

Análisis de sensibilidad en edificaciones históricas de adobe en Hermosillo utilizando la NOM-020-ENER-2011

Sensitivity analysis in historical adobe buildings in Hermosillo using NOM-020-ENER-2011

<https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i20.349>

ALMA ANGELINA AYALA MORENO

Universidad de Sonora, México. ORCID: 0000-0001-9643-082X
Correo electrónico: alma.ayala@unison.mx

JUAN PEDRO AYALA MORENO

Universidad de Sonora, México. ORCID: 0000-0002-7708-4113
Correo electrónico: juan.ayala@unison.mx

JAVIER ESQUER PERALTA

Universidad de Sonora, México. ORCID: 0000-0002-3031-1104
Correo electrónico: javier.esquer@unison.mx

Recepción: 4 de diciembre de 2025. Aceptación: 6 de mayo de 2025.

RESUMEN

1. **Objetivo:** Analizar el impacto del espesor de los muros y la conductividad térmica del adobe en el consumo energético de edificaciones históricas, utilizando exclusivamente la herramienta de cálculo de la NOM-020-ENER-2011.
2. **Metodología:** Se recopilaron espesores de muros de adobe de edificaciones históricas de Hermosillo y valores de conductividad térmica reportados en la literatura. Con los valores máximo, mínimo y la mediana de cada variable se generaron nueve combinaciones de sistemas constructivos, evaluadas en dos geometrías distintas mediante la herramienta de cálculo de la NOM-020-ENER-2011. Los resultados se analizaron mediante correlaciones y un análisis de sensibilidad para cada variable.
3. **Resultados:** El análisis correlacional indica que la conductividad térmica es más influ-

ABSTRACT

1. **Objective:** To analyze the impact of the thickness of the walls and the thermal conductivity of adobe on the energy consumption of historic buildings, using exclusively the calculation tool from NOM-020-ENER-2011.
2. **Methodology:** Adobe wall thicknesses from historical buildings in Hermosillo and thermal conductivity values reported in the literature were collected. Using the maximum, minimum, and median values of each variable, nine combinations of construction systems were generated and evaluated in two different geometries using the calculation tool from NOM-020-ENER-2011. The results were analyzed through correlations and sensitivity analysis for each variable.
3. **Results:** The correlational analysis indicates that thermal conductivity is more influential in predicting heat gain; however, the sensi-

- yente en la predicción de la ganancia de calor; no obstante, el análisis de sensibilidad muestra que la variación del espesor del muro produce cambios más significativos.
4. Limitaciones/implicaciones: El estudio utiliza solamente la herramienta de cálculo de la NOM-020-ENER-2011, que limita los resultados a la ganancia de calor y al cumplimiento sin considerar efectos como estratificación, inercia térmica, entre otras estrategias pasivas propias de las edificaciones estudiadas.
 5. Originalidad/valor: El estudio aporta evidencia cuantitativa en un contexto de clima extremo, centrada en variables poco exploradas en edificaciones de adobe, y genera criterios para la conservación y mejora térmica del patrimonio sin comprometer su autenticidad.
 6. Hallazgos/conclusiones: La información que se obtiene resulta útil tanto para nuevas edificaciones de adobe como para intervenciones en edificaciones patrimoniales orientadas a mejorar su desempeño térmico.

Palabras clave: Adobe; conductividad térmica; NOM-020-ENER-2011; ganancia de calor; edificaciones históricas.

INTRODUCCIÓN

En el marco de la crisis energética global, las edificaciones juegan un rol importante. El acelerado incremento de la demanda de electricidad para climatización plantea serios retos. Actualmente, las edificaciones, para operar, demandan alrededor del 30% del consumo total de energía (UNEP, 2024), y todavía se espera un incremento en los próximos años (Ouanes y Sriti, 2024). Para abordar esta cuestión, además de la necesaria transición en la producción de energía de combustibles fósiles a fuentes renovables y limpias, la estrategia a más corto plazo es la eficiencia energética. En el ámbito de las edificaciones, esta eficiencia puede lograrse, por un lado, a través de los equipos, es decir, los electrodomésticos, los sistemas de iluminación o los sistemas de climatización, ya sea para calentamiento o para enfriamiento.

- tivity analysis shows that variations in wall thickness produce more significant changes.
4. Limitations/implications: The study uses only the calculation tool from NOM-020-ENER-2011, which limits the results to heat gain and compliance with the standard without considering effects such as stratification, thermal inertia, among other passive strategies of the buildings studied.
 5. Originality/value: The study provides quantitative evidence in an extreme climate context, focusing on variables that are little explored in adobe buildings, and generates criteria for the conservation and thermal improvement of heritage without compromising its authenticity.
 6. Findings/conclusions: The information obtained is useful both for new adobe buildings and for interventions in heritage buildings aimed at improving their thermal performance.

Keywords: adobe; thermal conductivity; NOM-020-ENER-2011; heat gain; historic buildings.

Por otro lado, puede lograrse por la edificación en sí, es decir, por sus sistemas constructivos u otras estrategias pasivas que contribuyan a disminuir la necesidad de climatización artificial.

Gran parte de la investigación sobre edificaciones alrededor del mundo se enfoca en las estrategias pasivas, puesto que ofrecen soluciones prometedoras para mejorar el comportamiento térmico de las edificaciones (Kokatnur et al., 2025) y, por consiguiente, su eficiencia energética. Investigaciones recientes destacan que las estrategias pasivas relacionadas con los sistemas de muros y cubiertas –es decir, la envolvente– son las más frecuentemente estudiadas, puesto que son las más efectivas para aumentar las horas de confort y el ahorro energético (Kokatnur et al., 2025; Al-Assaad et al., 2025; Nie et al., 2025).

El estudio de las estrategias pasivas ha venido desarrollándose a través de modelos reales y

modelos numéricos. Los primeros modelos reales para experimentar estrategias se realizaron mayormente por medio de prototipos (e.g., Niles, 1976; Akbarzadeh et al., 1982; Erell y Etzion, 1996; Givoni, 1998), pero luego surgió otro enfoque que se caracteriza por analizar las estrategias pasivas directamente en edificaciones antiguas, tradicionales o vernáculas (e.g., Kimura y Yamazaki, 1982; Abro, 1994; Bodach et al., 2014; Foruzanmehr, 2015; Soleymanpour et al., 2015; Mohamed et al., 2019; Moscoso-García y Quesada-Molina, 2023). Estas edificaciones antiguas representan una fuente de conocimiento, puesto que tienen acumulados los saberes y técnicas desarrollados por cientos de años para optimizar los ambientes interiores (Izadpanahi et al., 2021), precisamente antes del uso de los sistemas de climatización artificial, y proporcionan muchos ejemplos de soluciones sin tener que recurrir al uso de energía. Sin embargo, las condiciones de vida actuales pueden no ser completamente compatibles con esas soluciones, además, la influencia de los entornos urbanos puede ocasionar efectos contrarios o que disminuyan la efectividad de las estrategias pasivas. Por ello, la necesidad de profundizar su estudio.

Las estrategias pasivas varían según las condiciones climáticas locales y las características del entorno. Una situación climática extrema, como la de la ciudad de Hermosillo, con un clima cálido seco, representa un mayor reto. Las estrategias pasivas, por sí solas, pueden resultar insuficientes para satisfacer las expectativas actuales de acondicionamiento ambiental, sin embargo, pueden contribuir a la reducción del uso de climatización artificial, reduciendo así el gran consumo de electricidad, pues en este sector el consumo anual de electricidad es 4,240 kWh/hab., sobrepasando 67% la media nacional que es 2,536.8 kWh/hab. (SENER, 2022).

En la zona centro-histórica de la ciudad de Hermosillo, existen edificaciones antiguas que, además de tener un valor patrimonial histórico y artístico, poseen características de adaptación al clima local, es decir, que emplean estrategias pasivas tales como las características de su envolvente, su forma, sus aberturas, su orientación,

sus elementos complementarios, etc. Gran parte de estas edificaciones está registrada en el Catálogo de Monumentos Históricos Inmuebles del Estado de Sonora (INAH, 2014). De las edificaciones enlistadas dentro del entorno urbano de Hermosillo, el 63% utiliza el sistema constructivo de muro de adobe.

El adobe es un material ampliamente utilizado en la arquitectura antigua de la región, al igual que es utilizado en otras regiones del mundo con condiciones similares de clima cálido seco. Sin embargo, aunque sea un sistema constructivo común desde la antigüedad hasta inicios del siglo XX, existe gran variabilidad en sus características, pues depende del tipo de suelo que se emplee para formar los adobes; del método o técnica de fabricación, puesto que de ello depende la densidad final que se logre debido a la cantidad de humedad y la compactación que se aplique; y del tipo y cantidad de material lignocelulósico que se agregue, puesto que también puede afectar la densidad y otras propiedades termofísicas y mecánicas. Además, el espesor del muro resultante también es un factor variable que es importante analizar.

Las cualidades del sistema constructivo de muro de adobe han sido destacadas por muchos estudios, pero gran parte de los estudios se enfoca en la optimización del sistema, proponiendo nuevas alternativas. Son pocos los estudios que analizan el patrimonio construido. Si bien es cierto que los estudios para lograr una caracterización completa de los adobes pueden ser invasivos, hay estudios que han aprovechado la deconstrucción o degradación de edificaciones antiguas para coleccionar adobes y analizarlos (e.g., Costa et al., 2019; Polidori et al., 2025).

El objetivo de este estudio es analizar el impacto que tienen el espesor de los muros y la conductividad térmica del adobe en el consumo energético de edificaciones históricas, a fin de generar información aplicable al diseño de nuevas construcciones y a estrategias de conservación del patrimonio. Para ello se propone un análisis de sensibilidad.

Los análisis de sensibilidad en el contexto edificación-energía resultan de gran ayuda porque permiten identificar qué factores o características de la edificación impactan más en el consumo energético. Esto brinda información muy valiosa para la toma de decisiones para futuros diseños de nuevas edificaciones o de rehabilitación o rescate de edificaciones existentes. Por ejemplo, Ouanes y Sriti (2024) realizan una investigación en la que evalúan distintos parámetros que potencialmente influyen en el consumo de energía de las edificaciones en un contexto urbano de clima cálido árido. Encuentran diversos parámetros que influyen, ya sea en la demanda de energía para climatizar o en el confort térmico de los usuarios, y uno de los parámetros que se repite, es decir, que influye tanto en la demanda de energía como en el confort térmico, es el espesor de los muros.

Por otra parte, la normatividad a nivel global, alineada además con los objetivos de la Agenda 2030, promueve la eficiencia energética no solamente de los equipos diversos, sino también de las edificaciones. En México, las normas oficiales mexicanas NOM-008-ENER-2001 y NOM-020-ENER-2011, correspondientes a eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales y habitacionales, respectivamente, tienen como objetivo limitar “la ganancia de calor de las edificaciones a través de su envolvente, con objeto de racionalizar el uso de la energía en los sistemas de enfriamiento” (DOF, 2011). Esta normativa proporciona una herramienta de cálculo que permite evaluar el ahorro energético que puede lograrse a través de la envolvente de una edificación dada en relación con una edificación de referencia, además de arrojar como resultado el cumplimiento o incumplimiento de la norma.

METODOLOGÍA

Como se mencionó anteriormente, existe un registro de las edificaciones consideradas monumentos históricos inmuebles construidas antes

o durante los primeros años del siglo XX, documentadas en el Catálogo de Monumentos Históricos Inmuebles del Estado de Sonora (INAH, 2014). A partir de los datos del catálogo, se seleccionaron las edificaciones ubicadas en el entorno urbano de la ciudad de Hermosillo, resultando un total de 109 edificaciones. De esas 109 edificaciones se capturaron en una hoja de cálculo de Excel los datos más relevantes para este estudio, incluyendo los datos de material principal del sistema constructivo de muro y de cubierta, el espesor de los muros, la forma de la cubierta y datos adicionales como la orientación de la fachada principal y el año de construcción, siempre que el dato estuviera disponible.

El 53% de las edificaciones seleccionadas utiliza el sistema constructivo de muro de adobe, el 35% de ladrillo, el 2% de piedra y el 10% restante está especificado como sistema constructivo de adobe combinado con ladrillo, que probablemente se deba a que las reparaciones del sistema de adobe se realizaron con ladrillo o que algunos de los muros son de adobe y otros de ladrillo.

Para el análisis de datos se tomó el 53% de las edificaciones cuyo sistema constructivo de muro es completamente de adobe. De los espesores de muro (L) se obtuvieron el mínimo y máximo observado y la mediana, que resultó igual a la moda y representa el espesor del 55% de las edificaciones de adobe (ver Tabla 1).

Tabla 1

Parámetros de espesor de las edificaciones con sistema constructivo de muro de adobe

Parámetro	Valor
Mínimo espesor observado	0.40 m
Máximo espesor observado	1.14 m
Mediana	0.60 m
Moda	0.60 m

Fuente: Elaboración propia con datos de INAH (2014).

Para obtener datos de las propiedades térmicas del adobe, se realizó una revisión del estado del arte con énfasis en el estudio de adobes de edificaciones antiguas. Tal como ya se comentó, se encontró una amplia variabilidad en las pro-

iedades de los adobes, principalmente en la conductividad térmica. En la Tabla 2 se enlistan los parámetros obtenidos del estado del arte, resaltando en negritas los datos mínimos y máximos observados y la mediana del total de datos, tanto de la conductividad térmica como de la densidad, de los adobes analizados en los diversos estudios seleccionados.

Posteriormente, se seleccionaron a conveniencia dos edificaciones de las cuales se pudieran obtener todos los datos necesarios y que tuvieran geometrías distintas para probar cómo funciona el mismo sistema constructivo en dos escenarios distintos. La Figura 1 muestra la planta y fachada de las dos edificaciones seleccionadas, donde puede observarse claramente la diferencia entre

Tabla 2
Parámetros de propiedades termofísicas y composición de adobes

Fuente	País	Conductividad térmica (W/m·K)	Densidad (kg/m ³)	Tipo de suelo	Paja
Chávez Galán (2009)	México	0.57	1307	----	----
Pérez-Sánchez et al. (2022)	México	0.21	----	Arcilla inorgánica de plasticidad alta	10% Pasto
Charai et al. (2022)	Marruecos	0.77	1985	6.5 % arena, 45 % limo y 48.5 % arcilla	0%
		0.46	1787	6.5 % arena, 45 % limo y 48.5 % arcilla	4% Pennisetum setaceum
		0.33	1303	6.5 % arena, 45 % limo y 48.5 % arcilla	8% Pennisetum setaceum
Alioui et al. (2024)	Marruecos	0.57	1936	Arcilla de alta plasticidad	0%
		0.41	1701	Arcilla de alta plasticidad	1% paja de trigo
		0.36	1587	Arcilla de alta plasticidad	2% paja de trigo
		0.35	1438	Arcilla de alta plasticidad	3% paja de trigo
		0.29	1393	Arcilla de alta plasticidad	3% paja de trigo
Cabrera et al. (2023)	Chile	0.43	1352	Arcilla de baja plasticidad (CL) 96.5%	3.5% paja de trigo
Costi del Castillo et al. (2021)	Chipre	0.42	1479	Arcilla de media plasticidad	1% paja de trigo
		0.30	1189	Arcilla de media plasticidad	2% paja de trigo
Zra Mha et al. (2025)	Camerún	1.23	----	Arcilla limosa de plasticidad media	0%
		1.05	----	Arcilla limosa de plasticidad media	0.2% Hyperhénia hirta
		0.73	----	Arcilla limosa de plasticidad media	1% Stipa offneri
Polidori et al. (2025)	Francia	0.70	1679	Suelos a base de silicato o piedra caliza	----

Fuente: Elaboración propia.

las geometrías: la edificación E1 con una planta rectangular con fachada principal al norte (ver Figura 1a) y la edificación E2 en forma de U con patio central y fachada principal al sur (ver Figura 1b). Obtenidos todos los datos necesarios de la geometría de cada una de las edificaciones seleccionadas, se procedió a vaciarlos en una hoja de cálculo de Excel para calcular las áreas de todos los elementos de la envolvente, es decir, muros, cubiertas, puertas y ventanas, que son necesarios como variables de entrada en la herramienta de cálculo a utilizar.

Por otra parte, con los datos de las tablas 1 y 2 se definieron las combinaciones de variables de espesor de muro y conductividad térmica para conformar los sistemas constructivos de muro de adobe a analizar. La Tabla 3 muestra las 9 combinaciones resultantes. Se considera el muro con aplanados de mortero de cal al exterior de 0.02 m de espesor y conductividad térmica de 0.872 W/m·K y de mortero de cal al interior de 0.02 m de espesor y conductividad térmica de 0.698 W/m·K, datos tomados del apéndice D informativo que proporciona la norma (DOF, 2011). El espesor de la capa de adobe (L_{adobe}) es $L_{\text{adobe}} = L - 0.04$ m, donde L es el espesor del muro.

Tabla 3

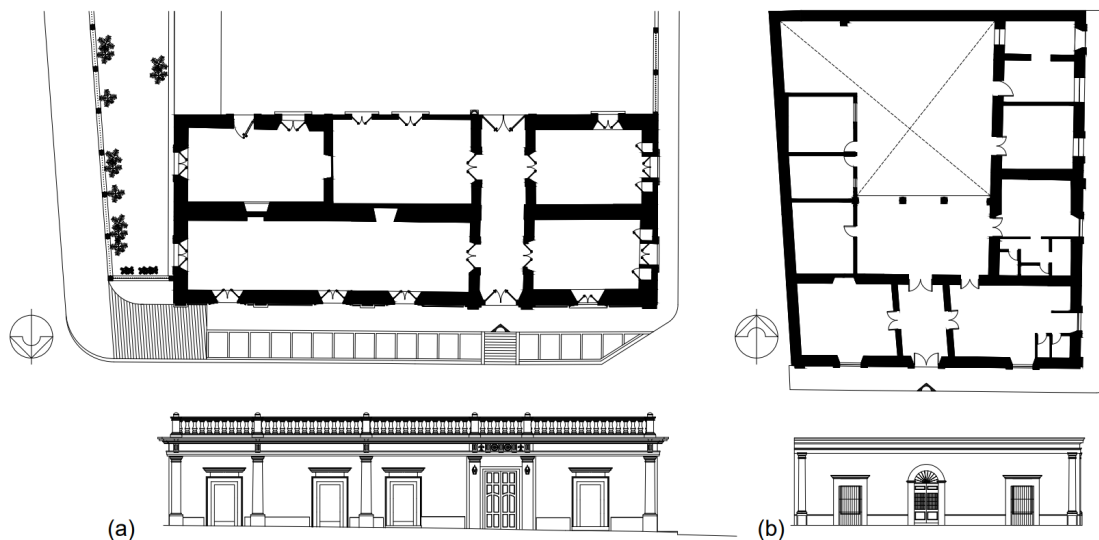
Sistemas constructivos de muro de adobe a analizar

Sistema	Espesor del muro L [m]	Conductividad térmica del adobe [W/m·K]
D1-K-1	0.40	0.21
D1-K-2	0.40	0.43
D1-K-3	0.40	1.23
D2-K-1	0.60	0.21
D2-K-2	0.60	0.43
D2-K-3	0.60	1.23
D3-K-1	1.14	0.21
D3-K-2	1.14	0.43
D3-K-3	1.14	1.23

Fuente: Elaboración propia con datos de INAH (2014), Pérez-Sánchez et al. (2022), Cabrera et al. (2023) y Zra Mha et al. (2025).

Los sistemas constructivos de cubierta se definieron con base en el sistema más frecuentemente utilizado en las edificaciones seleccionadas del catálogo. Este sistema está conformado por vigería de madera, entablado y terrado. Alrededor del 40% de las edificaciones seleccionadas tiene ese sistema. También son frecuentes otros dos sistemas muy similares, que en lugar del entablado tienen enladrillado o carrizo, en el 27% y 10% de las edificaciones, respectivamen-

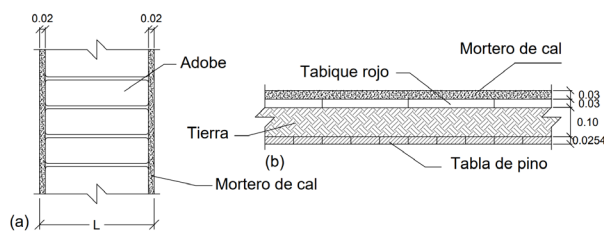
Figura 1
Edificaciones seleccionadas: E1 (a) y E2 (b)



Fuente: Elaboración propia con datos de INAH (2014) y Centro INAH Sonora (2025).

te. Además de los datos del catálogo, se realizó observación in situ de algunas edificaciones, sobre todo de algunas que se encuentran en estado de degradación y quedan expuestos los sistemas constructivos. Esto último para definir con mayor precisión los componentes de los sistemas constructivos y los espesores de cada capa. En la Figura 2 se presenta el corte genérico del sistema constructivo de muro de adobe (ver Figura 2a) y el corte del único sistema constructivo de la cubierta de entablado y terrado (Figura 2b) utilizado en todas las configuraciones. De exterior a interior, el sistema de cubierta está compuesto por mortero de cal al exterior con conductividad térmica de 0.872 W/m·K, tabique rojo cocido común con conductividad térmica de 0.872 W/m·K, tierra con conductividad térmica de 0.51 W/m·K y tabla de pino con conductividad térmica de 0.162 W/m·K (DOF, 2011; Nikiforova et al., 2013).

Figura 2
Cortes de los sistemas constructivos de muro (a) y cubierta (b)



Finalmente, teniendo definidas todas las variables de entrada, tanto de la geometría como de los sistemas constructivos, se procedió a ingresarlas a la herramienta de cálculo de la NOM-020-ENER-2011. Se realizó un total de 18 corridas de cálculo, 9 para cada edificación seleccionada.

Tabla 4
Resultados de las 9 corridas de cálculo de la edificación E1

L	K_{adobe}	U_{sc}	Ganancia total - edificación de referencia	Ganancia total - edificación evaluada	Ahorro de energía
[m]	[W/m·K]	[W/m ² ·K]	[W]	[W]	[%]
0.40	0.21	0.51	10414.57	13851.75	-33.00
0.40	0.43	0.92	10414.57	14915.99	-43.00
0.40	1.23	1.84	10414.57	17278.17	-66.00
0.60	0.21	0.34	10414.57	13434.99	-29.00
0.60	0.43	0.64	10414.57	14208.96	-36.00
0.60	1.23	1.41	10414.57	16191.89	-55.00
1.14	0.21	0.18	10414.57	13021.89	-25.00
1.14	0.43	0.36	10414.57	13469.04	-29.00
1.14	1.23	0.87	10414.57	14798.30	-42.00

Nota: L = espesor del muro, K_{adobe} = conductividad térmica del adobe, U_{sc} = coeficiente global de transferencia de calor del sistema constructivo.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5
Resultados de las 9 corridas de cálculo de la edificación E2

L	K_{adobe}	U_{sc}	Ganancia total - edificación de referencia	Ganancia total - edificación evaluada	Ahorro de energía
[m]	[W/m·K]	[W/m ² ·K]	[W]	[W]	[%]
0.40	0.21	0.51	11718.53	13401.82	-14.00
0.40	0.43	0.92	11718.53	14920.96	-27.00
0.40	1.23	1.84	11718.53	18326.04	-56.00
0.60	0.21	0.34	11718.53	12786.44	-9.00
0.60	0.43	0.64	11718.53	13902.04	-19.00
0.60	1.23	1.41	11718.53	16760.26	-43.00
1.14	0.21	0.18	11718.53	12191.17	-4.00
1.14	0.43	0.36	11718.53	12835.53	-10.00
1.14	1.23	0.87	11718.53	14751.53	-26.00

Nota: L = espesor del muro, K_{adobe} = conductividad térmica del adobe, U_{sc} = coeficiente global de transferencia de calor del sistema constructivo.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Para este estudio, la herramienta de cálculo utilizada proporciona 4 variables de salida por corrida de cálculo, que son el coeficiente global de transferencia de calor del sistema constructivo (U_{sc}) ingresado, como se definió en la Tabla 3, la ganancia total de la edificación de referencia, la ganancia total de la edificación evaluada y el porcentaje de ahorro de energía que la edificación evaluada logra con las variables de entrada ingresadas. En las tablas 4 y 5 se presentan las variables de salida para las edificaciones E1 y E2, respectivamente.

REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Se llevó a cabo una regresión lineal múltiple para evaluar el efecto simultáneo de las variables de conductividad térmica del adobe (K_{adobe}) y espesor del muro (L) sobre la variable de ganancia térmica. Se obtuvo para los dos casos de las edificaciones evaluadas un coeficiente de correlación lineal ajustado (R^2 ajustado) de 0.92, lo que refleja una fuerte capacidad de predicción de las dos variables en conjunto. Así mismo, se realizó un gráfico de dispersión en 3D (Figuras 3 y 4) que permite ver cómo interactúan las tres variables de estudio y el plano de tendencia derivado de la

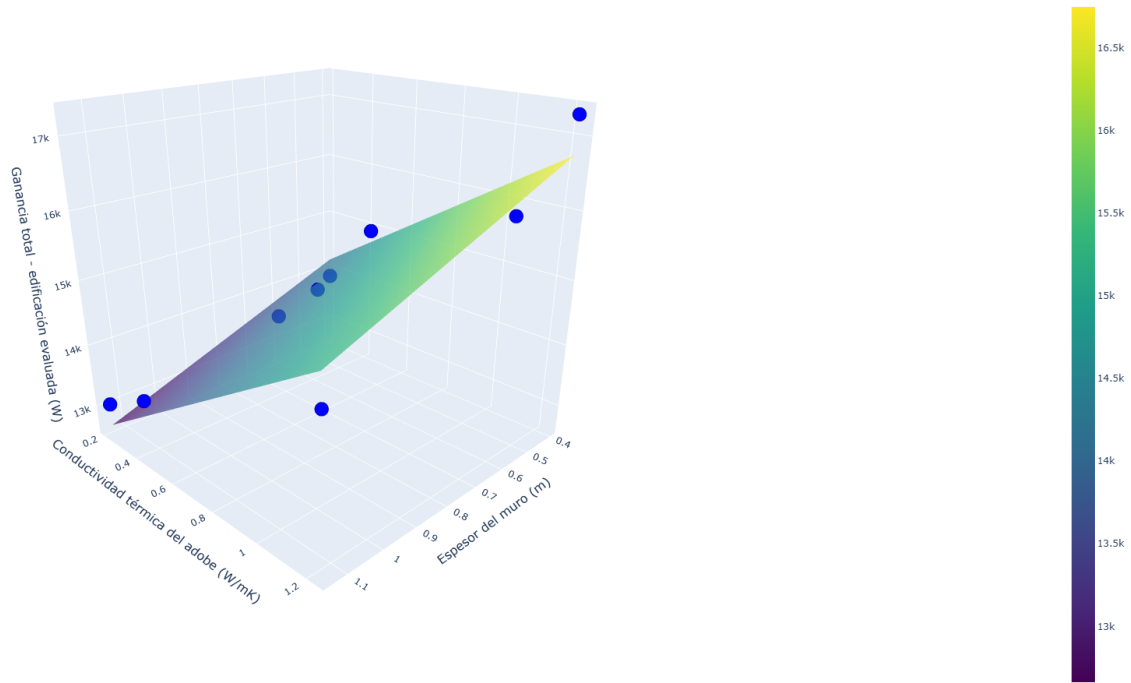
regresión lineal múltiple. Las fórmulas obtenidas de este análisis son las siguientes:

- Ganancia total $E_1 = -2023.48 \cdot L + 2537.64 \cdot K_{\text{adobe}} + 14436.17$
- Ganancia total $E_2 = -2921.72 \cdot L + 3654.25 \cdot K_{\text{adobe}} + 14236.99$

Aunque los coeficientes sugieren magnitudes de efecto comparables entre las dos variables independientes, sus unidades de medida son distintas; por ello, para evaluar su influencia relativa sin la interferencia de sus escalas, se calcularon coeficientes estandarizados (β estandarizados). Para ello, las tres variables fueron transformadas a puntuaciones Z y posteriormente se ajustó el modelo de regresión con los datos estandarizados. Los coeficientes obtenidos corresponden a los valores β estandarizados (β_{est}). Para ambas edificaciones, los coeficientes estandarizados fueron: $\beta_L = -0.48$, $\beta_{K_{\text{adobe}}} = 0.84$. Finalmente, con los valores absolutos de estos coeficientes se estimó la contribución relativa de cada variable independiente al modelo: 36% para el espesor del muro (L) y 64% para la conductividad térmica del adobe (K_{adobe}). Estos resultados indican que la conductividad térmica del material tiene un mayor peso en la predicción de la ganancia térmica en comparación con el espesor del muro.

Figura 3

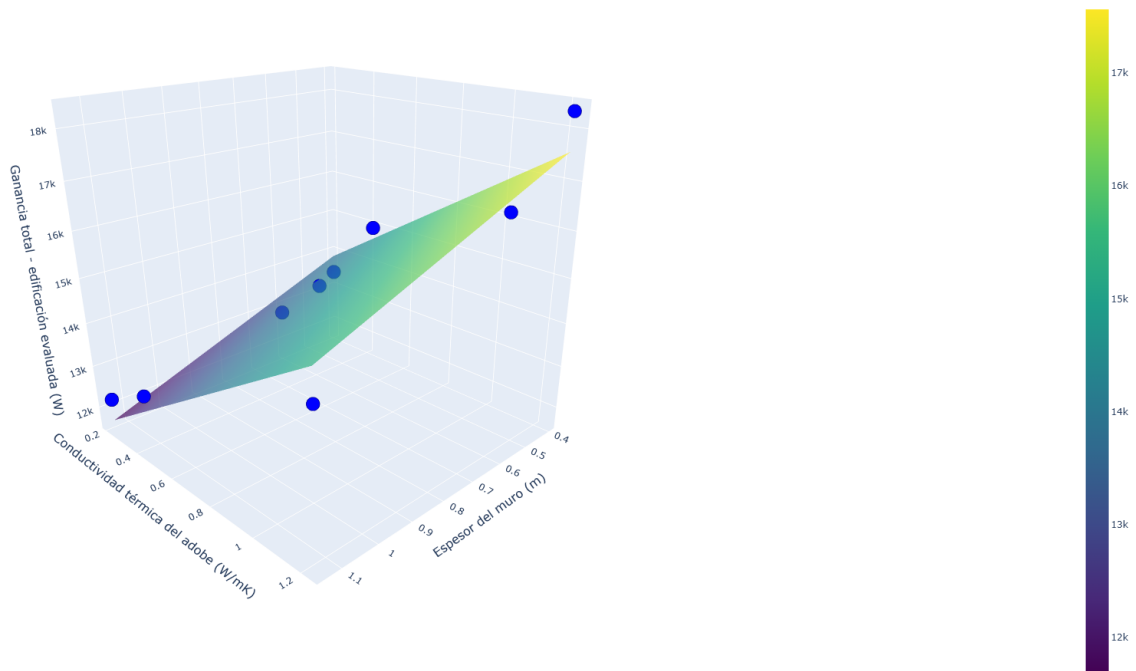
Gráfico de dispersión 3D para E1. Variables independientes: L y K_{adobe} , variable dependiente: ganancia total E_1



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4

Gráfico de dispersión 3D para E2. Variables independientes: L y K_{adobe} , variable dependiente: ganancia total E_2



Fuente: Elaboración propia.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para cuantificar la influencia relativa de los parámetros K_{adobe} y L sobre la ganancia térmica de la edificación. Para el análisis de sensibilidad de la conductividad térmica del adobe, se formaron grupos de tres escenarios que compartían el mismo valor de L , tomando como escenario base para cada grupo el que contenía una K_{adobe} de 0.43 W/m·K. Así mismo, para el análisis de sensibilidad del espesor del muro, se formaron grupos de tres escenarios que compartían la misma K_{adobe} ,

tomando como escenario base para cada grupo el que contenía una L de 0.60 m.

Para calcular la variación porcentual de cada variable $-L$, K_{adobe} y ganancia total de la edificación evaluada- (%fj), se utilizó la fórmula $\%fj = ((X_i - X_{\text{base}}) / X_{\text{base}}) \cdot 100$. Posteriormente, la sensibilidad se obtuvo dividiendo la variación porcentual de la ganancia térmica total entre la variación porcentual de la variable analizada $-L$ o K_{adobe} -: Sensibilidad = $\%fj_{\text{Ganancia}} / \%fj_{\text{Variable}}$. Dichos resultados se muestran en las Tablas 6, 7, 8 y 9.

Tabla 6
Resultados del análisis de sensibilidad de conductividad térmica del adobe para E1

L	K_{adobe}	Ganancia total - edificación evaluada	%Δconductividad	%Δganancia	Sensibilidad _{conductividad}
[m]	[W/m·K]	[W]			
0.4	0.21	13851.75	-51%	-7%	14%
0.4	0.43	14915.99	0%	0%	----
0.4	1.23	17278.17	186%	16%	9%
0.6	0.21	13434.99	-51%	-5%	11%
0.6	0.43	14208.96	0%	0%	----
0.6	1.23	16191.89	186%	14%	8%
1.14	0.21	13021.89	-51%	-3%	6%
1.14	0.43	13469.04	0%	0%	----
1.14	1.23	14798.3	186%	10%	5%
				Promedio	9%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7
Resultados del análisis de sensibilidad de espesor de muro para E1

L	K_{adobe}	Ganancia total - edificación evaluada	%Δespesor	%Δganancia	Sensibilidad _{espesor}
[m]	[W/m·K]	[W]			
0.4	0.21	13851.75	-33%	3%	-9%
0.6	0.21	13434.99	0%	0%	----
1.14	0.21	13021.89	90%	-3%	-3%
0.4	0.43	14915.99	-33%	5%	-15%
0.6	0.43	14208.96	0%	0%	----
1.14	0.43	13469.04	90%	-5%	-6%
0.4	1.23	17278.17	-33%	7%	-20%
0.6	1.23	16191.89	0%	0%	----
1.14	1.23	14798.3	90%	-9%	-10%
				Promedio	-11%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8
Resultados del análisis de sensibilidad de conductividad térmica del adobe para E2

L	K _{adobe}	Ganancia total - edificación evaluada	%Δconductividad	%Δganancia	Sensibilidad _{conductividad}
[m]	[W/m·K]	[W]			
0.4	0.21	13401.82	-51%	-10%	20%
0.4	0.43	14920.96	0%	0%	----
0.4	1.23	18326.04	186%	23%	12%
0.6	0.21	12786.44	-51%	-8%	16%
0.6	0.43	13902.04	0%	0%	----
0.6	1.23	16760.26	186%	21%	11%
1.14	0.21	12191.17	-51%	-5%	10%
1.14	0.43	12835.53	0%	0%	----
1.14	1.23	14751.53	186%	15%	8%
				Promedio	13%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9
Resultados del análisis de sensibilidad de espesor de muro para E2

L	K _{adobe}	Ganancia total - edificación evaluada	%Δespesor	%Δganancia	Sensibilidad _{espesor}
[m]	[W/m·K]	[W]			
0.4	0.21	13401.82	-33%	5%	-14%
0.6	0.21	12786.44	0%	0%	----
1.14	0.21	12191.17	90%	-5%	-5%
0.4	0.43	14920.96	-33%	7%	-22%
0.6	0.43	13902.04	0%	0%	----
1.14	0.43	12835.53	90%	-8%	-9%
0.4	1.23	18326.04	-33%	9%	-28%
0.6	1.23	16760.26	0%	0%	----
1.14	1.23	14751.53	90%	-12%	-13%
				Promedio	-15%

Fuente: Elaboración propia.

De manera similar, para el análisis derivado de la regresión lineal múltiple, los valores positivos de sensibilidad respecto a la conductividad térmica indican que, a mayor conductividad térmica, mayor ganancia de calor. En cambio, los valores positivos de sensibilidad respecto al espesor del muro indican que, a mayor espesor del muro, menor ganancia de calor. Los promedios de la sensibilidad respecto a la conductividad térmica son de 9% para E1 y de 13% para E2, lo que refleja una influencia significativa de dicha variable en la ganancia de calor. Los promedios de la sensibilidad respecto al espesor del muro son de -11%

para E1 y de -15% para E2, siendo estos valores también significativos. Se puede observar que los valores absolutos de los promedios de la sensibilidad son similares, pero la sensibilidad respecto al espesor del muro es ligeramente mayor. Esto significa, dentro de los rangos analizados de las dos variables, que variar el espesor del muro tiene mayor influencia en la ganancia térmica que variar la conductividad. Pensando en nuevas edificaciones, ya que la diferencia en sensibilidad entre las dos variables no es grande, se deberán considerar otros factores como la resistencia de los materiales, las implicaciones para el diseño de

la estructura de utilizar muros más gruesos y/o pesados, los costos, etc., para definir si priorizar un muro de adobe con más espesor o adobes con menor coeficiente de conductividad térmica.

CUMPLIMIENTO DE LA NOM-020-ENER-2011

Los resultados expuestos en las tablas 4 y 5 muestran claramente que las dos combinaciones de máximos y mínimos observados de espesor y conductividad térmica resultan en el mayor y menor valor U_{sc} y, por consiguiente, en el mayor y menor ahorro de energía, como era lo esperado. Por otra parte, la combinación de los dos valores de medianas resulta en un valor $U_{sc} = 0.64 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, que se asemeja al coeficiente global de transferencia de calor del sistema constructivo de muro de la edificación de referencia que arroja la herramienta de cálculo con un valor $U_{sc} = 0.625 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, cuyos detalles de sistema constructivo no se especifican. Sin embargo, la ganancia total de la edificación analizada sigue estando por encima de la edificación de referencia. Esto sucede debido a que el sistema constructivo de la cubierta ingresado tiene un valor $U_{sc} = 1.54 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 146.4% más alto que el $U_{sc} = 0.625 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ de la edificación de referencia.

Esta situación hace que las edificaciones históricas analizadas utilizando las 9 combinaciones de espesor y conductividad no logren el cumplimiento de la NOM-020-ENER-2011. Sin embargo, identificada la variable que está incrementando la ganancia, en este estudio se propone una mejora al sistema constructivo de cubierta para analizar la posibilidad de cumplimiento de la norma.

Con la intención de evitar los sistemas aislantes comunes, como el EPS o XPS, se buscó una alternativa más sustentable y acorde al tipo de edificaciones analizadas. Se encontró la propuesta de Jové-Sandoval et al. (2024) de unos paneles ligeros fabricados con paja de trigo y tierra que tienen la intención de optimizar el comportamiento térmico de un sistema constructivo base tierra. Para este estudio, los paneles se aplican para optimizar el sistema constructivo de cubierta, es decir, se adicionan al sistema ya existente, además de una capa de concreto celular como

acabado exterior para proteger los paneles, quedando como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10

Características del sistema constructivo de cubierta optimizado con dos capas adicionales exteriores

Material	Espesor [m]	Conductividad térmica [W/m·K]
Concreto celular	0.0300	0.2517
Panel de paja con tierra	0.0700	0.0500
Mortero de cal al exterior	0.0300	0.8720
Tabique rojo cocido común al exterior	0.0300	0.8720
Suelo franco y arcillas (10% de humedad)	0.1000	0.5100
Madera de Pino (12% de humedad)	0.0254	0.1620

Fuente: Elaboración propia con datos de DOF (2011), Nikiforova et al. (2013), Jové-Sandoval et al. (2024) y Borbón-Almada et al. (2020).

El sistema constructivo de cubierta optimizado logra un valor $U_{sc} = 0.4615 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, quedando por debajo del de la edificación de referencia. Aplicado a las edificaciones analizadas, esto se refleja no sólo en el cumplimiento de la norma, sino en el ahorro energético que se logra, variando según la configuración de los muros (ver Tabla 11).

Tabla 11

Ahorro energético de E1 y E2 sin y con optimización del sistema constructivo de cubierta

Sistema	Ahorro de energía sin optimización [%]		Ahorro de energía con optimización [%]	
	E1	E2	E1	E2
D1-K-1	-33.00	-14.00	35.00	29.00
D1-K-2	-43.00	-27.00	25.00	16.00
D1-K-3	-66.00	-56.00	3.00	-13.00
D2-K-1	-29.00	-9.00	39.00	34.00
D2-K-2	-36.00	-19.00	32.00	25.00
D2-K-3	-55.00	-43.00	13.00	0.00
D3-K-1	-25.00	-4.00	43.00	39.00
D3-K-2	-29.00	-10.00	39.00	34.00
D3-K-3	-42.00	-26.00	26.00	17.00

Fuente: Elaboración propia.

Para E1, la optimización funciona para que la edificación logre cumplir la norma y obtener un ahorro energético adicional. Sin embargo, para E2 el ahorro energético que se obtiene es menor y, para la combinación menos favorable de espesor y conductividad térmica de muro, la optimización resulta insuficiente para lograr el cumplimiento de la norma. Esto se debe a la diferencia de la geometría entre las dos edificaciones. E1 tiene una mayor relación entre la superficie de cubierta respecto a la superficie de muro con una proporción de 0.92, lo que significa que la superficie de cubierta es muy similar a la de muros, por lo que la optimización del sistema constructivo de la cubierta tiene un mayor impacto en el comportamiento térmico con respecto a E2, cuya proporción es de 0.54, lo que significa que la superficie de muros casi duplica la de la cubierta, por lo que la optimización no resulta tan significativa como la que se obtiene para E1.

Esta posibilidad representa una ventaja para las intervenciones de rehabilitación o rescate de edificaciones existentes, como las históricas y artísticas, puesto que se puede intervenir sin modificar el sistema constructivo de muro, es decir, sin tener que recurrir a la modificación de la fachada para mejorar el desempeño térmico de la edificación y cumplir con la normativa.

CONCLUSIONES

Con el fin de profundizar en la influencia de las variables de espesor de muro y conductividad térmica del adobe sobre la ganancia de calor de edificaciones históricas en clima extremo, se abordó este estudio mediante dos enfoques: un análisis correlacional y un análisis de sensibilidad.

Para correlacionar las variables, se realizó una regresión lineal múltiple que arrojó que, dentro del rango de datos estudiados y considerando la correlación entre las variables, la conductividad térmica del adobe sobresale como un factor con mayor peso estadístico en la predicción de la ganancia de calor. Por otra parte, el análisis de sensibilidad arrojó que el espesor del muro es

el parámetro que provoca mayor variación en la ganancia total de calor cuando se perturba de manera independiente, incluso por encima de la influencia de la conductividad térmica. Esto sugiere que el sistema constructivo de muro de adobe es sensible a cambios geométricos, puesto que al aumentar o reducir el espesor se altera la resistencia térmica y el tiempo de retardo del flujo de calor a través del muro. Es decir, esta característica geométrica está directamente relacionada con la inercia térmica del sistema constructivo de muro de adobe, propiedad importante en el contexto, pues permite mantener la temperatura interior estable durante el día, a pesar de las amplias fluctuaciones exteriores. Entonces, las modificaciones en el espesor del muro, aunque puedan ser pequeñas, resultarán en cambios más significativos en la ganancia de calor que modificaciones equivalentes en la conductividad térmica del adobe.

En conclusión, los dos enfoques de análisis ofrecen perspectivas distintas pero complementarias para explicar mejor el comportamiento térmico del sistema constructivo de muro de adobe. Por un lado, el análisis correlacional identifica a la conductividad térmica del adobe como el factor preponderante por ser más coherente estadísticamente para explicar la ganancia de calor con los valores estudiados. Mientras que el análisis de sensibilidad demuestra que el espesor del muro, como parámetro físico/geométrico, tiene mayor capacidad para modificar la ganancia de calor resultante, independientemente de la conductividad térmica del adobe.

Adicionalmente al comportamiento térmico del sistema constructivo de muro de adobe, dado que una de las variables de salida que arroja la herramienta de cálculo es el porcentaje de ahorro de energía, que es un indicador del cumplimiento de la norma, se analizó la situación debido a que con ninguna de las configuraciones de muro se lograba dicho cumplimiento. Se concluyó al respecto que el sistema constructivo de la cubierta, que también es un sistema base tierra como el de los muros, probablemente por limitaciones estructurales, no logra el espesor suficiente para

resistir adecuadamente –de manera similar a los muros– la ganancia de calor. Esta situación pone en desventaja al sistema tradicional de cubierta ante la norma, por lo que se propuso una optimización acorde a dicho sistema y se obtuvieron resultados favorables, no sólo de cumplimiento, sino logrando adicionalmente un ahorro energético. Estos resultados ofrecen una solución viable para las intervenciones en edificaciones patrimoniales con una alternativa sustentable y en cumplimiento de la normativa.

REFERENCIAS

- Abro, R. S. (1994). Low energy architecture: Recognition of passive cooling techniques. *Renewable Energy*, 5(5-8), 1143-1146. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)90142-2](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90142-2)
- Akbarzadeh, A., Charters, W. W. S. y Lesslie, D. A. (1982). Thermocirculation characteristics of a Trombe wall passive test cell. *Solar Energy*, 28(6), 461-468. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(82\)90317-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(82)90317-6)
- Al-Assaad, D., Sengupta, A., An, P., Breesch, H., Afshari, A., Amaripadath, D., Attia, S., Baba, F., Corrado, V., Eli, L., Krelling, A. F., Lee, S. H., Levinson, R., Olinger, M., Tootkaboni, M. P., Wang, L., Zhang, C. y Zinzi, M. (2025). Resilient passive cooling strategies during heat waves: A quantitative assessment in different climates. *Building and Environment*, 274, 112698. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112698>
- Alioui, A., Kaitouni, S. I., Azalam, Y., Al armouzi, N., Bendada, E. M. y Mabrouki, M. (2024). Effect of straw fibers addition on hygrothermal and mechanical properties of carbon-free adobe bricks: From material to building scale in a semi-arid climate. *Building and Environment*, 255, 111380, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111380>
- Bodach, S., Lang, W. y Hamhaber, J. (2014). Climate responsive building design strategies of vernacular architecture in Nepal. *Energy and Buildings*, 81, 227-242. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.022>
- Borbon-Almada, A. C., Lucero-Alvarez, J., Rodriguez-Muñoz, N. A., Ramirez-Celaya, M., Castro-Brockman, S., Sau-Soto, N. y Najera-Trejo, M. (2020). Design and Application of Cellular Concrete on a Mexican Residential Building and Its Influence on Energy Savings in Hot Climates: Projections to 2050. *Applied Sciences*, 10(22), 8225. <https://doi.org/10.3390/app10228225>
- Cabrera, S., Guillarducci, A., González, D. y Suárez, M. (2023). Evaluation of the thermal conductivity and transmittance coefficient of earthen constructive elements. *Revista Hábitat Sustentable*, 13(1), 8-19. <https://doi.org/10.22320/07190700.2023.13.01.01>
- Centro INAH Sonora (2025). *Planos de plantas, fachadas y detalles* [Archivo DWG]. Hermosillo, México.
- Charai, M., Salhi, M., Horma, O., Mezrhab, A., Karri, M. y Amraoui, S. (2022). Thermal and mechanical characterization of adobes bio-sourced with Pennisetum setaceum fibers and an application for modern buildings. *Construction and Building Materials*, 326, 1268091, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126809>
- Chávez Galán, J. (2009). *Evaluación experimental de propiedades térmicas de materiales de construcción nacionales y desarrollo de ventanas ahorradoras de energía*. Tesis de Doctorado, UNAM.
- Costa, C., Arduin, D., Rocha, F. y Velosa, A. (2019). Adobe Blocks in the Center of Portugal: Main Characteristics. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(3), 467-478. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1627442>
- Costi del Castrillo, M., Ioannou, I. y Philokyrou, M. (2021). Reproduction of traditional adobes using varying percentage contents of straw and sawdust. *Construction and Building Materials*, 294, 123516, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123516>
- Diario Oficial de la Federación (2011). NORMA Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones. *Envolvente de edificios para uso habitacional*. <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4459/sener1.htm>
- Foruzanmehr, A. (2015). People's perception of the loggia: A vernacular passive cooling system in Iranian architecture. *Sustainable Cities and Society*, 19, 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.002>
- Erell, E. y Etzion, Y. (1996). Heating experiments with a radiative cooling system. *Building and Environment*, 31(6), 509-517. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(96\)00030-3](https://doi.org/10.1016/0360-1323(96)00030-3)

- Givoni, B. (1998). Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. *Energy and Buildings*, 28(1), 25-32. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00056-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00056-X)
- Instituto Nacional de Antropología e Historia (2014). *Catálogo de monumentos históricos inmuebles: Estado de Sonora*. México: INAH.
- Izadpanahi, P., Mahmoudi Farahani, L. y Nikpey, R. (2021). Lessons from Sustainable and Vernacular Passive Cooling Strategies Used in Traditional Iranian Houses. *Journal of Sustainability Research*, 3(3). <https://doi.org/10.20900/jsr20210014>
- Jové-Sandoval, F., García-Baños, E. M. y Barbero-Barrera, M. M. (2024). Characterisation and thermal improvement of adobe walls from earth-straw lightweight panels. *MRS Advances*, 9(2), 71-77. <https://doi.org/10.1557/s43580-023-00630-1>
- Kimura, K. y Yamazaki, K. (1982). Passive cooling performance of thatched roofs in traditional Japanese vernacular houses. In A. Bowen y R. Wagner, *Passive and Low Energy Alternatives I: Proceedings of the First International PLEA Conference*. Bermuda: Pergamon Press, 3-1-3-7. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-029405-6.50015-5>
- Kokatnur, T., Ferreira, S., Akkoç, B. K., Markarian, E., Nojedehi, P., Qiblawi, S., Sewraj, K., Gunay, B., O'Brien, W., Papineau, M., Schweiker, M., Ulukavak Harputlugil, G. y Azar, E. (2025). A review of passive design strategies and their effect on thermal resilience in low-income households. *Energy and Buildings*, 348, 116508. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116508>
- Mohamed, M., Klingmann, A. y Samir, H. (2019). Examining the Thermal Performance of Vernacular Houses in Asir Region of Saudi Arabia. *Alexandria Engineering Journal*, 58(2), 419-428. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.03.004>
- Moscoso-García, P. y Quesada-Molina, F. (2023). Analysis of Passive Strategies in Traditional Vernacular Architecture. *Buildings*, 13(8), 1984. <https://doi.org/10.3390/buildings13081984>
- Nie, Y., Luo, M., Liu, J. y Wu, Z. (2025). Assessment of passive climate-responsive strategies in vernacular Yinzi building: A case study in China's hot-summer and cold-winter climate. *Energy and Buildings*, 347(A), 116274. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116274>
- Nikiforova, T., Savytskyi, M., Limam, K., Bosschaerts, W. y Belarbi, R. (2013). Methods and results of experimental researches of thermal conductivity of soils. *Energy Procedia*, 42, 775-783. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.12.034>
- Niles, P. W. B. (1976). Thermal evaluation of a house using a movable-insulation heating and cooling system. *Solar Energy*, 18(5), 413-419. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(76\)90007-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(76)90007-4)
- Ouanes, S. y Sriti, L. (2024). Regression-based sensitivity analysis and multi-objective optimisation of energy performance and thermal comfort: Building envelope design in hot arid urban context. *Building and Environment*, 248, 111099. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111099>
- Pérez-Sánchez, J. F., Chavez-Vega, F. R., Calvillo-Villicaña, M. E., Suárez Domínguez, K., Estrada Castro, K. E., Luna-Domínguez, J. H. y Gallejos-Villela, R. (2022). Thermal conductivity prediction and comfort in adobe housing in Tamaulipas. *Cogent Engineering*, 9(1), 1-8. <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2109321>
- Polidori, G., Aras-Gaudry, A., Rousse, C., Beaumont, F., Bogard, F., Murer, S., Moussa, T., Bliard, C., Fronteau, G. y Hamard, E. (2025). Analysis of adobes from vernacular raw earth buildings in Campagne region (France). *Construction and Building Materials*, 470, 140582, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140582>
- Secretaría de Energía (2022). *Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2022-2036*. México: SENER. <https://www.gob.mx/cenace/documentos/programa-para-el-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2022-2036>
- Soleymanpour, R., Parsaee, N. y Banaei, M. (2015). Climate Comfort Comparison of Vernacular and Contemporary Houses of Iran. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 201, 49-61. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.08.118>
- United Nations Environment Programme UNEP (2024). *Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. Nairobi: UNEP. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>
- Zra Mha, B., Dawoua Kaoutoing, M., Moubeké, C. A., Lemanle Sanga, R. P., Doko, V. y Ntamack, G. E. (2025). Thermophysical characterization of adobes stabilized with natural fibers. *Construc-*

tion and building materials, 502, 144439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144439>

Financiamiento.

La presente investigación no recibió financiamiento específico.

Conflicto de interés.

Los autores declaran no tener conflictos de interés en relación con la investigación, la autoría y/o la publicación del presente artículo.

Uso de inteligencia artificial.

Los autores declaran que no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa en la elaboración del manuscrito o, en su caso, que su uso se limitó exclusivamente al apoyo lingüístico y de redacción, manteniendo en todo momento la responsabilidad sobre el contenido y las conclusiones del trabajo.

Contribución de autoría.

Los autores participaron en la conceptualización, desarrollo, análisis y redacción del manuscrito, de conformidad con los principios de la taxonomía CRediT (Contributor Roles Taxonomy), y aprobaron la versión final para su publicación.