

Diseño pasivo y propiedades ópticas: claves para la reducción de la carga térmica en viviendas de climas cálidos subhúmedos

Jordy Jose Alvarado-Pacheco ¹, Antonio José Cantún-May ², Román Alejandro Canul-Turriza ³ y Oscar de Jesús May-Tzuc ^{3,*}

¹ Docente, Academia de Energías Renovables, Tecnológico Nacional de México Campus Progreso, Boulevard Tecnológico de Progreso, S/N x 62, CP.97320, Progreso, Yucatán, México.

² Estudiante, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, Predio s/n por Av. Humberto Lanz Cárdenas, Fracc. Siglo XXIII, Av. Exhacienda Kala, C.P. 24085, San Francisco de Campeche, Campeche, México.

³ Docente, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, Predio s/n por Av. Humberto Lanz Cárdenas, Fracc. Siglo XXIII, Av. Exhacienda Kala, C.P. 24085, San Francisco de Campeche, Campeche, México.

* Autor de correspondencia: oscajmay@uacam.mx

Desarrollo Sustentable (Bioconstrucción)

Recibido: 23 de agosto de 2025 Aceptado: 2 de octubre de 2025 Publicado: 27 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.631>

Resumen: El sector de la edificación es uno de los principales consumidores de energía a nivel mundial, debido a la alta demanda de climatización necesaria para garantizar el confort térmico. En México, gran parte de las viviendas en climas cálidos carecen de aislamiento, lo que incrementa la dependencia de sistemas de aire acondicionado y, con ello, el consumo energético. Ante este panorama, resulta esencial evaluar el desempeño térmico de los elementos de la envolvente, considerando sus propiedades termofísicas y ópticas, así como la orientación de muros y techos. Este estudio empleó el software Opaque para simular techos y muros con distintas configuraciones constructivas y valores de absorptancia (0.1–0.9). Se analizaron tres sistemas de cubierta (convencional, con aislamiento de poliestireno expandido y con poliestireno extruido), así como muros orientados al norte, sur, este y oeste. El objetivo fue comparar la evolución horaria de la temperatura sol-aire y las ganancias de calor en condiciones representativas de climas cálidos. Los resultados muestran que los techos convencionales de concreto alcanzan temperaturas superficiales cercanas a 65 °C, con ganancias de calor superiores a 70 W/m². En contraste, la incorporación de aislamientos, especialmente de poliestireno extruido, reduce significativamente la transferencia térmica, con máximos inferiores a 35 W/m². Respecto a los muros, la orientación oeste resulta la más crítica, registrando temperaturas de hasta 65 °C y ganancias de calor superiores a 100 W/m², debido a la coincidencia de la radiación solar vespertina con las horas de mayor temperatura ambiental. Por el contrario, las orientaciones norte y sur presentaron un comportamiento más moderado, con menores cargas térmicas. En conclusión, la incorporación de aislamientos en techos y pinturas reflejantes en muros, particularmente en orientaciones críticas como la oeste, constituyen estrategias efectivas para mejorar el confort térmico y reducir el consumo energético en edificaciones de climas cálidos.

Palabras clave: Absorptancia solar, Diseño pasivo, Ecotecnologías, Temperatura sol-aire

Passive design and optical properties: keys to reducing thermal load in housing for warm subhumid climates

Abstract: The building sector is one of the largest consumers of energy worldwide, due to the high demand for air conditioning required to ensure thermal comfort. In Mexico, many homes in warm climates lack insulation, which increases dependence on air-conditioning systems and, consequently, energy consumption. In this context, it is essential to evaluate the thermal performance of building envelope elements, considering their thermophysical and optical properties, as well as the orientation of walls and roofs. This study used Opaque software to simulate roofs and walls with different construction configurations and absorptance values (0.1–0.9). Three roof systems were analyzed: conventional, with expanded polystyrene insulation, and with extruded polystyrene insulation, along with walls oriented to the north, south, east, and west. The objective was to compare the hourly evolution of surface-air temperature and heat gains under conditions representative of warm climates. Results show that conventional concrete roofs reach surface temperatures close to 65 °C, with heat gains exceeding 70 W/m². In contrast, the incorporation of insulation, particularly extruded polystyrene, significantly reduces thermal transfer, with maximum heat gains below 35 W/m². Regarding walls, the west orientation is the most critical, registering temperatures up to 65 °C and heat gains above 100 W/m², due to the coincidence of afternoon solar radiation with peak ambient temperatures. Conversely, north- and south-facing walls exhibited more moderate behavior, with lower thermal loads. In conclusion, the use of roof insulation and reflective wall coatings, particularly in critical orientations such as west, constitutes an effective strategy to improve thermal comfort and reduce energy consumption in buildings located in warm climates.

Keywords: Solar absorptance, Passive design, Ecotechnologies, Sol-air temperature

Introducción

De acuerdo con el informe 2024 de la Agencia Internacional de Energía (IEA), el sector de la edificación representa el 28 % del consumo final de energía a nivel mundial, lo que lo posiciona como el segundo mayor consumidor, solo detrás de la industria, que concentra un 38 % (IEA, 2024). Este elevado consumo se atribuye principalmente a los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), indispensables para mantener condiciones de confort térmico en los espacios interiores. En respuesta a esta situación, en los últimos años numerosos países han implementado normativas de eficiencia energética en el sector de la edificación, con el objetivo de reducir el consumo excesivo de energía. En este contexto, varios países han desarrollado regulaciones específicas para optimizar el uso de la energía en edificios (UNEP & GlobalABC, 2024).

Un ejemplo es México, donde desde 2011 está vigente la norma NOM-020-ENER-2011, que regula la ganancia de calor a través de la envolvente en edificaciones residenciales (NOM-020-ENER-2011, 2011). No obstante, el consumo energético de una vivienda está influenciado por múltiples factores, entre los que se incluyen la eficiencia de los equipos instalados, el número de ocupantes, los patrones y hábitos de uso, las condiciones climáticas de la región y las características constructivas. Cabe señalar que, aunque esta norma representa un avance significativo, se enfoca exclusivamente en la regulación de la ganancia de calor mediante la envolvente térmica, sin considerar otros aspectos relevantes como las propiedades ópticas de los materiales.

En este sentido, de acuerdo con un estudio realizado por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) y la Secretaría de Energía (SENER), el territorio mexicano se clasifica en dos grandes regiones climáticas: cálida, con temperaturas medias anuales entre 24 y 28 °C, y templada, con valores inferiores a dicho rango. A partir de esta clasificación, se estimó que las viviendas ubicadas en zonas de clima templado, que representan aproximadamente el 55 % de los usuarios, presentan un consumo promedio de alrededor de 1,000 kWh/año por vivienda. Por el contrario, las viviendas localizadas en regiones cálidas, que corresponden al 45 % de los usuarios, registran consumos superiores al doble, con un promedio de 2,300 kWh/año por vivienda (CONUEE & SENER, 2020).

Se estima que más del 35 % del consumo eléctrico del sector residencial en México se destina a lograr el confort térmico, principalmente mediante sistemas HVAC. A pesar de ello, el uso de aislamiento térmico en viviendas es escaso. Se calcula que aproximadamente el 95 % de las edificaciones carece de este recurso. La Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) clasifica al país en tres regiones climáticas: cálida extrema, templada y tropical. En la región cálida extrema, el 85 % de las viviendas no cuenta con aislamiento; en la región tropical, la cifra asciende a 98.5 %, convirtiéndola en la más vulnerable (INEGI, 2018; Rosas-Flores, 2020). Esta carencia incrementa la dependencia del aire acondicionado para alcanzar niveles de confort, lo que eleva significativamente el consumo energético.

En el sureste de México, la construcción de muros se realiza mayoritariamente con mampostería de block de concreto, mientras que en las losas predomina el sistema de vigueta y bovedilla. Ambos presentan alta conductividad térmica, condición poco adecuada para climas cálidos, ya que favorece la transferencia de calor hacia el interior. Ante esta problemática, resulta esencial impulsar ecotecnologías y estrategias bioclimáticas que, además de cumplir con la normativa, mejoren el desempeño térmico y favorezcan el confort interior (Jiménez Torres *et al.*, 2023).

Las ecotecnologías representan una alternativa eficaz para reducir tanto el consumo energético como los costos de operación (FIDE, 2022). Diversos estudios demuestran que la incorporación de aislamientos térmicos (Bashir & Leite, 2022), impermeabilizantes y acabados reflectivos (Han *et al.*, 2022) disminuye la ganancia de calor en el interior de las edificaciones, incrementando su eficiencia energética. Para maximizar su impacto, es recomendable integrarlos desde la fase de diseño. Asimismo, la orientación de la edificación influye de manera significativa en el ahorro energético (Galindo-Borbón *et al.*, 2024). Investigaciones recientes señalan que, en climas tropicales, el uso de recubrimientos reflectivos puede superar el desempeño de los aislamientos térmicos en términos de eficiencia energética y cumplimiento normativo (Jiménez Torres *et al.*, 2024).

La limitada adopción de ecotecnologías y estrategias bioclimáticas en el diseño y construcción ha contribuido al incremento del consumo energético en edificaciones, especialmente por la elevada demanda de sistemas HVAC. En este contexto, el presente trabajo propone una representación gráfica que evalúa el impacto de distintos elementos

constructivos en la ganancia térmica de una edificación. Este análisis busca evidenciar las diferencias en el comportamiento energético según sus propiedades ópticas y orientación, con el fin de identificar oportunidades concretas para optimizar el diseño pasivo y reducir el consumo energético en climas cálidos.

Materiales y Métodos

En la Figura 1 se observa la metodología que se encuentra estructurada en tres etapas: base de datos, ejecución y discusión de resultados. En la primera, se recopiló propiedades termofísicas y ópticas de materiales, coeficientes de absorción y datos de orientación como parte de las ecotecnologías y estrategias bioclimáticas. En la segunda, la información fue procesada en el software Opaque para modelar muros y losas, simulando distintos valores de absorción. Finalmente, los resultados se representaron gráficamente para comparar el desempeño térmico y determinar configuraciones que minimicen la ganancia de calor en climas cálidos.

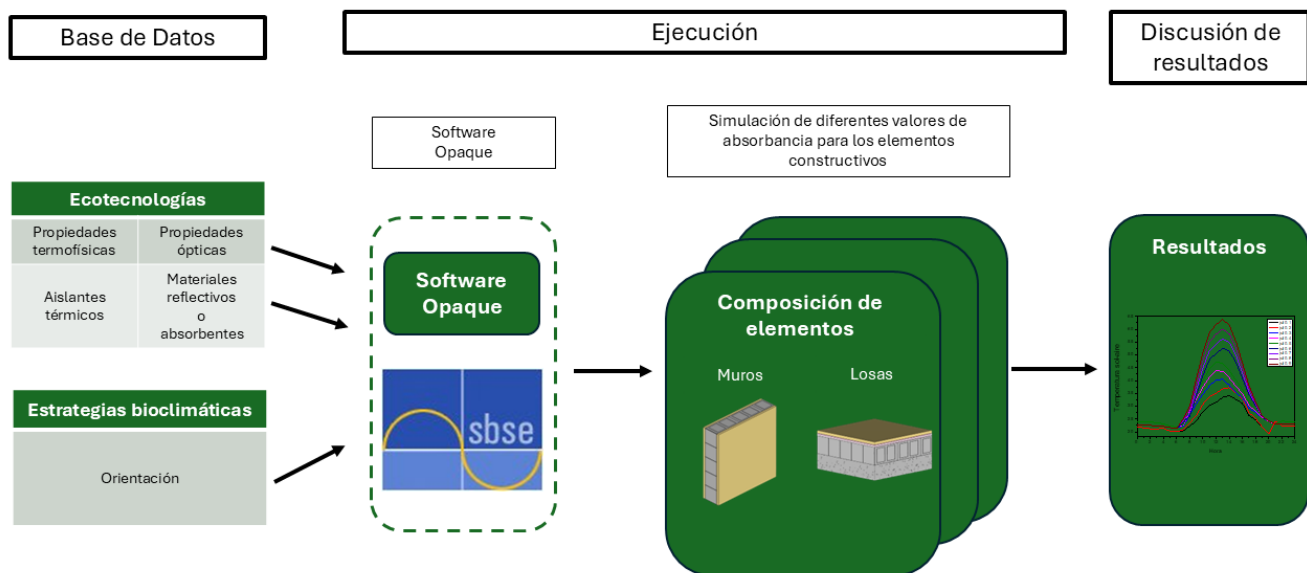


Figura 1. Metodología de simulación y análisis de elementos constructivos mediante software Opaque

Base de datos

Se definieron las propiedades termofísicas de los materiales de construcción empleados en la región, así como de materiales alternativos enfocados en mejorar la eficiencia energética de los elementos constructivos. Para las ecotecnologías, se consideraron parámetros como la conductividad térmica (k), el calor específico (C_p), la densidad (ρ), el espesor y las propiedades ópticas de cada material. En el caso de las estrategias bioclimáticas, el análisis incorporó principalmente la variable de orientación de la edificación, debido a su impacto en la ganancia térmica por radiación solar. La definición de los elementos constructivos se realizó mediante el software Opaque, el cual permite ingresar datos detallados de espesor, propiedades termofísicas y ópticas de los materiales. Posteriormente, se efectuaron simulaciones empleando datos meteorológicos correspondientes a un día tipo, seleccionado específicamente del mes más cálido (mayo) y del mes más frío (enero) en la ciudad de San Francisco de Campeche.

Estas simulaciones tuvieron como objetivo estimar y registrar, para cada elemento constructivo, la ganancia energética por conducción y radiación. Adicionalmente, se incorporaron aspectos ópticos como la absorción (α) y la reflectancia (ρ) de los materiales, con el fin de evaluar la efectividad de implementar recubrimientos reflectantes como estrategia para reducir la ganancia de calor al interior de los edificios. El software no solo genera resultados cuantitativos, sino que también dispone de un panel gráfico que permite visualizar el aspecto y la orientación de cada elemento. Entre los resultados obtenidos se incluyen la temperatura sol-aire (o temperatura equivalente), la radiación global, directa, difusa, así como la radiación reflejada por el entorno hacia el edificio. En la Tabla 1 se presentan las propiedades termofísicas de los materiales considerados en la simulación, incluyendo materiales convencionales y aquellos destinados a mejorar el desempeño térmico de la envolvente.

Tabla 1. Propiedades termofísicas de los materiales utilizados en la simulación

Material	Conductividad térmica (W/m·K)	Calor específico (J/kg·K)	Densidad (kg/m ³)
Concreto armado	1.74	1000	2400
Vigueta y bovedilla	0.50	1000	1400
Poliestireno expandido (EPS)	0.037	1400	16
Poliestireno extruido (XPS)	0.028	1260	30
Estuco	0.726	880	1920

Diferentes combinaciones para edificios de referencia

Durante el proceso de simulación, se generaron distintas combinaciones de elementos constructivos con el fin de aproximarse a valores representativos y evaluar su impacto en el comportamiento energético del edificio de referencia como se observa en la Tabla 2. Para cada caso, se compiló la información sobre cómo variaba el desempeño energético de los elementos al modificar la composición de sus materiales, sus propiedades ópticas y su orientación. Este análisis permitió identificar las combinaciones con mayor potencial de ahorro energético, las cuales fueron seleccionadas para un estudio detallado que profundiza en su eficacia y viabilidad de implementación.

Tabla 2. Configuraciones de elementos constructivos y rangos de absorbancia utilizados en la simulación energética

Caso	Escenario	Descripción	Absorbancia
T1	I	Techo convencional	0.1
	II		0.2
	III		0.3
	IV		0.4
	V		0.5
	VI		0.6
	VII		0.7
	VIII		0.8
	IX		0.9
T2	I	Techo con capa de poliestireno expandido (EPS)	0.1
	II		0.2
	III		0.3
	IV		0.4
	V		0.5
	VI		0.6
	VII		0.7
	VIII		0.8
	IX		0.9
T3	I	Techo con capa de poliestireno extruido (XPS)	0.1
	II		0.2
	III		0.3
	IV		0.4
	V		0.5
	VI		0.6
	VII		0.7
	VIII		0.8
	IX		0.9

Continuación Tabla 2. Configuraciones de elementos constructivos y rangos de absorbanza utilizados en la simulación energética

Caso	Escenario	Descripción	Absorbanza
MN	I	Muro con orientación al norte	0.1
	II		0.2
	III		0.3
	IV		0.4
	V		0.5
	VI		0.6
	VII		0.7
	VIII		0.8
	IX		0.9
ME	I	Muro con orientación al este	0.1
	II		0.2
	III		0.3
	IV		0.4
	V		0.5
	VI		0.6
	VII		0.7
	VIII		0.8
	IX		0.9
MO	I	Muro con orientación al oeste	0.1
	II		0.2
	III		0.3
	IV		0.4
	V		0.5
	VI		0.6
	VII		0.7
	VIII		0.8
	IX		0.9
MS	I	Muro con orientación al sur	0.1
	II		0.2
	III		0.3
	IV		0.4
	V		0.5
	VI		0.6
	VII		0.7
	VIII		0.8
	IX		0.9

Análisis de resultados

El análisis se centra en cada elemento constructivo seleccionado, con el propósito de evaluar su optimización mediante la modificación de sus propiedades ópticas. Este procedimiento permite identificar las combinaciones o alternativas más eficaces en términos de ahorro energético, al favorecer una menor transferencia de calor hacia el interior y, en consecuencia, reducir la huella de carbono mediante la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Asimismo, se examina la idoneidad y aplicabilidad de los materiales propuestos frente a las condiciones climáticas de la región, considerando no solo su desempeño térmico, sino también su viabilidad de implementación en proyectos constructivos reales.

Resultados y Discusión

En la Figura 2 se observa la comparación entre las temperaturas sol-aire y las ganancias de calor para los tres sistemas de cubierta evaluados. El Techo 1 (sistema convencional de concreto con vigueta y bovedilla) alcanza temperaturas superficiales cercanas a 65 °C durante las horas de máxima radiación, aproximadamente a las 14:00 horas. Este techo presenta un retardo térmico moderado, característico de la alta inercia térmica del concreto, lo que provoca que el flujo de calor hacia el interior se incremente en las últimas horas de la tarde. Las ganancias de calor superan los 70 W/m², lo que implica que, aunque el material retrasa el flujo de energía, la magnitud del calor transferido al interior es elevada, aumentando de manera considerable la carga térmica del edificio y la dependencia de sistemas de climatización.

En contraste, el Techo 2, que incorpora una capa de poliestireno expandido (EPS) como aislante, evidencia una disminución significativa en la transferencia térmica. Aunque las temperaturas superficiales se mantienen en niveles similares a los del techo convencional, las curvas de ganancias de calor muestran reducciones sustanciales, con valores máximos en torno a 22–24 W/m². Esto refleja la capacidad del EPS para limitar el flujo de calor hacia el interior, reduciendo notablemente el impacto de la radiación solar en la carga térmica del espacio habitable. Además, el desfase entre el pico de radiación y la ganancia máxima es más pronunciado, lo que contribuye a atenuar las condiciones térmicas durante las horas críticas y a disminuir el uso de sistemas mecánicos de enfriamiento.

Por su parte, el Techo 3, que incorpora una capa de poliestireno extruido (XPS), también logra una reducción considerable en la transferencia de calor, con ganancias máximas que oscilan entre 30 y 35 W/m². Sin embargo, en esta simulación su desempeño es ligeramente inferior al observado en el techo con EPS, a pesar de que el XPS cuenta con una menor conductividad térmica y mayor resistencia a la humedad. Este resultado sugiere que factores como la ubicación de la capa aislante, su espesor o las propiedades ópticas de las superficies pueden influir significativamente en el comportamiento dinámico del sistema. Aun así, el techo con XPS ofrece una mejora térmica relevante respecto al techo convencional y mantiene un comportamiento estable a lo largo del día, especialmente cuando se combina con acabados de alta reflectancia superficial.

Estos hallazgos se relacionan directamente con la NOM-020-ENER-2011 (NOM-020-ENER-2011, 2011), la cual establece los lineamientos para limitar la ganancia de calor por la envolvente de edificios de uso habitacional. De acuerdo con esta norma, es fundamental integrar materiales con baja conductividad térmica y, de ser posible, con propiedades reflectivas, con el fin de reducir la transferencia de calor al interior de las viviendas. En este sentido, tanto el EPS como el XPS cumplen con la normativa, contribuyendo a la reducción de las cargas térmicas y al cumplimiento de las metas nacionales en materia de eficiencia energética. El techo convencional, al carecer de aislamiento, no satisface los parámetros establecidos por la norma, lo que justifica la necesidad de incorporar ecotecnologías para mejorar el desempeño térmico de la envolvente.

Desde la perspectiva de factibilidad económica, el costo de implementación es un factor determinante para la selección del material aislante. El EPS tiene un costo aproximado de \$22/m², mientras que el XPS asciende a \$55/m², lo que puede influir en la decisión final dependiendo del presupuesto disponible para la construcción o rehabilitación. Sin embargo, la elección no debe basarse únicamente en el precio, ya que es necesario considerar otros aspectos como la ligereza del material, su resistencia mecánica, la baja absorción de agua y la durabilidad. El EPS representa una alternativa económica y eficiente para la reducción de las ganancias de calor, mientras que el XPS, aunque más costoso, ofrece ventajas en términos de resistencia estructural y desempeño en condiciones de alta humedad, características relevantes en climas como el de San Francisco de Campeche, donde la presencia de humedad es significativa.

En general, se confirma que la incorporación de aislamiento térmico, en conjunto con acabados reflectantes, es la estrategia más eficaz para reducir la ganancia de calor. De los sistemas analizados, el techo con EPS (Techo 2) resultó ser el más eficiente en términos de reducción de flujo térmico, seguido por el techo con XPS (Techo 3), mientras que el sistema convencional (Techo 1) presentó los mayores niveles de transferencia de calor. Estos resultados no solo demuestran la pertinencia técnica, sino también la viabilidad normativa y económica de implementar soluciones constructivas que mejoren la eficiencia energética y el confort interior, reduciendo la dependencia de sistemas mecánicos de climatización y contribuyendo al cumplimiento de los objetivos planteados por la NOM-020-ENER-2011.

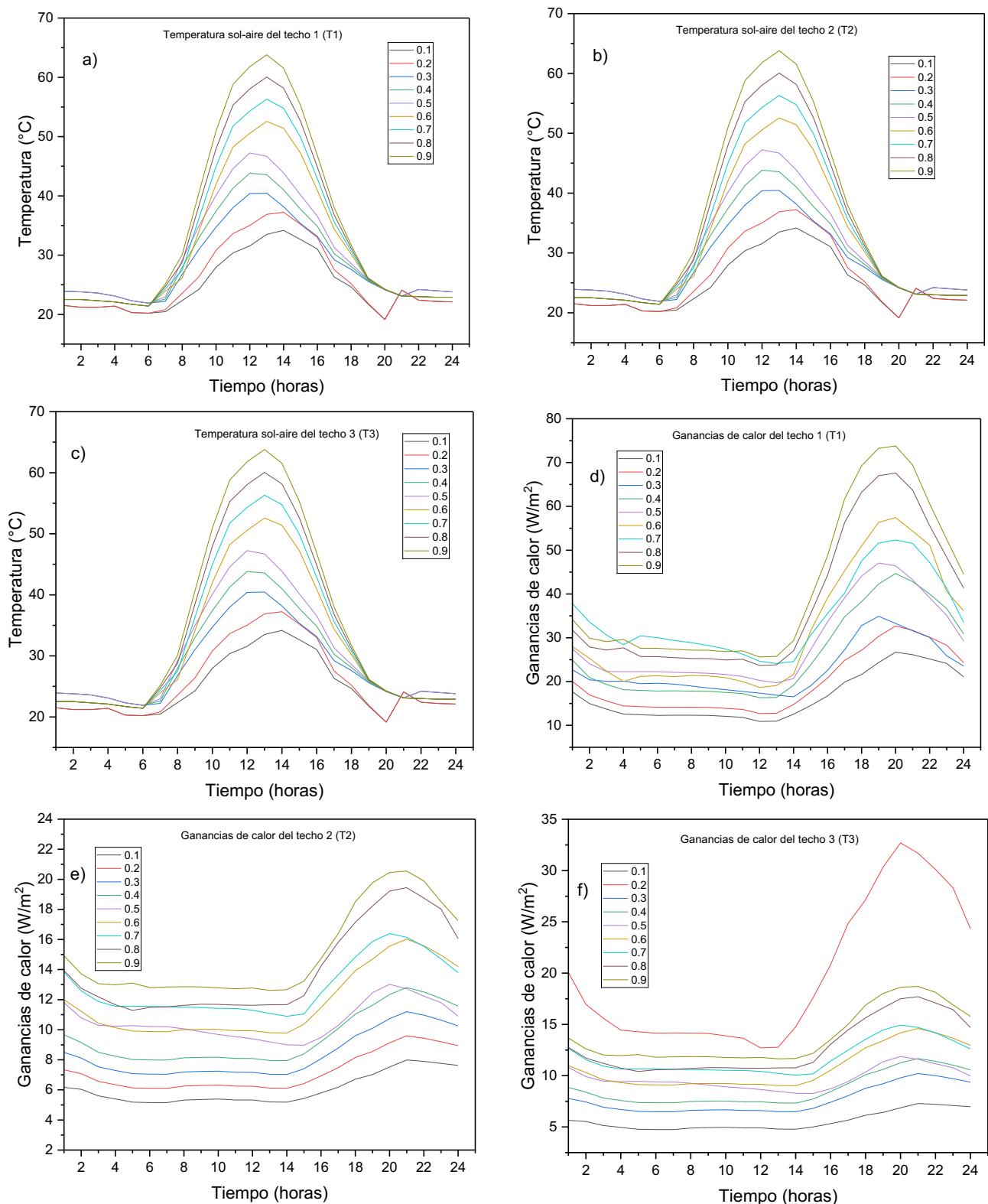


Figura 2. Temperatura sol-aire y ganancias de calor en los tres sistemas de techo con variación de la absorbancia solar; a) temperatura sol-aire del techo convencional, b) temperatura sol-aire del techo con capa de poliestireno expandido (EPS), c) temperatura sol-aire del techo con capa de poliestireno extruido (XPS), d) ganancias de calor del techo convencional, e) ganancias de calor del techo con capa de poliestireno expandido (EPS) y f) ganancias de calor del techo con poliestireno extruido (XPS)

En la Figura 3 se observa la evolución horaria de la temperatura sol-aire y de las ganancias de calor a través de muros con distintas orientaciones (Norte, Este, Oeste y Sur), bajo variaciones en el coeficiente de absorbanza superficial (0.1 a 0.9). En el muro norte (a, e) se observa un comportamiento moderado en comparación con las demás orientaciones. La temperatura superficial máxima alcanza aproximadamente 45–50 °C hacia el mediodía, con un desfase térmico respecto al pico de radiación solar. Las ganancias de calor muestran un incremento sostenido entre las 10:00 y 18:00 h, alcanzando valores cercanos a 65 W/m² en las condiciones de mayor absorbanza. Esto refleja que, aunque el muro norte recibe radiación indirecta y difusa, la acumulación térmica durante el día es significativa, especialmente en superficies con alta absorbanza.

El muro este (b, f) exhibe un aumento rápido de temperatura en las primeras horas de la mañana, alcanzando picos de 50–55 °C alrededor de las 10:00 h. Este comportamiento responde a la incidencia directa de la radiación solar durante el amanecer y las primeras horas del día. Las ganancias de calor siguen esta misma tendencia, con un máximo próximo a 70 W/m², lo que sugiere que este muro contribuye a la carga térmica interior en las horas de ocupación inicial, pudiendo impactar en el confort térmico matutino.

En el caso del muro oeste (c, g) se presenta el escenario más crítico. La temperatura superficial alcanza los valores más elevados, cercanos a 60–65 °C, con el máximo alrededor de las 16:00–18:00 h, coincidiendo con las horas de mayor temperatura ambiente. Las ganancias de calor son igualmente elevadas, con picos que superan los 100 W/m² en condiciones de alta absorbanza. Este fenómeno se explica por la superposición de la radiación solar vespertina con el máximo nivel térmico del aire exterior, lo que convierte al muro oeste en el más desfavorable desde el punto de vista de confort y eficiencia energética.

Por último, el muro sur (d, h) presenta un comportamiento intermedio. Sus temperaturas superficiales alcanzan valores alrededor de 40–50 °C, con picos cercanos al mediodía. Las ganancias de calor son más moderadas, situándose en el rango de 50–70 W/m², dependiendo de la absorbanza. A diferencia del muro este y oeste, la contribución del muro sur se distribuye de forma más equilibrada a lo largo del día, aunque con menor intensidad.

En todos los casos, se confirma que la absorbanza superficial, es un factor determinante en el comportamiento térmico de los muros. Valores elevados de α intensifican la absorción de radiación solar, incrementando tanto la temperatura superficial como las ganancias de calor, mientras que valores bajos mitigan estos efectos. El análisis comparativo pone de manifiesto que, de las orientaciones evaluadas, el muro oeste constituye el punto más crítico en términos de carga térmica, seguido del muro este, mientras que las orientaciones norte y sur muestran un impacto relativamente menor.

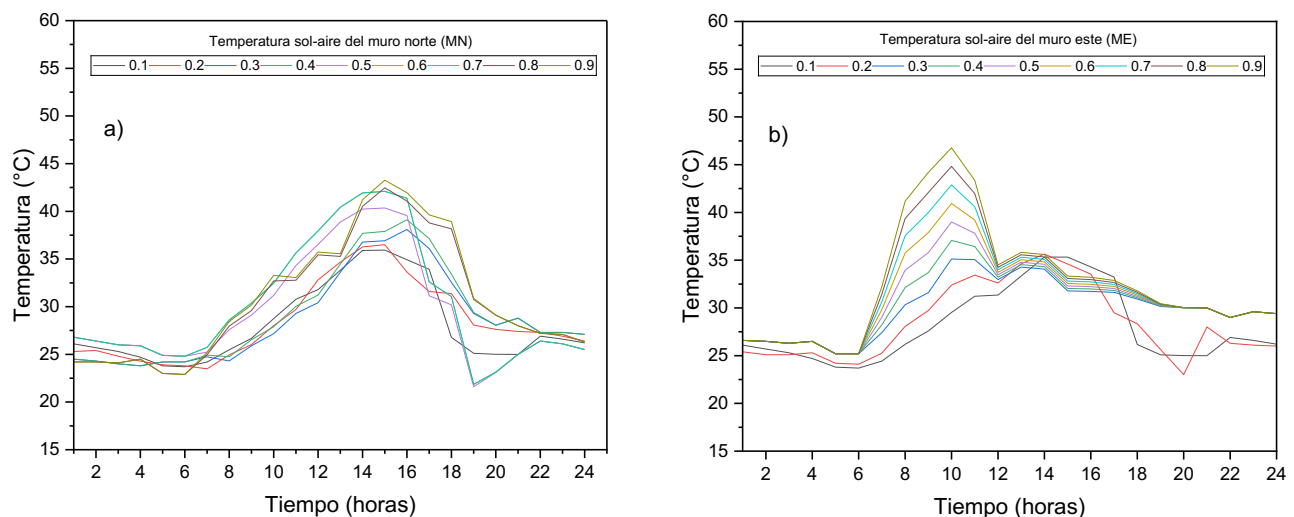
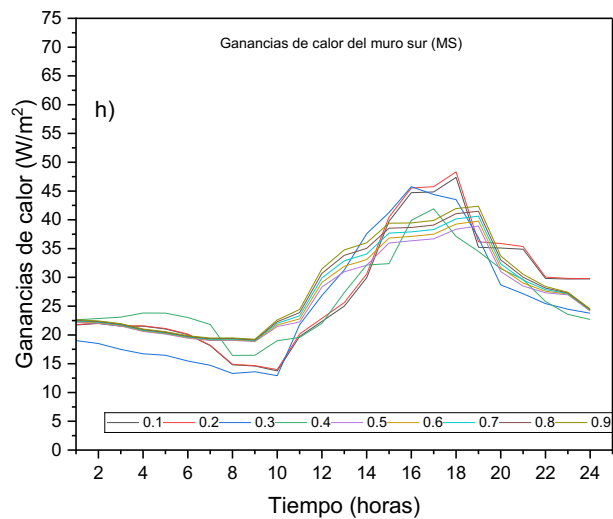
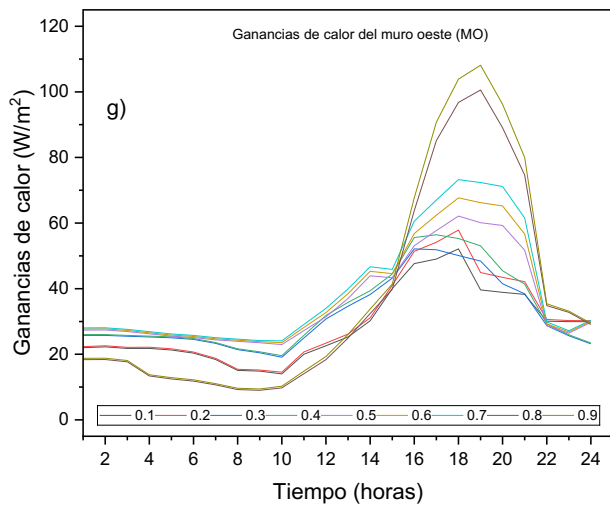
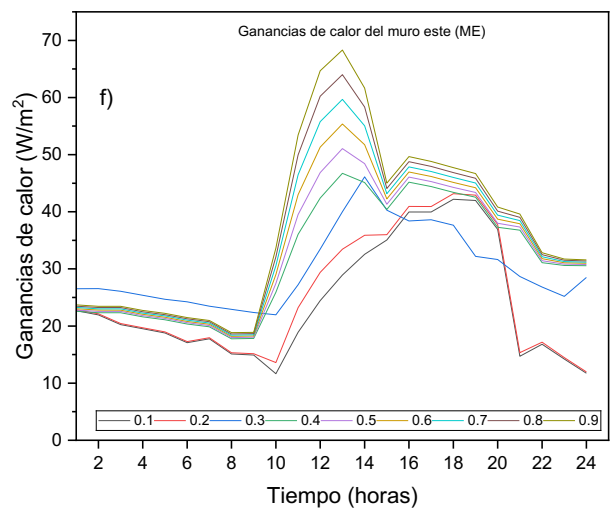
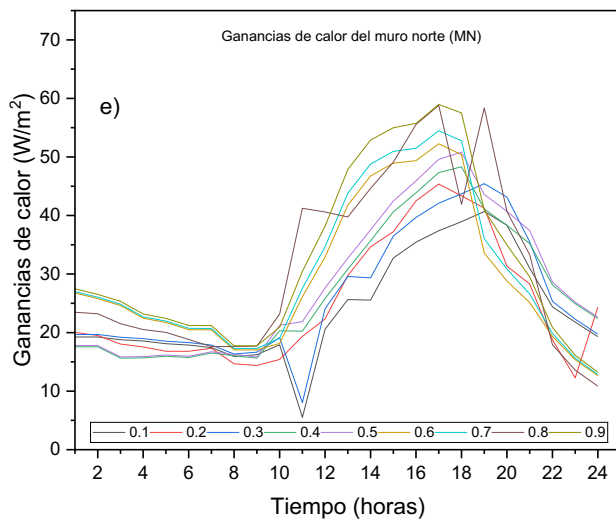
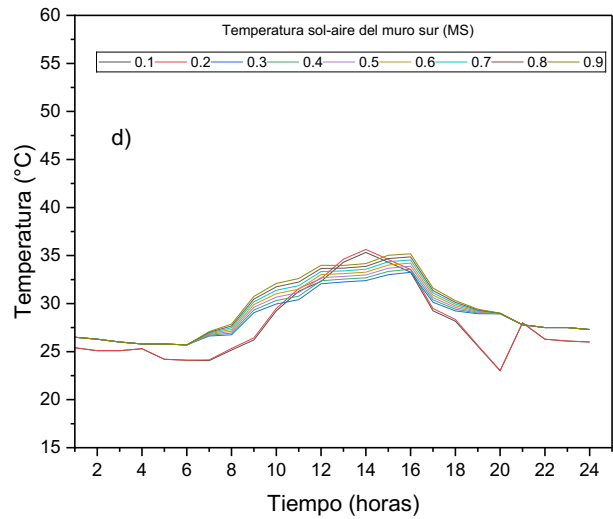
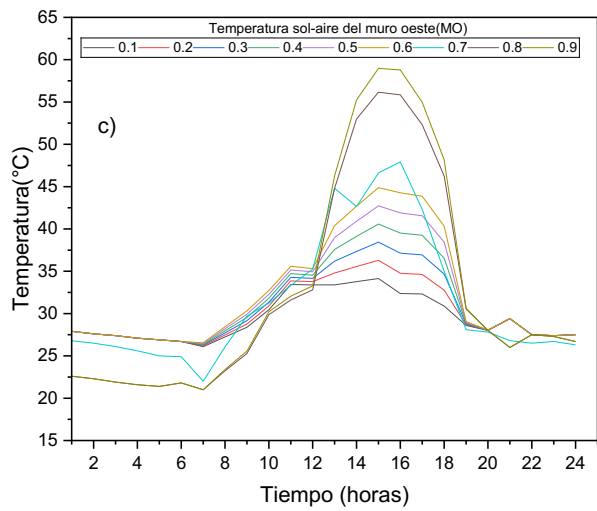


Figura 3. Evolución horaria de la temperatura sol-aire y las ganancias de calor en muros con diferentes orientaciones y absorbanza: a) temperatura sol-aire del muro norte, b) temperatura sol-aire del muro este, c) temperatura sol-aire del muro oeste, d) temperatura sol-aire del muro sur, e) ganancia de calor del muro norte, f) ganancia de calor del muro este, g) ganancia de calor del muro oeste y h) ganancia de calor del muro sur



Continuación Figura 3. Evolución horaria de la temperatura sol-aire y las ganancias de calor en muros con diferentes orientaciones y absorbanza: a) temperatura sol-aire del muro norte, b) temperatura sol-aire del muro este, c) temperatura sol-aire del muro oeste, d) temperatura sol-aire del muro sur, e) ganancia de calor del muro norte, f) ganancia de calor del muro este, g) ganancia de calor del muro oeste y h) ganancia de calor del muro sur

Conclusiones

El análisis comparativo de techos y muros con diferentes configuraciones constructivas y orientaciones permitió identificar el impacto que tienen los materiales, el aislamiento térmico y la absorbancia superficial en el desempeño térmico de la envolvente edilicia. En el caso de los techos, se evidenció que el sistema convencional de concreto con vigueta y bovedilla presenta las mayores ganancias de calor, mientras que la incorporación de materiales aislantes, particularmente el poliestireno expandido (EPS), reduce de manera significativa la transferencia térmica hacia el interior. Esto contribuye a mejorar las condiciones de confort de los ocupantes y a disminuir la demanda energética en climatización, en concordancia con los lineamientos establecidos por la NOM-020-ENER-2011, que promueve la eficiencia energética en edificaciones habitacionales mediante la reducción de la ganancia térmica en la envolvente.

Por su parte, el análisis de los muros mostró que la orientación juega un papel fundamental en el comportamiento térmico. El muro oeste resultó ser el más crítico, ya que coincide la incidencia de radiación solar vespertina con las temperaturas máximas del aire, lo que genera los mayores valores de temperatura superficial y ganancias de calor. En contraste, las orientaciones norte y sur presentaron un impacto más moderado, mientras que el muro este mostró relevancia durante las primeras horas de la mañana. En todos los casos, se corroboró que un mayor coeficiente de absorbancia incrementa la carga térmica, mientras que valores bajos contribuyen a mitigar los efectos de la radiación solar, destacando la importancia de recubrimientos reflectivos como estrategia complementaria.

No obstante, es importante señalar que este estudio se basa en simulaciones computacionales, lo que implica que los resultados obtenidos representan un escenario controlado. Por ello, se considera necesario que en futuras investigaciones se realicen mediciones en campo para validar y ajustar los modelos, incorporando factores como la variabilidad climática, el comportamiento real de los materiales y las condiciones de uso de las viviendas. Esto permitirá mejorar la precisión y aplicabilidad de los resultados, proporcionando recomendaciones más sólidas para la implementación de estrategias constructivas que contribuyan al cumplimiento de la NOM-020-ENER-2011 y a la mejora del confort térmico en regiones cálidas como San Francisco de Campeche.

Agradecimientos y financiamiento: Al Laboratorio de Habitabilidad y Diseño Urbano Sustentable de la UACAM. También al respaldo del proyecto 15/UACAM/2024.

Bibliografía

- Bashir, A. W., & Leite, B. C. C. (2022). Performance of aerogel as a thermal insulation material towards a sustainable design of residential buildings for tropical climates in Nigeria. *Energy and Built Environment*, 3(3), 291–315. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.02.003>
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), & Secretaría de Energía (SENER). (2020). *Eficiencia energética en el confort térmico en viviendas de clima cálido en México*. <https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/ Cuaderno5nvciclo.pdf> (Consultado el 10 de julio del 2025)
- Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE). (2022). *Eficiencia Energética - Revista del Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica*. https://www.fide.org.mx/wp-content/uploads/Revistas/eficiencia_energetica_34.pdf (Consultado el 10 de junio del 2025)
- Galindo-Borbón, C., Borbón-Almada, A., Ochoa-de-la-Torre, J. M., & Marincic-Lovriha, I. (2024). Análisis costo-beneficio de estrategias para eficiencia energética en vivienda, aplicando la normatividad vigente en el Noroeste de México. *Revista Hábitat Sustentable*, 14(2), 32–47. <https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.02.03>
- Han, D., Fei, J., Mandal, J., Liu, Z., Li, H., Raman, A. P., & Ng, B. F. (2022). Sub-ambient radiative cooling under tropical climate using highly reflective polymeric coating. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 240, 111723. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111723>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Secretaría de Energía (SENER), & Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2018). *Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI)*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/encevi/2018/doc/encevi2018_presentacion_resultados.pdf (Consultado el 15 de julio del 2025)
- International Energy Agency (IEA). (2024). *World Energy Outlook 2024*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/140a0470-5b90-4922-a0e9-838b3ac6918c/WorldEnergyOutlook2024.pdf> (Consultado el 12 de julio del 2025)
- Jiménez Torres, M., Bienvenido-Huertas, D., May Tzuc, O., Bassam, A., Ricalde Castellanos, L. J., & Flota-Bañuelos, M. (2023). Assessment of climate change's impact on energy demand in Mexican buildings: Projection in single-family houses based on Representative Concentration Pathways. *Energy for Sustainable Development*, 72, 185–201. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.12.012>
- Jiménez Torres, M., Pérez-Fargallo, A., May Tzuc, O., Ricalde Castellanos, L., Bassam, A., Flota-Bañuelos, M., & Rubio-Bellido, C. (2024). Energy poverty under 2M indicator: Feasibility of decrease by using passive techniques in residential buildings of Southeast Mexico. *Energy and Buildings*, 323, 114761. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114761>
- NOM-020-ENER-2011. (2011). *Eficiencia energética en edificaciones: Envolvente de edificios para uso habitacional*. Diario Oficial de la Federación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181660/NOM_020_ENER_2011.pdf (Consultado el 10 de junio del 2025)

-
- Rosas-Flores, J. A., & Rosas-Flores, D. (2020). Potential energy savings and mitigation of emissions by insulation for residential buildings in Mexico. *Energy and Buildings*, 209, 109698. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109698>
- United Nations Environment Programme (UNEP), & Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC). (2024). *Global status report for buildings and construction: Beyond foundations*. Nairobi. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/45095/global_status_report_buildings_construction_2023.pdf (Consultado el 30 de julio del 2025)