que 30 °C. El invierno es más seco, con bajas amplitudes térmicas y temperaturas medias comprendidas entre 8 °C y 12 °C. Subzona IIb: amplitudes térmicas menores que 14 °C. (IRAM, 2012). Presenta condiciones críticas de temperatura tanto en invierno como en verano, alejándose en ambos casos de la zona de confort. La temperatura máxima media es de 32 ºC y la mínima media de 7 ºC (Fernández y Garzón, 2020 p. 32).

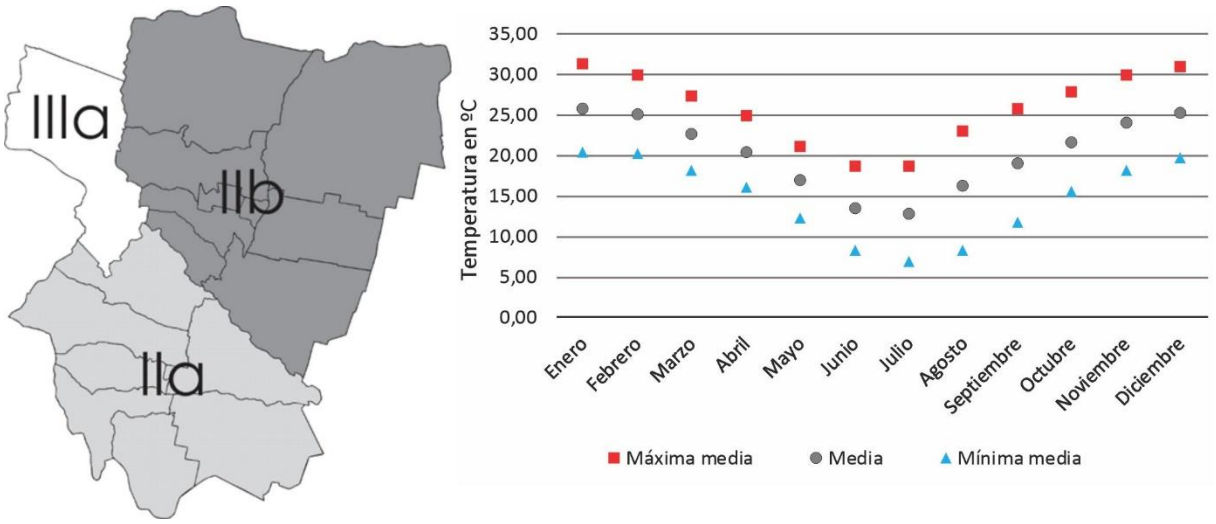


Figura 1. Clasificación bioclimática de la provincia de Tucumán y valores de temperatura promedios anuales para San Miguel de Tucumán. **Fuente:** elaboración propia.

Descripción del objeto de estudio

Para este trabajo, se estudian dos CAPS existentes en la ciudad de San Miguel de Tucumán. Corresponden a dos tipologías edilicias y sistemas constructivos completamente diferente cada uno de ellos data de un período diferente de construcción. El primero es el más reciente y se encuentra hacia el sudoeste mientras que el segundo se ubica hacia el nordeste.

El primer caso analizado presenta una superficie cubierta de 232 m² y se apoya sobre dos medianeras, disponiendo los locales posteriores su ventilación a través de un patio cerrado. De sus trece locales, nueve son habitables con ventilación directa y cuatro con ventilación indirecta, a través de otros espacios. El edificio organiza su circulación mediante un sistema doble: una pública y otra técnica, de acceso restringido al personal. Locales como la sala de reuniones, la farmacia y el baño del personal tienen acceso exclusivo a través de la circulación técnica; tres consultorios y la enfermería cuentan con doble acceso, tanto por la circulación técnica como por la general; el resto de los locales se vincula únicamente a través de la circulación general. El ingreso al edificio es único y compartido por personal y público. En la circulación general se distinguen dos espacios separados por una doble puerta, siendo el segundo de acceso más restringido que el primero. Su tecnología constructiva se basa en muros de mampostería de ladrillo cerámico hueco de 18 cm de espesor, revocados en ambas caras, con una cubierta de

chapa que incorpora un ático ventilado y un cielorraso de yeso suspendido con una capa de 5 cm de lana de vidrio como aislamiento térmico.

El segundo caso analizado abarca una superficie cubierta de 262,9 m². Solo un local principal carece de ventilación directa al exterior, mientras que el resto ventila a nivel de la línea municipal o a través de patios internos. El edificio alberga tres consultorios de distintas especialidades médicas, una enfermería, depósitos, el área de admisión y una sala de reuniones. Dispone de sanitarios diferenciados para el público y el personal. Presenta un único acceso y una única circulación general, la cual se desarrolla en dos instancias, siendo la segunda de acceso más restringido que la primera. Ambos espacios de circulación funcionan como salas de espera. Su tecnología constructiva se caracteriza por muros de ladrillo macizo revocados en ambas caras, con un espesor de 30 cm, y un techo de losa maciza con cielorraso de yeso aplicado. Adicionalmente, se observa una cubierta de chapa incorporada posteriormente a su construcción, con el fin de solucionar problemas de filtraciones de agua.

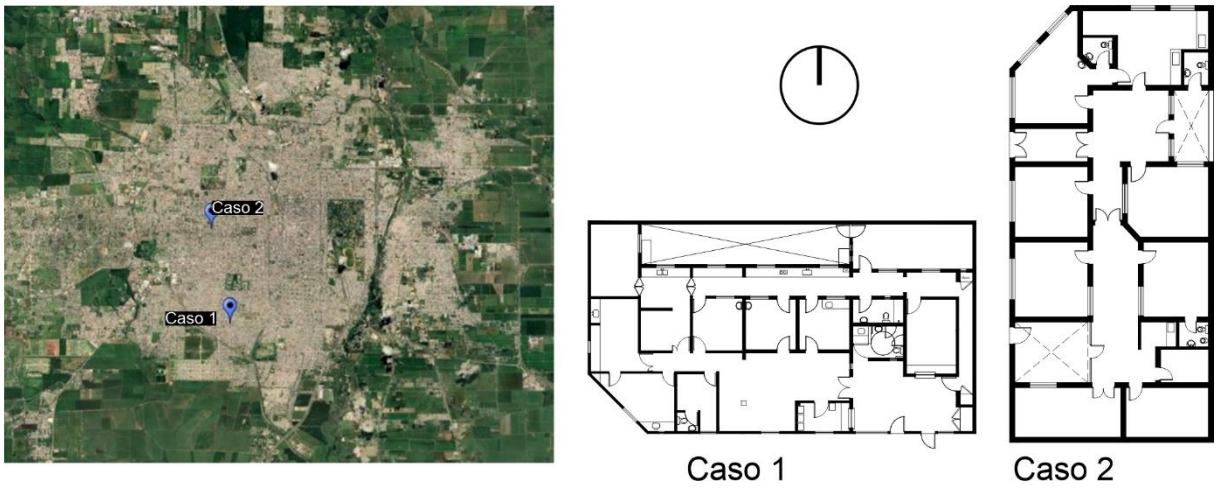


Figura 2. Ubicación y planimetría general de casos 1 y 2. **Fuente:** elaboración propia.

Modelos de simulación térmica

La construcción de los modelos de simulación se basa en una exhaustiva recopilación de datos, que incluye tanto la planimetría e información técnica de los CAPS como un detallado relevamiento de sus características constructivas y esquemas de uso. Las dimensiones de las distintas zonas se definen en función de la documentación técnica y un relevamiento efectuado. Para todos los casos las cargas térmicas por personas y equipamiento se encuentran activas en los horarios de funcionamiento del CAPS, de 7 a 19 h, a excepción de aquellas correspondientes a heladeras para el resguardo de fármacos. A continuación, se describen los modelos empleados para el caso 1 y 2 respectivamente, se muestran, además, imágenes representativas para cada uno de ellos (Figura 3 y 4).

Para el primer caso, se definen dieciséis zonas térmicas, cada una representando un local específico más la cámara de aire ubicada entre el cielorraso y la cubierta de chapa. El pasillo técnico, aunque espacialmente continuo, se divide en dos zonas térmicas distintas para simular con precisión su doble función: una zona de circulación y un office equipado con aire acondicionado, lo que permite la futura incorporación de un termostato para evaluar la energía auxiliar. El modelo considera dieciséis paredes masivas adyacentes al exterior, veintiún paredes masivas que conectan espacios interiores entre sí y catorce paredes masivas compuestas por una capa de tierra de 2 metros y un contrapiso de hormigón. Con el objetivo de simplificar y agilizar la simulación, se opta por no modelar capas finas como revoques y baldosas. Se definen quince tabiques, catorce correspondientes al cielorraso de yeso suspendido, en contacto con los diversos locales interiores y la cámara de aire, y un único tabique que representa la cubierta de chapa de una sola pendiente, expuesta al exterior. Finalmente, se definen seis aberturas, considerando

aquellas que permanecen abiertas durante el horario de funcionamiento del CAPS (7 a 19 h), la conexión siempre abierta entre la sala de espera exterior y el ambiente exterior, y la conexión entre las dos zonas térmicas que conforman el pasillo técnico.

Para el segundo caso, se definen once zonas térmicas, donde corresponde cada una a los locales con concurrencia, una adicional para los depósitos y otra para la cámara de aire ubicada entre la losa y la cubierta de chapa. Las dimensiones de estas zonas se establecen a partir de la documentación técnica existente y de un relevamiento in situ. En cuanto a las paredes masivas, se consideran los muros, las losas y los pisos. El modelo incluye quince paredes masivas adyacentes a espacios exteriores, quince paredes masivas que conectan los espacios interiores entre sí, diez paredes masivas constituidas por una capa de tierra de 2 metros y contrapiso de hormigón, y una pared masiva que representa la losa maciza. Al igual que en el primer caso, para simplificar y agilizar el proceso de simulación, se omite la modelización de capas finas como revoques y baldosas. Para este caso, se consideran solo dos tabiques uno para cada agua de la cubierta de chapa. Por último, se definen tres aberturas que permanecen abiertas durante el horario de funcionamiento del CAPS.

Validación de los modelos de simulación

La ejecución de ambos modelos de simulación, se lleva a cabo a partir de datos climáticos horarios de temperatura, humedad relativa y radiación solar provenientes de la estación meteorológica El Colmenar, perteneciente a la EEAOC. Su validación se lleva a cabo mediante la comparación con datos de monitoreo higrotérmico obtenidos durante los equinoccios. Estos períodos del año son especialmente adecuados para esta tarea, ya que las condiciones climáticas son menos extremas y las variaciones de temperatura y humedad son más moderadas. Al minimizar la influencia de los sistemas de climatización, se obtienen datos más representativos del comportamiento térmico intrínseco del edificio. Esta comparación permite identificar posibles desviaciones entre los resultados simulados y los datos medidos, lo que a su vez facilita la calibración del modelo y mejora su capacidad para predecir el comportamiento térmico del edificio en diferentes condiciones climáticas y de ocupación.

Para el caso 1, el período considerado abarca desde el 13 hasta el 26 de octubre de 2022. Para su monitoreo se instalan cinco sensores térmicos de manera estratégica en cinco locales con distintas orientaciones y con diferentes funciones; estos corresponden a: 1 control y crecimiento, 2 clínica, 3 pasillo técnico y office, 4 farmacia y 5 psicología. En la imagen a continuación (Figura 3). El modelo de simulación presenta una buena capacidad predictiva, sin embargo, se observan algunas discrepancias con los datos medidos (Figura 4), especialmente en situaciones de alta variabilidad en la carga térmica. Estas discrepancias, que pueden alcanzar los 3.5 °C, podrían atribuirse a factores como la ocupación irregular del edificio, el uso intermitente de equipos eléctricos y la dificultad de modelar con precisión ciertos eventos puntuales, como la apertura de puertas o ventanas. A pesar de estas limitaciones, el modelo resulta útil para evaluar el comportamiento térmico general del edificio.

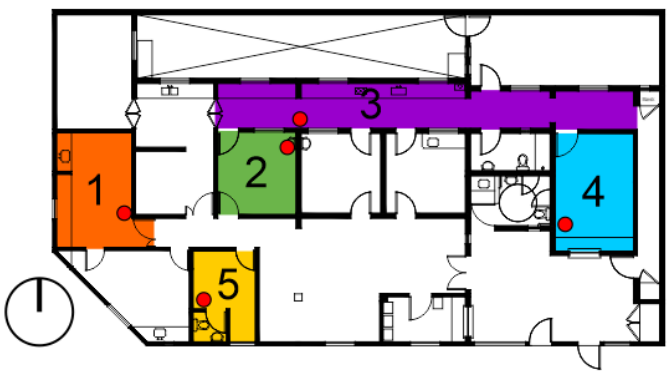


Figura 3. Locales monitoreados y posición de sensores para el caso 1. **Fuente:** elaboración propia.

A continuación, se describe de manera más detallada la comparación entre los datos del monitoreo y aquellos obtenidos a partir de la simulación. En el local 1, se obtiene una DMA de temperatura entre simulación y monitoreo de 0.61 °C, el pico máximo es de 3.12 °C a las 15 h. Para el 2, la DMA entre temperaturas es 0.99 °C, siendo el valor máximo 2.7 °C, esta se da a las 11 de la mañana en un día hábil. El local 3 registra una DMA de 0.74 °C, siendo la mayor diferencia 3.48 °C, es evidente que, en muchos momentos los valores de temperatura obtenidos a partir del monitoreo resultan inferiores esto puede deberse a que en la simulación se considera la carga térmica constante generada por una persona caminando por el pasillo. En el 4, DMA es de 0.81 °C con un pico máximo de 3.7 °C a las 13 h. Por último, para el local 5, la DMA es 0.72 °C y la diferencia máxima es 3.04 °C, este pico se da a las 16 horas. Para todos los locales se evidencian picos máximos en horarios de funcionamiento del CAPS.

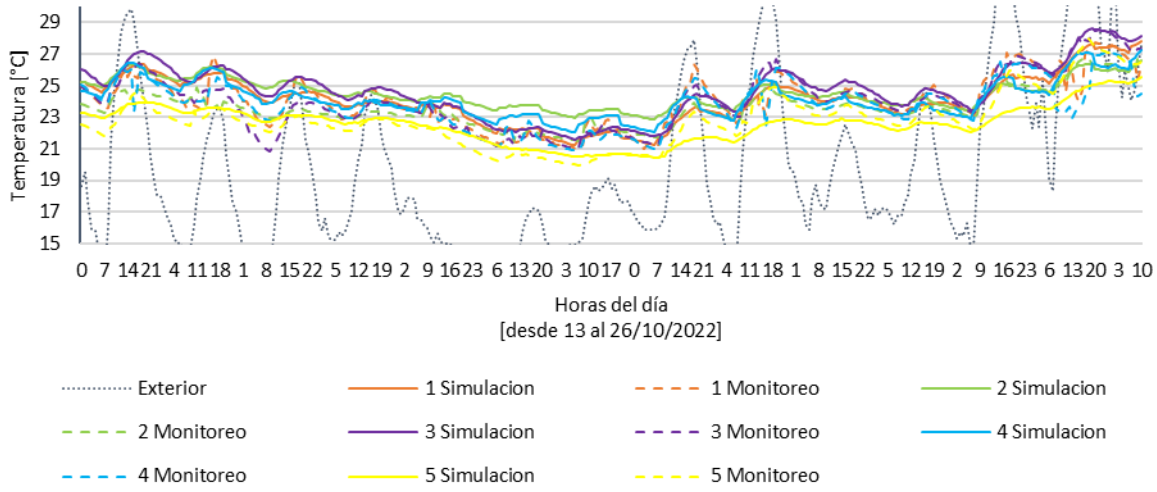


Figura 4. Contraste valores de temperatura de monitoreo higrotérmico y simulación para el caso 1. **Fuente:** elaboración propia.

En el segundo caso el período considerado va desde 18 de abril al primero de mayo del 2024. Al igual que en el caso anterior, los cinco sensores se ubican de manera estratégica en locales con distintas funciones y orientaciones; estos locales corresponden a: 1 odontología, 2 sala de situación, 3 ginecología, 4 administración y 5 enfermería. (Figura 5). La comparación entre las temperaturas simuladas y las medidas revela una buena concordancia general, con diferencias promedio menores a 1 °C. Sin embargo, se observan picos de hasta 4.24 °C. Estas variaciones, se deben principalmente a que el modelo no considera la operación de los sistemas activos de refrigeración y en algunos casos se evidencia su uso en breves períodos de funcionamiento.

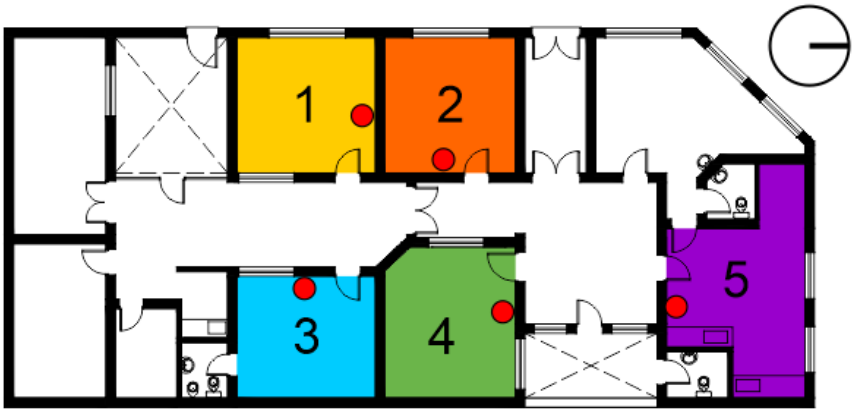


Figura 5. Locales monitoreados y posición de sensores para el caso 2. Fuente: elaboración propia.

En el local 1, la DMA de temperatura entre monitoreo y simulación es de 0.39 °C, siendo la máxima 3.18 °C. Se evidencia en el monitoreo el encendido de sistemas activos de refrigeración en los momentos de mayor separación entre ambas curvas. Para el caso del local 2, la DMA es de 0.77 °C. y el valor máximo resultante es 1.72 °C. En este caso no se evidencia el encendido de sistemas activos. En el 3, la DMA resulta de 0.32 °C, con un máximo de 1.67 °C. En el momento de la máxima diferencia se observa un pico pronunciado en el monitoreo, que puede deberse al encendido de algún artefacto generador de calor. En el 4, las diferencias de temperatura resultan amplias, esto se debe a que se evidencia el uso de sistemas activos de refrigeración en muchos momentos del período analizado. La DMA de temperaturas es de 0.85 °C, siendo la máxima 4.24 ° C. por último en el local 5, sucede algo simular al 4, la DMA es de 0.70 °C, con una máxima de 4.19 °C.

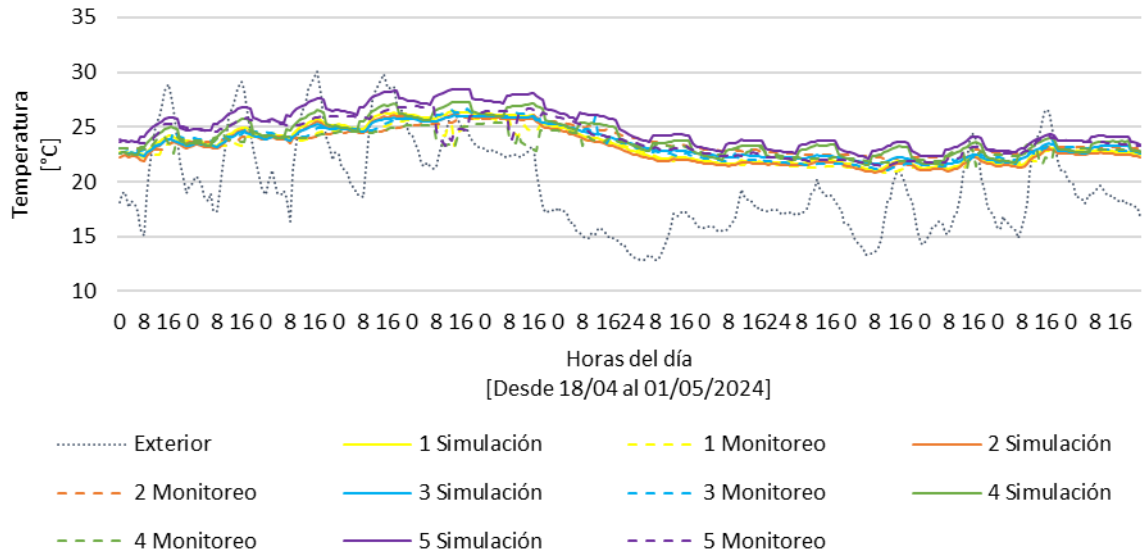


Figura 6. Contraste valores de temperatura de monitoreo higrotérmico y simulación para el caso 2. Fuente: elaboración propia.

Comportamiento térmico-energético para un año típico meteorológico

Para evaluar el desempeño térmico de los edificios en condiciones climáticas extremas y durante todo el año, se realizan simulaciones a partir de archivos climáticos TMY en formato EPW. Estos archivos, que contienen información detallada sobre las variables meteorológicas (temperatura, humedad, radiación solar, etc.) las cuales permiten simular el comportamiento térmico de los edificios a lo largo de un año completo. En este estudio, se seleccionan los meses de invierno y verano para analizar las condiciones más críticas, ya que es durante estas estaciones cuando la demanda de calefacción y refrigeración es mayor. Además, dado que no era factible realizar un monitoreo simultáneo de ambos edificios debido a limitaciones en la instrumentación disponible, la simulación permite someter a los edificios a las mismas condiciones climáticas, garantizando así una comparación objetiva y rigurosa. Al emplear un único archivo climático para ambos casos, se aseguró que las diferencias observadas en los resultados fueran atribuibles a las características intrínsecas de cada edificio y no a variaciones en las condiciones externas.

Para el solsticio de verano se considera un período desde el 15 al 22 de enero. Durante el solsticio de invierno, e período considerado va desde el 1 al 7 de julio. Se toman estas fechas por tratarse de una época comprendida plenamente en verano e invierno respetivamente. En el primer caso, los valores máximos de temperatura superan los 35 °C y la humedad relativa el 90 %, en la situación de invierno, las temperaturas mínimas se encuentran por debajo de los 5 °C.

En primera instancia se determina el porcentaje de horas de confort según e estándar considerado, donde el voto medio predicho (PMV) oscila entre -0,5 y +0,5 y el porcentaje de personas insatisfechas (PPD) es inferior a un 15 %. Se definen estas horas dentro de cada uno de los locales, durante todo el período monitoreado, considerando únicamente las horas de funcionamiento de los CAPS, de 7 a 19 horas. Para ello, se consideran condiciones standard de índice de arropamiento 0,5 clo, tasa metabólica de 1,3 met y velocidad de aire mínima, de 0,1 m/s.

En el primer caso (tabla 1), los porcentajes de confort térmico interior en ausencia de sistemas activos son extremadamente bajos tanto en verano como en invierno para la mayoría de los locales. Esto subraya la marcada deficiencia en el comportamiento térmico pasivo del edificio. Durante el período considerado para verano, los porcentajes de confort son bajos en todos los locales durante todo el día, con valores que oscilan entre el 0.53% y el 19.47%. Al considerar solo las horas de funcionamiento, la situación empeora significativamente, manteniéndose en un rango de 0% a 8.33%. La "Espera exterior" presenta los valores más altos de confort esto se debe a que está más expuesta a la ventilación. Sin embargo, incluso este valor es muy bajo. Locales como "Psicología" y "Consultorio febril" registran un 0% de confort durante las horas de funcionamiento, indicando condiciones térmicas inaceptables.

En el invierno, aunque los porcentajes de confort siguen siendo bajos, se observa una ligera mejora en algunos locales en comparación con el verano. Los valores para todo el día varían entre 0% y 13.86%. Durante las horas de funcionamiento, el confort térmico muestra un incremento en varios locales, con un rango de 0% a 10.17%. Esto es más notorio en la "Sala de reuniones" (10.17%) y, en menor medida, en "Espera exterior", "Pasillo técnico", "Farmacia", "Admisión", "Enfermería" y "Control y crecimiento" (todos alrededor del 7-9%). "Psicología" y "Consultorio" continúan con un 0% de confort incluso durante las horas de funcionamiento en invierno.

Esta simulación evidencia un déficit crítico de confort térmico interior en el Caso 1 en ausencia de sistemas activos de climatización, tanto en verano como en invierno.

Caso 1_confort térmico interior				
	Verano		**Invierno**	
Local	**% confort todo el día**	**% confort horas de funcionamiento**	**% confort todo el día**	**% confort horas de funcionamiento**
Espera exterior	19,47	8,33	6.63	9.32
Espera interior	11,05	5,21	3.01	5.93
Pasillo técnico	7,89	5,21	6.63	9.32
Farmacia	5,79	3,13	6.63	8.47
Admisión	2,63	2,08	5.42	7.63
Psicología	1,05	0,00	0.00	0.00
Consultorio	6,84	4,17	0.00	0.00
Enfermería	10,53	5,21	7.83	8.47
Control y crecimiento	6,84	4,17	7.83	8.47
Consultorio febril	0,53	0.00	1.20	5.93
Sala de reuniones	3,68	4.17	13.86	10.17

Tabla 1. Porcentaje de horas de confort obtenidas a partir de la simulación térmica durante el período de verano e invierno para el Caso 1. **Fuente:** elaboración propia.

Los porcentajes de confort térmico interior para el Caso 2 (tabla 2) son predominantemente del 0 %, tanto para el período completo de 7 días como durante las horas de funcionamiento (7-19 h), tanto en verano como en invierno. Esto indica condiciones térmicas consistentemente fuera del rango de confort aceptable en prácticamente todos los locales. En el verano, el confort térmico es del 0 % en todos los locales, tanto para todo el día como durante las horas de funcionamiento. Esto señala condiciones de sobrecalentamiento severo y constante durante la temporada cálida. En invierno, la situación es similar, con un 0 % de confort en la mayoría de los locales en ambos períodos.

Se observa un ligero aumento en el porcentaje de confort en el local de "Enfermería", alcanzando un 1.05% para todo el día y un 1.10 % durante las horas de funcionamiento. Si bien este valor es extremadamente bajo esto se asocia a su orientación norte, con una abertura plena en dicho sentido, característica que lo diferencia del resto.

El "Pasillo" muestra un mínimo confort de 2.10 % durante todo el día en verano, que se reduce a 1.59 % en horario de funcionamiento, y cae a 0.53 % durante todo el día en invierno y 0 % en horario de funcionamiento.

Caso 2_confort térmico interior				
	Verano		**Invierno**	
Local	**% confort todo el día**	**% confort horas de funcionamiento**	**% confort todo el día**	**% confort horas de funcionamiento**
Espera	0 %	0 %	0 %	0 %
Pasillo	2,10 %	1,59 %	0,53 %	0 %
Consultorio Clínico	0 %	0 %	0 %	0 %
Enfermería	0 %	0 %	1,05 %	1,10 %
Admisión	0 %	0 %	0 %	0 %
Ginecología	0 %	0 %	0 %	0 %
Sala de reuniones	0 %	0 %	0 %	0 %
Odontología	0 %	0 %	0 %	0 %

Tabla 2. Porcentaje de horas de confort obtenidas a partir de la simulación térmica durante el período de verano e invierno para el Caso 2. **Fuente:** elaboración propia.

Para cuantificar la potencia requerida de calefacción y refrigeración en cada uno de los casos de estudio, se emplean modelos de simulación energética basados en el estándar ASHRAE 170, definidos en el apartado metodología. Para ello, los modelos incluyen un termostato activado en los horarios de atención de los CAPS, de 7:00 a 19:00 horas, en los locales considerados por el estándar: espera, consultorios, enfermería y espacios de permanencia para el personal, como ser administración, admisión y office. Para el verano, siguiendo con el estándar mencionado, se programa el termostato a 24 °C y para el invierno a 21 °C. Los valores arrojados a partir de la simulación, son positivos para calefacción y negativos para refrigeración. Estos se exhiben, para cada caso en un gráfico de líneas. Además, se analizan los valores de manera específica, obteniendo los siguientes parámetros por local: demanda energética promedio, desviación estándar y promedio máximo diario. Para este análisis, se consideran todos los valores como absolutos, es decir con signo positivo, y se consideran nulas las cargas térmicas de refrigeración en invierno y de calefacción en verano.

En la tabla 3 se exhiben los valores para el caso 1. Estos resultados, evidencian una demanda de potencia considerable para mantener el confort térmico tanto en verano como en invierno, siendo la necesidad de

calefacción invernal superior en todos los locales. La desviación estándar, también tiende a ser mayor en invierno, pero considerablemente superior con respecto al verano. Esto sugiere una amplia fluctuación en el requerimiento de calefacción, esto se asocia directamente con las condiciones climáticas de la región, donde la amplitud térmica es superior en invierno. La situación más crítica de demanda energética, se da en los locales con adyacencia hacia el exterior mayor volumen y tránsito, como el pasillo técnico y la sala de espera. Se observa que en los consultorios 1, 2 y 3, sin adyacencia al exterior, esta es ampliamente inferior.

Potencia requerida para climatización Caso 1 [W]						
	Verano			**Invierno**		
Local	**Promedio**	**Desviación estándar**	**Promedio diario máximo**	**Promedio**	**Desviación estándar**	**Promedio diario máximo**
Espera interior	3176.58	1654.34	3884.65	3927.432	2412.48	8344.99
Pasillo técnico	2263.21	1251.36	2762.32	2556.583	1912.57	5785.16
Psicología	504.50	172.01	456.23	445.4782	331.679	1166.31
Consultorio 1	249.20	205.60	269.92	566.09	399.41	1450.4
Consultorio 2	360.92	201.13	445.83	556.90	392.276	1425.11
Consultorio 3	510.68	228.99	613.47	596.42	388.486	1418.54
Enfermería	1241.05	645.80	1510.29	1363.06	1011.61	3155.76
Control y crecimiento	1368.88	639.50	1648.39	1429.44	927.511	3074.43
Consultorio febril	897.03	346.10	1046.98	1351.54	814.472	2821.17

Tabla 3. Potencia requerida para calefacción y refrigeración para el Caso 1 en los períodos considerados para verano e invierno. **Fuente:** elaboración propia.

El Caso 2 (tabla 4), presenta un comportamiento térmico-energético más balanceado entre verano e invierno en términos de demanda de potencia, lo que contrasta con la mayor exigencia de calefacción observada en el Caso 1. Si bien la demanda sigue siendo considerable para mantener el confort, la distribución más equitativa de las cargas entre estaciones podría facilitar el diseño de sistemas de climatización más versátiles. La variabilidad diaria de la demanda, aunque presente, resulta más controlable que en el Caso 1 esto pude deberse a la materialización de su envolvente con materiales de mayor inercia térmica. Los locales de mayor demanda son aquellos con adyacencia hacia el exterior, la enfermería y consultorio clínico y el de mayor volumen y concurrencia, la sala de espera.

Potencia requerida para climatización Caso 2 [W]						
	Verano			**Invierno**		
Local	**Promedio**	**Desviación estándar**	**Promedio diario máximo**	**Promedio**	**Desviación estándar**	**Promedio diario máximo**
Espera	1079.35	352.40	1219.39	868.91	485.85	983.01
Pasillo	690.51	253.86	828.64	983.02	257.20	1029.89

Consultorio Clínico	1083.97	184.36	1219.36	958.45	268.03	1086.87
Enfermería	1014.57	216.06	1189.43	960.18	307.91	1137.14
Admisión	771.15	224.32	895.13	898.70	262.85	973.81
Ginecología	637.65	193.62	775.67	897.77	199.02	966.70
Sala de reuniones	752.15	208.21	869.44	1094.28	250.94	1196.89
Odontología	944.65	210.89	1064.80	1051.71	270.26	1183.54

Tabla 4. Potencia requerida para calefacción y refrigeración para el Caso 2 en los períodos considerados para verano e invierno. **Fuente:** elaboración propia.

Estos hallazgos refuerzan la necesidad de implementar estrategias de rehabilitación pasivas que permitan reducir estas cargas y, consecuentemente, el consumo energético asociado al acondicionamiento activo.

Conclusiones

Este estudio analiza el comportamiento térmico de dos Centros de Atención Primaria de Salud (CAPS) en San Miguel de Tucumán, utilizando modelos de simulación dinámica validados con mediciones in situ. Es importante destacar que, si bien estos modelos se basan en datos reales, representan una aproximación del comportamiento del edificio en condiciones controladas, y no la totalidad de las variables operativas en el día a día.

La evaluación evidencia deficiencias notables en el desempeño pasivo de ambos CAPS y una dependencia alta de los sistemas de climatización. Los resultados confirman un confort térmico bajo o nulo en ciertas condiciones, tanto en verano como en invierno. Esta ineficiencia implica una dependencia casi continua de los sistemas de climatización para mantener condiciones ambientales adecuadas. Esta situación conlleva una demanda energética auxiliar considerable, cuantificada a partir de simulaciones basadas en el estándar ASHRAE 170. Esto subraya la alta carga operativa que representa el mantenimiento del confort en estos edificios esenciales. En este contexto, la implementación de estrategias de rehabilitación pasivas se presenta como una necesidad clave para mejorar el desempeño térmico intrínseco de los CAPS y reducir su dependencia de sistemas activos.

Los principales aportes de este trabajo son, la metodología de validación empleada en este trabajo, basada en monitoreos higrotérmicos in situ durante los equinoccios, es óptima para los casos estudiados. Al tratarse de espacios de alta concurrencia pública, la elección de estos períodos minimiza la influencia de los sistemas activos de climatización, lo que permite obtener datos más representativos del comportamiento térmico intrínseco de los edificios. Este enfoque proporciona una herramienta precisa para futuras evaluaciones de edificaciones de uso público. Otro aporte considerable es la cuantificación de la falta de confort y la demanda energética asociada en estos centros establece las bases para justificar técnica y económicamente futuras intervenciones de mejora. Este estudio aporta conocimientos sobre el desempeño térmico-energético de los CAPS de San Miguel de Tucumán, lo cual es fundamental para la toma de decisiones en el diseño y la rehabilitación de infraestructuras sanitarias que impacten directamente en la calidad de la atención y el bienestar de sus ocupantes.

Futuras líneas de investigación podrían enfocarse en la evaluación de diferentes estrategias de rehabilitación pasivas y su impacto en el confort y la demanda energética en estos edificios. Asimismo, sería relevante analizar el comportamiento térmico bajo distintos escenarios climáticos futuros y considerar aspectos económicos y de ciclo de vida de las posibles soluciones. Optimizar la envolvente edilicia, a través de medidas como el aislamiento térmico, el control solar y la ventilación natural estratégica, es un camino fundamental para disminuir la demanda energética y mejorar el confort.

Bibliografía

Ali, M. y Abustan, I. (2021). A new novel index for evaluating model performance. JNRD - Journal of Natural Resources and Development, 4, 1-9. https://doi.org/10.5027/jnrd.v4i0.01

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2020). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. (ANSI/ASHRAE 55).

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2013). *Ventilación de instalaciones de atención médica* (ANSI/ASHRAE 170-2013).

Bacelis, G., Torres, K. E. M., y Torres, R. P. R. (2024). Validación del rendimiento térmico en invierno del modelo de una vivienda de interés social. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (15), 63-80. https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i15.253

Barrales V., Luis, Peña R., Iván, & Fernández de la Reguera B., Pedro. (2004). Model validation: an applied approach. *Agricultura Técnica, 64*(1), 66-73. https://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072004000100008

Barrales, V., Peña, R., y Fernández de la Reguera, B. (2004). Validación de modelos: un enfoque aplicado. *Agricultura técnica*, *64*(1), 66-73. http://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072004000100008

Bomba, H., Casares, M., Di Lullo, R., y Caminos, R. F. (2007). Escenarios GEO San Miguel de Tucumán. *Pampa: Revista Interuniversitaria de Estudios Territoriales*, (3), 75-89. https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar/publicaciones/index.php/Pampa/en/article/view/3141/4647

Costantini Romero, A. B. y Francisca, F. M. (2022). Construcción con bloques de suelo cemento como alternativa sostenible para envolvente edilicia. *Hábitat sustentable, 12*(1), 114-125. https://dx.doi.org/10.22320/07190700.2022.12.01.08

Fernández, A. y Garzón, B. (2020). Rehabilitación de muros exteriores en centros de salud en San Miguel de Tucumán para su eficiencia térmico-energética. *AVERMA: Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 24*, 31-40. https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/1960

Fernández, A., y Garzón, B. S. (2024). Análisis de patrones de consumo energético en centros de salud de baja complejidad en Tucumán, Argentina. *Arquisur revista*, *14*(26), 112-121. https://dx.doi.org/https://doi.org/10.14409/ar.v14i26.13961

González, M. V., y Ceballos, S. J. (2021). Las epífitas vasculares en un ambiente urbano están influidas por características del arbolado, el clima y las fuentes de propágulos. *Ecología Austral, 31*(2), 357-371. https://doi.org/10.25260/EA.21.31.2.0.1354

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2012). *Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*. (Norma IRAM 11603)

Kuchen, E. y Kozak, D. (2020). Transición energética argentina. El nuevo estándar de eficiencia energética en la evaluación de la vivienda social. Caso de estudio: Vivienda de Barrio Papa Francisco. *Revista hábitat sustentable, 10*(1), 44-55. https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/4015

Muñoz Rojas, R., Figueroa-San Martín, R., y Saelzer Fuica, G. (2023). Análisis comparativo en la rehabilitación de envolvente térmica de cerramientos educacionales con criterio ambiental. AUS [Arquitectura / Urbanismo / Sustentabilidad], (33), 04–11. https://doi.org/10.4206/aus.2023.n33-02

Rojas, J., Barrios, G., Huelsz, G., Tovar, R., y Jalife-Lozano, S. (2015). Thermal performance of two envelope systems: Measurements in non air-conditioned outdoor test cells and simulations. *Journal of Building Physics, 39*(5), 452–460. https://doi.org/10.1177/1744259115591993