

# Evaluación del comportamiento térmico en un módulo ecoturístico prefabricado de estructura triangular

## Evaluation of the thermal behavior of a prefabricated triangular-structure ecotourism module

Pablo Renato Rojas Vidal , Johnnatan Scott Hernández Zevallos , Efraín Culqui Gutiérrez , José Arturo Pérez Santa María , Lizbeth Daniela Aguirre Ordóñez , Héctor Raúl Zacarías Ventura 

### Filiación institucional

<sup>1</sup> Universidad de Huánuco, Huánuco, Perú.

### Grado académico

- <sup>a</sup> Magíster con mención en Educación e Investigación
- <sup>b</sup> Arquitecto
- <sup>c</sup> Estudiante de arquitectura
- <sup>d</sup> Doctor en Ciencias de la Educación

Recibido: 01-11-25

Aprobado: 02-01-26

Publicado: 28-01-26

### RESUMEN

Las soluciones de vivienda ecoturística enfrentan limitaciones en el confort térmico y la eficiencia energética debido al uso de materiales industriales y a la falta de sistemas pasivos, lo que genera sobrecalentamiento diurno y pérdida de calor nocturna. Ante esta problemática, el objetivo de la investigación fue evaluar la eficiencia térmica de un módulo ecoturístico prefabricado de estructura triangular, que integra un sistema rebatible y biopaneles de carrizo aglutinados con mucílago de tuna. Se aplicó una metodología de diseño descriptivo para evaluar un espécimen de ensayo de materiales a escala real, expuesto a la intemperie en Huánuco durante dos periodos estacionales (seco y húmedo). Mediante observación cuantitativa directa, se registraron las temperaturas interiores y exteriores en los momentos de máxima radiación (10:00 a. m.) y de enfriamiento (4:00 p. m.). Los resultados evidenciaron una alta estabilidad térmica; en clima seco, la variación interna fue de 9.2 °C, frente a los 12.5 °C del exterior, y en clima húmedo fue de apenas 3.5 °C ante una fluctuación externa de 10.3 °C, reteniendo entre 7 y 15 °C por encima del exterior en horas críticas. Se concluye que este diseño bioclimático integral constituye un sistema de climatización pasiva altamente eficiente, que reduce la dependencia de sistemas artificiales y garantiza la sostenibilidad en entornos naturales.

**Palabras clave:** módulo ecoturístico; arquitectura sostenible; prefabricación; aislamiento térmico; control solar; energía solar; bioclimática.

### ABSTRACT

Ecotourism housing solutions face limitations in thermal comfort and energy efficiency due to the use of industrial materials and the lack of passive systems, which generates daytime overheating and nighttime heat loss. In view of this issue, the objective of the research was to evaluate the thermal efficiency of a prefabricated triangular-structure ecotourism module, that integrates a foldable system and reed-based biopanelled bonded with prickly pear cactus mucilage. A descriptive methodology design was applied to evaluate a full-scale material test specimen exposed to outdoor conditions in Huánuco during two seasonal periods (dry and wet). Through direct quantitative observation, indoor and outdoor temperatures were recorded during periods of maximum solar radiation (10:00 a.m.) and cooling (4:00 p.m.). The results evidenced high thermal stability; in dry season, the indoor temperature variation was 9.2 °C, faced to 12.5 °C outdoors, and in wet season was only 3.5 °C, despite an outdoor fluctuation of 10.3 °C, maintaining a temperature between 7 and 15 °C higher than the outside temperature during critical hours. It is concluded that this comprehensive bioclimatic design constitutes a highly efficient passive climate control system that reduces dependence on artificial systems and ensures sustainability in natural environments.

**Keywords:** ecotourism module; sustainable architecture; prefabrication; thermal insulation; solar control; solar energy; bioclimatics.

**Citar como:** Rojas, P., Hernández, J., Culqui, E., Pérez, J., Aguirre, L. y Zacarias, H. (2026). Evaluación del comportamiento térmico en un módulo ecoturístico prefabricado de estructura triangular. *Revista Peruana de Ingeniería, Arquitectura y Medio Ambiente*, 3(1), 0-9. <https://doi.org/10.37711/repiama.2026.3.1.6>



## Introducción

En el ámbito del ecoturismo, la arquitectura se enfrenta al reto de integrarse al paisaje natural y minimizar su huella ecológica. Sin embargo, la situación problemática actual evidencia que las soluciones de vivienda ecoturística existentes presentan graves limitaciones en cuanto al confort térmico y la eficiencia energética. Estas deficiencias se deben principalmente al uso de materiales industriales de bajo desempeño aislante y a la ausencia de sistemas pasivos adaptables a las condiciones climáticas locales. Como consecuencia, las edificaciones sufren sobrecalentamiento durante el día y pérdida de calor en horarios nocturnos, lo que incrementa la dependencia de sistemas de climatización artificial y afecta negativamente la sostenibilidad ambiental (Honey, 2008). Para abordar este problema, la arquitectura bioclimática se presenta como un concepto general clave, ya que busca el aprovechamiento óptimo de las condiciones del entorno, como la radiación solar, la ventilación natural y la orientación, para reducir el consumo energético (Givoni, 1998; Olgyay, 2015). Asimismo, es fundamental el uso de la prefabricación modular, una técnica que reduce los residuos de obra y los tiempos de construcción, lo cual resulta especialmente conveniente en entornos naturales (Smith, 2010).

Estudios previos evidencian la existencia de estructuras y módulos transformables con fines similares. Existen antecedentes como el módulo Pempén, desarrollado para la selva peruana (Hiromoto, 2016), y modelos internacionales como la “Casa de *camping* en consonancia con el desarrollo de petróleo y gas”, orientada a viviendas móviles en zonas desérticas. No obstante, al analizar estas propuestas, se identifica una brecha o vacío en la investigación: estas soluciones no incluyen un sistema de membrana térmica rebatible capaz de regular dinámicamente el ingreso de luz y calor mediante materiales vernáculos. Esta carencia limita su eficiencia en condiciones de alta variabilidad térmica. Ante ello, se justifica la necesidad de superar estas limitaciones mediante una propuesta arquitectónica sostenible y de bajo costo. Para ello, se fundamenta en el uso de la forma troncopiramidal, reconociendo que el triángulo constituye el sistema estructural elemental indeformable frente a cargas externas (Gere y Timoshenko, 1997), y es la figura en la que una estructura alcanza verdadera estabilidad (Torroja, 1957; González Meza, 2016). La viabilidad de proponer un módulo de este tipo, temporal y trasladable, ha sido respaldada conceptualmente para su uso en entornos naturales (World Intellectual Property Organization [WIPO], 2024).

Por lo expuesto, el objetivo de esta investigación es evaluar el comportamiento térmico de un módulo ecoturístico prefabricado, basado en una estructura triangular compuesta por madera y elementos metálicos, que incorpora un sistema rebatible y biopaneles elaborados con carrizo y mucílago de tuna. Con ello, se busca optimizar el aislamiento térmico interior, regular la radiación solar incidente y reducir el impacto ambiental, garantizando una adecuada integración de la vivienda en el entorno natural.

## Materiales y métodos

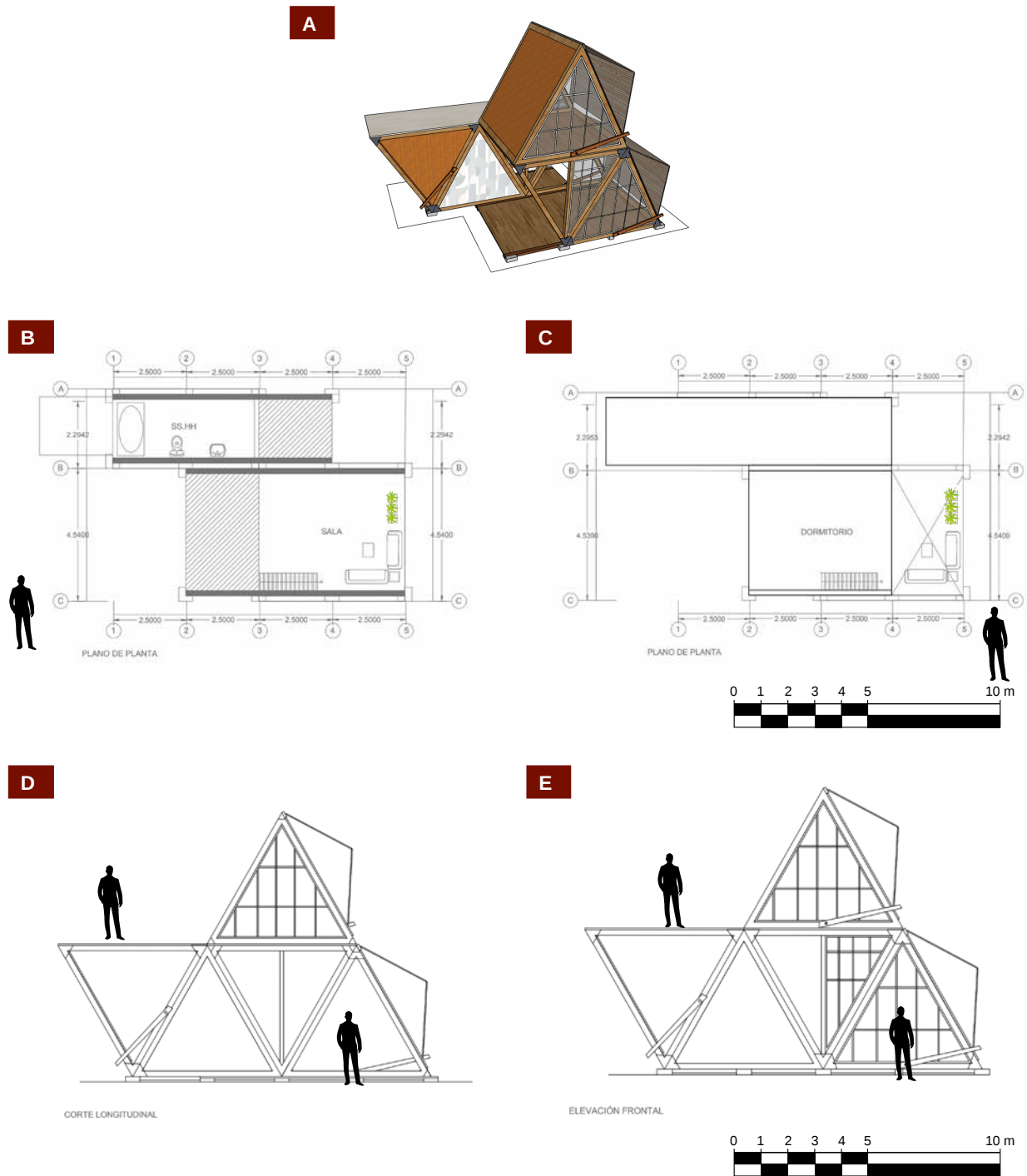
### Módulo ecoturístico prefabricado con estructura triangular

La presente investigación se desarrolló con un enfoque cuantitativo y un diseño descriptivo, orientado a evaluar el comportamiento térmico de un prototipo elaborado con biomateriales naturales, expuesto a condiciones ambientales reales. Se midió la temperatura del sistema térmico pasivo conformado por biopaneles de carrizo y mucílago de tuna, así como el comportamiento térmico del prototipo experimental.

El módulo ecoturístico correspondió a una estructura prefabricada de configuración triangular y forma troncopiramidal, compuesta por elementos de madera, uniones metálicas y paneles rebatibles destinados al control de la radiación solar y a la ventilación natural. Para el desarrollo se elaboró un prototipo cúbico hermético de 20 cm × 20 cm destinado a las pruebas térmicas. Para la elaboración del sistema de aislamiento térmico se emplearon materiales naturales como carrizo, triplay y mucílago de tuna. El proceso constructivo inició con la extracción y preparación del mucílago de tuna, que se mezcló con agua, glicerina y grenetina hasta obtener un biogel adhesivo. Posteriormente, los tallos de carrizo fueron cortados y adheridos a láminas de triplay para conformar los biopaneles. Finalmente, los paneles fueron ensamblados para formar el prototipo experimental (ver más detalles en la Figura 1).

**Figura 1**

Vistas generales del módulo de estructura triangular: (A) perspectiva o detalle del módulo, (B) vista en planta del primer nivel, (C) vista en planta del segundo nivel, (D) vista de corte longitudinal y (E) vista de elevación frontal



Cabe señalar que el módulo ha sido validado por la WIPO (2024). En este sentido, se describe que el presente invento se refiere a una estructura triangular modular que comprende una pluralidad de elementos de soporte triangulares, con conexiones intermedias, una base para mantener la estructura por encima del suelo y protegerla de la humedad, así como una membrana térmica para brindar aislamiento. Asimismo, se concibe como un módulo de *camping* temporal, prefabricado y armable, cuyo montaje y desmontaje requieren aproximadamente siete días,

lo que permite su traslado entre distintos entornos naturales. El diseño arquitectónico del módulo es versátil, ya que puede disponerse de distintas maneras según las necesidades de los usuarios y su capacidad de ocupación. Esto se relaciona con el concepto de arquitectura flexible, entendida como estructuras móviles, plegables y desplegables que permiten adaptarse a cambios climáticos, de uso y de movilidad, según Kronenburg (2007).

La muestra estuvo constituida por un prototipo cúbico de 20 cm × 20 cm. Desde la perspectiva del ensayo de materiales, este tamaño se justifica como un espécimen o probeta a escala real que reproduce la estratigrafía exacta del paquete constructivo, consistente en paneles de triplay, un revestimiento de carrizo cortado uniformemente y un aglomerante ecológico a base de mucílago de tuna. Este diseño experimental a escala permitió comprobar la capacidad aislante del paquete antes de su aplicación en el módulo macroecoturístico. La preparación del espécimen comenzó con la extracción del mucílago de la tuna, que se mezcló con agua y se trituró. Paralelamente, se calentó una solución de agua, glicerina y grenetina hasta obtener un gel viscoso y homogéneo, que posteriormente se integró con el mucílago extraído. Este biogel se aplicó sobre la superficie de las láminas de triplay para fijar las tiras de carrizo entre sí, lo que requirió un periodo de secado de cuatro a cinco horas en un ambiente frío. Finalmente, los paneles secos se ensamblaron mediante adhesivo ecológico y una fijación mecánica mínima, lo que aseguró un montaje hermético apto para el análisis térmico.

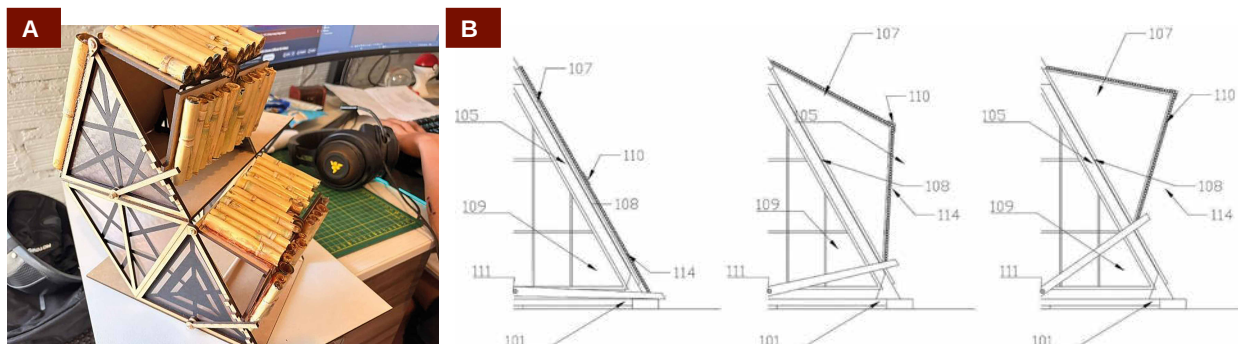
### Ventaja técnica del módulo: ventana térmica

Tomando como referencia los sistemas de ventanas térmicas, definidos como soluciones de acristalamiento diseñadas para reducir las pérdidas y ganancias de calor mediante el uso de dobles o triples vidrios, se propuso incorporar tres recubrimientos: en los extremos, caña y triplay; y, en el interior, en lugar de la cámara de aire convencional, mucílago de tuna como material aislante. Esta propuesta se alinea con lo que señalan Neila González (2004) y Givoni (1994), quienes indican que las ventanas térmicas son cerramientos transparentes cuyo sistema de doble o triple acristalamiento, con cámaras intermedias y marcos aislantes, reduce significativamente el flujo de calor entre el interior y el exterior, mejorando la eficiencia energética del edificio.

La elaboración de la maqueta física permitió verificar el funcionamiento volumétrico, estructural y mecánico del sistema rebatible. A través de materiales a escala, se reprodujeron la modulación, la inclinación de los planos y la secuencia de apertura de la ventana térmica, validando el desempeño de las bisagras y de los paneles laterales, así como la estabilidad del módulo ensamblado. De este modo, el diseño triangular se enmarca en la arquitectura bioclimática y destaca por su eficiencia en entornos ecoturísticos, gracias a su bajo impacto ambiental, su capacidad de adaptación al clima, el uso responsable de materiales naturales y la incorporación de un sistema rebatible que mejora el confort térmico interior. En este contexto, la arquitectura bioclimática se entiende como un sistema de diseño basado en la regulación de los intercambios de calor mediante fachadas, ventanas, materiales, sombras y el control de la radiación (Neila González, 2004; Givoni, 1994). Asimismo, la literatura especializada demuestra que los sistemas modulares y rebatibles permiten gestionar activamente la ventilación, la radiación solar y el confort térmico interior según las condiciones del entorno (Kronenburg, 2007).

**Figura 2**

(A) Maqueta a escala. (B) Detalles de elemento rebatible



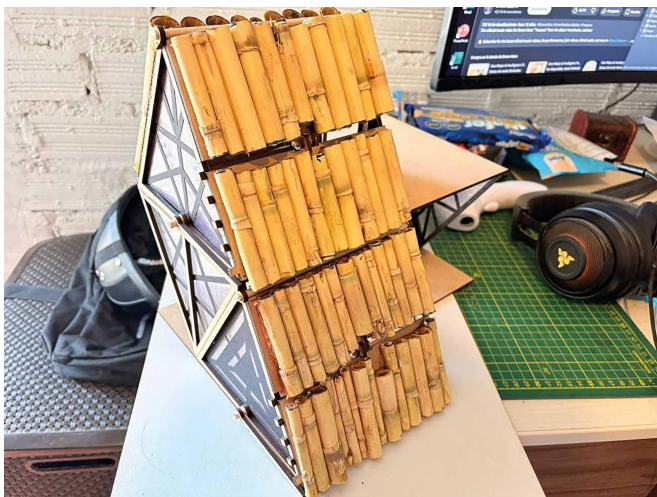
## Elementos del sistema rebatible

### Carrizo

Se usó el carrizo como cerramiento de la estructura rebatible. A la vez, su interior hueco contribuyó al aislamiento térmico, dado que el *Arundo donax* es una gramínea perenne de tallos altos, huecos y segmentados que produce grandes cantidades de biomasa y se emplea ampliamente en construcciones ligeras debido a su rápido crecimiento y baja conductividad térmica (Lewandowski et al., 2003). Por sus características estructurales, el carrizo se acopló de manera eficiente al sistema rebatible. Su estructura lignocelulósica le confiere una notable relación resistencia-peso y flexibilidad, haciéndolo adecuado para sistemas constructivos livianos como la quincha, las celosías y los revestimientos, así como para paneles prensados y biocompositos contemporáneos, siempre que sea tratado contra la humedad y degradación para garantizar durabilidad. Por último, el uso del carrizo contribuyó favorablemente a aspectos medioambientales, dado que los materiales de origen natural —como el carrizo, el bambú y las fibras vegetales— reducen el impacto ambiental, mejoran el aislamiento térmico y constituyen una alternativa sostenible frente a los materiales industriales convencionales (Pérez et al., 2011; Lewandowski et al., 2003). Finalmente, Pérez et al. (2011) indican que se reduce la demanda energética y se mejora el microclima mediante el sombreado y la evapotranspiración.

**Figura 3**

Disposición de los carrizos en la maqueta a escala



### Adhesivo y biopanel a base de mucílago de tuna

El proceso de fabricación del biopanel consiste en extraer el mucílago de la tuna, triturarlo y hervirlo hasta obtener una mezcla viscosa, que se aplica sobre láminas de madera para fijar carrizos alineados horizontalmente. Tras veinticuatro horas de secado, se obtiene un panel rígido, aislante y biodegradable, evitando los impactos de los adhesivos sintéticos. Este biomaterial, compatible con fibras vegetales, impulsa la biofabricación y la economía circular y permite la fabricación de tableros, revestimientos y piezas ligeras para sistemas de aislamiento pasivo. En pruebas experimentales con un cubo de 20 × 20 cm y paneles cuadrados, el biopanel demostró una estabilidad térmica superior a la del ambiente exterior, lo que evidencia su capacidad para amortiguar las variaciones climáticas y proteger frente a la humedad y el desgaste.

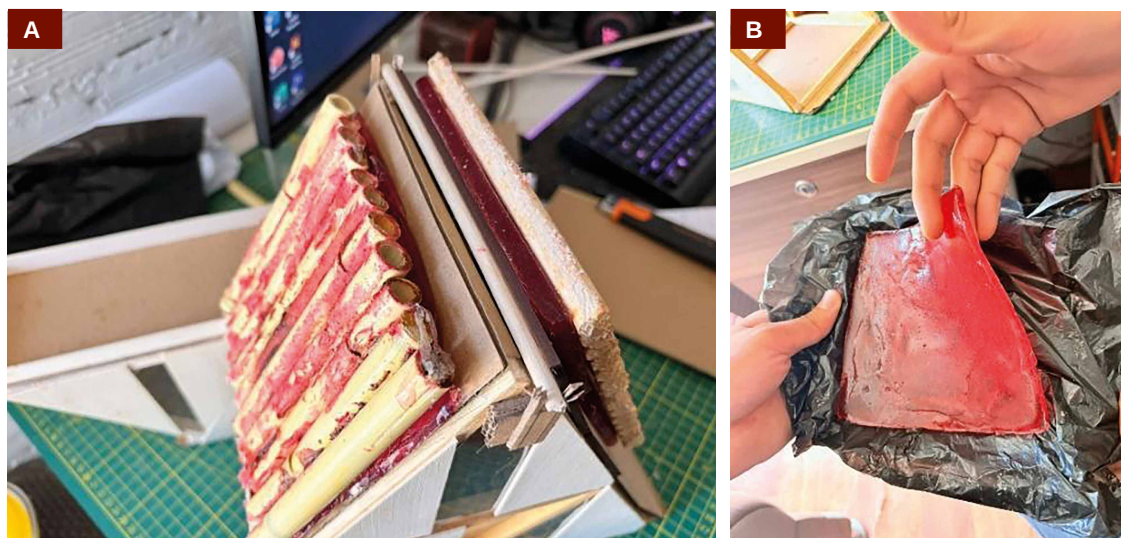
La sección central del biopanel está constituida por una capa gelatinosa a base de almidón y mucílago de tuna (*Opuntia ficus-indica*), diseñada específicamente para optimizar la adherencia entre la caña y el triplay. Al respecto, Cobana y Antezana (2007) señalan que el almidón está compuesto por dos polímeros estructuralmente distintos: la amilosa y la amilopectina. Una mayor concentración de esta última incrementa sustancialmente la capacidad adhesiva del carbohidrato, una propiedad aglutinante y estabilizadora biodegradable que resulta

idónea para la cohesión de los componentes del panel. Esta acción se complementa con las propiedades del mucílago de tuna, el cual, como mencionan Feugang et al. (2006), es un biopolímero extraído directamente de los cladodios del nopal que constituye una matriz compleja de polisacáridos hidrófilos. Su estructura molecular no solo le confiere una elevada capacidad de retención de humedad, sino que actúa como un excelente ligante y agente adhesivo natural.

Gracias a las propiedades sinérgicas de estos aglomerantes naturales, el biopanel adquiere la solidez estructural necesaria para ser integrado en el módulo ecoturístico rebatible. En esta aplicación, el panel cumple la función bioclimática de regular la radiación solar sin recurrir a sistemas de climatización artificial, ofreciendo una solución sostenible, económica y replicable por las comunidades locales. De este modo, el uso del mucílago y el almidón consolida a estos elementos como recursos naturales de alto rendimiento, reforzando la integración entre la sostenibilidad, la accesibilidad económica y la eficiencia térmica en proyectos de arquitectura orientados al ecoturismo.

#### Figura 4

(A) Disposición del mucílago en la maqueta a escala. (B) Muestra del mucílago



### Diseño de la investigación

La presente investigación adoptó un diseño no experimental de nivel descriptivo, estructurado como un estudio de caso tecnológico de carácter exploratorio. Dado que el objetivo principal se centró en la evaluación y caracterización técnica del prototipo en un escenario específico, el análisis de datos se orientó al reporte de mediciones puntuales y valores únicos de las variables físicas, prescindiendo de análisis estadísticos inferenciales. Para fines metodológicos, se definieron como componentes de análisis el sistema térmico pasivo (compuesto por el biopanel de carrizo y el aglomerante natural de mucílago de tuna) y el comportamiento térmico interior del módulo. El estudio se llevó a cabo en condiciones de exposición a la intemperie, sometiendo el prototipo a la radiación solar directa y a las oscilaciones térmicas reales del entorno local, lo que permitió evaluar la respuesta y la eficiencia del material en condiciones climáticas reales.

Para la obtención de datos empíricos, se empleó la técnica de observación cuantitativa directa. El instrumento principal de medición fue un termómetro digital de precisión infrarroja, utilizado para registrar simultáneamente las temperaturas superficiales y ambientales, expresadas en grados Celsius. Asimismo, como soporte documental y para asegurar la trazabilidad y el rigor en la toma de datos de campo, se implementó un registro fotográfico detallado que registró con precisión la fecha y la hora de cada evaluación puntual.

## Procedimiento

El procedimiento empírico consistió en exponer el prototipo a condiciones reales de intemperie en la ciudad de Huánuco durante dos periodos climáticos representativos de cuatro días consecutivos cada uno: el periodo seco (del 3 al 6 de junio de 2025) y el periodo húmedo (del 20 al 23 de noviembre de 2025). La recolección de datos se realizó mediante observación cuantitativa directa utilizando un termómetro digital infrarrojo, y se registraron simultáneamente las temperaturas interiores y exteriores del prototipo en grados Celsius. Las mediciones se efectuaron diariamente en dos horarios críticos: a las 10:00 a. m., correspondiente al periodo de mayor radiación solar directa, y a las 4:00 p. m., caracterizado por el descenso de la temperatura ambiental. En total, se consolidaron dieciséis registros síncronos, respaldados por un registro fotográfico para garantizar la trazabilidad de las mediciones. Los datos obtenidos fueron tabulados para su análisis descriptivo y se calcularon las variaciones térmicas, como la diferencia entre las temperaturas registradas en ambos horarios de medición.

## Análisis de datos

Los datos cuantitativos obtenidos a partir de las mediciones térmicas se tabularon de manera estructurada para su posterior procesamiento. Se empleó estadística descriptiva básica, calculando la diferencia de temperatura como la diferencia entre las temperaturas exteriores e interiores del prototipo en cada corte horario. Estos criterios estadísticos, junto con el cálculo de la variación térmica diaria observada en las mañanas y en las tardes de ambos periodos, permitieron cuantificar la capacidad de amortiguamiento y la estabilidad térmica del material.

## Resultados

La evaluación del comportamiento térmico del prototipo evidenció diferencias significativas entre el espacio interior y el ambiente exterior en ambos periodos climáticos analizados, lo que demuestra la capacidad aislante del sistema compuesto por biopaneles de carrizo y mucílago de tuna. Los registros obtenidos durante el periodo seco (Tabla 1) reflejan que, en el horario de mayor incidencia solar (10:00 a. m.), las temperaturas interiores se mantuvieron en un rango más alto y más estable, de 36 a 37 °C, en comparación con las temperaturas exteriores, de 32 a 33 °C. Por el contrario, durante el descenso térmico vespertino (4:00 p. m.), la temperatura ambiental exterior disminuyó marcadamente hasta valores de entre 19.5 y 20.5 °C, mientras que el espacio interior del prototipo experimentó un enfriamiento más gradual, con temperaturas de entre 27.8 y 32.7 °C. Esta dinámica demuestra que el prototipo mitiga el impacto de las fluctuaciones ambientales bruscas durante la temporada seca.

**Tabla 1**

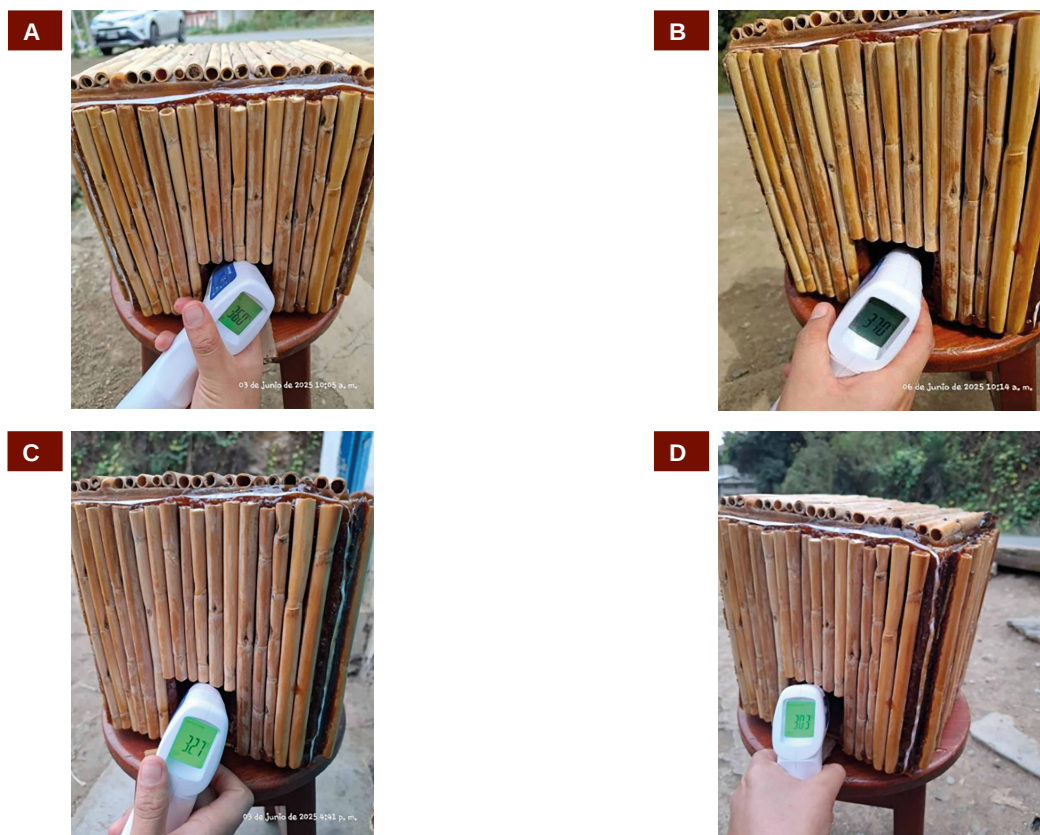
*Registros térmicos del periodo seco (junio de 2025)*

Fecha	Hora	Temperatura exterior (°C)	Temperatura interior (°C)	Diferencia de temperatura
3 de junio	10:00 a. m.	32°	36°	4°
	4:00 p. m.	19.5°	32.7°	13.2°
4 de junio	10:00 a. m.	33°	36.2°	3.2°
	4:00 p. m.	9.9°	27.8°	7.9°
5 de junio	10:00 a. m.	32.3°	36.9°	4.6°
	4:00 p. m.	20.5°	30.4°	9.9°
6 de junio	10:00 a. m.	32°	37°	5°
	4:00 p. m.	20.4°	30.3°	9.9°

Para el periodo húmedo (Tabla 2), el monitoreo matutino (10:00 a. m.) mostró temperaturas interiores fluctuantes entre 33.4 y 34.8 °C, frente a un rango exterior más bajo, de 28 a 29.2 °C. En el turno vespertino (4:00 p. m.), mientras el ambiente exterior registró un descenso notable hasta alcanzar valores mínimos de 18.9 a 19.6 °C, el interior del espécimen mantuvo una alta estabilidad térmica, con valores de entre 31.3 y 34.7 °C. Estos datos constatan que la configuración del paquete constructivo ofrece una mayor inercia y amortiguamiento térmico bajo condiciones de alta humedad.

**Figura 5**

Horas y fechas de las pruebas de temperatura interna. (A) 3 de junio de 2025 / 10:05 a. m. (B) 6 de junio de 2025 / 10:14 a. m. (C) 3 de junio de 2025 / 4:41 p. m. (D) 6 de junio de 2025 / 5:01 p. m.



**Análisis comparativo de la oscilación térmica**

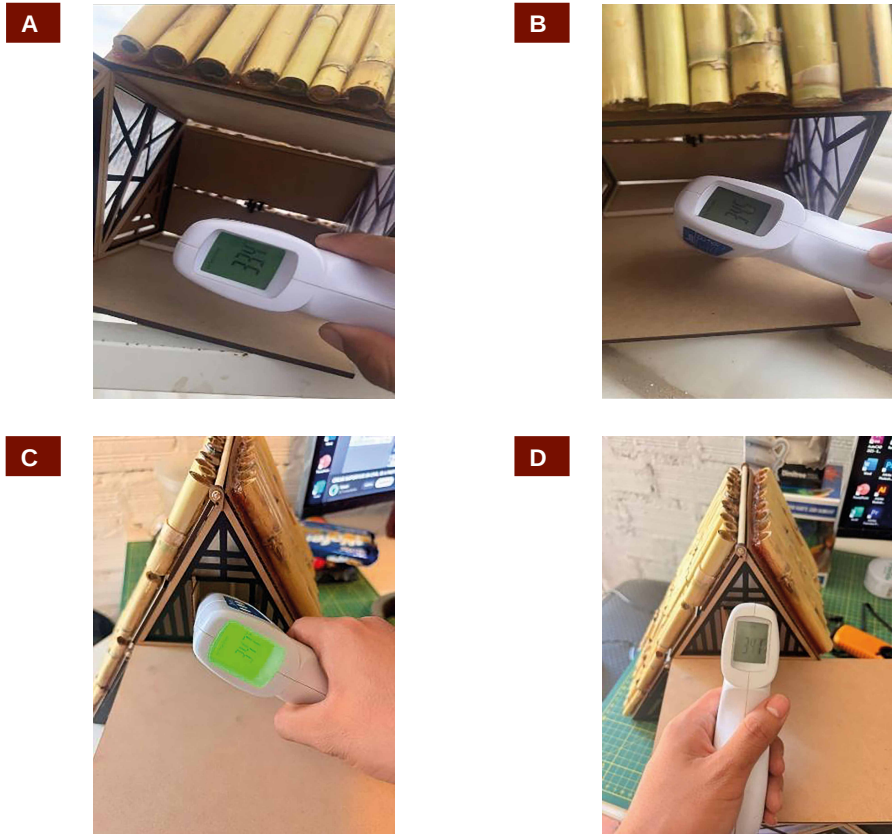
El análisis de las variaciones térmicas netas entre los dos horarios de control revela un comportamiento aislante diferencial del biopanel en función de la estacionalidad. Durante el periodo seco, la oscilación térmica del ambiente exterior alcanzó los 12.5 °C, mientras que en el interior del prototipo se redujo a 9.2 °C. Este fenómeno de amortiguación fue aún más evidente en el periodo húmedo, donde la fluctuación exterior de 10.3 °C se redujo drásticamente a solo 3.5 °C en el interior. En síntesis, la comparación interestacional demuestra que el prototipo experimental amortigua de manera efectiva las oscilaciones térmicas del entorno real en ambas épocas del año, alcanzando su máximo rendimiento y estabilidad térmica interior durante el periodo húmedo.

**Tabla 2**  
Registros térmicos del periodo húmedo (noviembre de 2025)

Fecha	Hora	Temperatura exterior (°c)	Temperatura interior (°c)	Diferencia de temperatura
20 de noviembre	10:00 a. m.	28°	33.4°	5.4°
	4:00 p. m.	18.9°	34.7°	15.8°
21 de noviembre	10:00 a. m.	29.2°	34.8°	5.6°
	4:00 p. m.	19.6°	32.8°	13.2°
22 de noviembre	10:00 a. m.	28.9°	33.7°	4.8°
	4:00 p. m.	19.2°	34.4°	15.2°
23 de noviembre	10:00 a. m.	29°	34.5°	5.5°
	4:00 p. m.	19.4°	31.3°	11.9°

**Figura 6**

Resultados de las pruebas realizadas en diferentes periodos de evaluación. (A) Prueba del 20 de noviembre de 2025 (10:37 a. m.). (B) Prueba del 23 de noviembre de 2025 (10:28 a. m.). (C) Prueba del 20 de noviembre de 2025 (4:10 p. m.). (D) Prueba del 23 de noviembre de 2025 (4:19 p. m.)

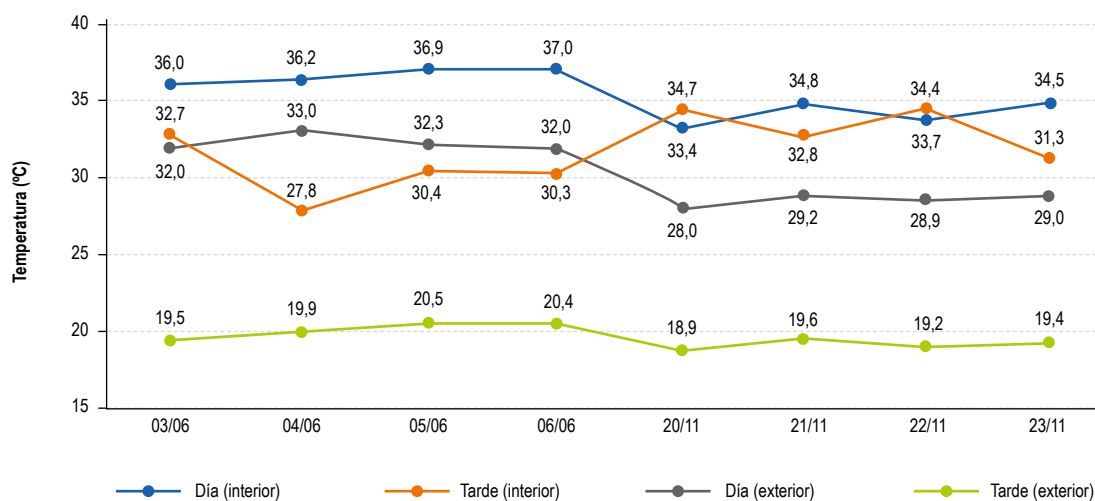


El análisis de las variaciones térmicas netas entre los dos horarios de control revela un comportamiento aislante diferencial del biopanel en función de la estacionalidad. Durante el periodo seco, la oscilación térmica del ambiente exterior alcanzó los 12.5 °C, mientras que en el interior del prototipo se redujo a 9.2 °C. Este fenómeno de amortiguación fue aún más evidente en el periodo húmedo, donde la fluctuación exterior de 10.3 °C se redujo drásticamente a solo 3.5 °C en el interior. En síntesis, la comparación interestacional demuestra que el prototipo experimental amortigua de manera efectiva las oscilaciones térmicas del entorno real en ambas épocas del año, alcanzando su máximo rendimiento y estabilidad térmica interior durante el periodo húmedo (Figura 7).

Durante el periodo seco, el monitoreo matutino (10:00 a. m.) evidenció que las temperaturas interiores del prototipo experimental oscilaron entre 28 y 35 °C, frente a un promedio ambiental exterior de 34 °C, marcando las primeras diferencias térmicas estacionales. Sin embargo, el comportamiento más notable se registró por la tarde (4:00 p. m.), cuando la temperatura exterior descendió bruscamente hasta valores cercanos a los 18 °C, mientras que el interior del cubo retuvo el calor entre los 31.3 y los 34.7 °C, demostrando la capacidad del paquete constructivo para ralentizar la pérdida de energía y actuar como un amortiguador térmico. Este efecto de estabilización térmica interior se confirmó analíticamente al evaluar las variaciones netas entre ambos horarios de control, donde la fluctuación exterior de junio (periodo seco) alcanzó los 12.5 °C, frente a una variación interior de solo 9.2 °C, un fenómeno de amortiguamiento que fue todavía más marcado en noviembre (periodo húmedo), donde la oscilación exterior de 10.3 °C se redujo a una variación interior de apenas 3.5 °C. Estas cifras consolidan el rendimiento del material al garantizar una elevada inercia térmica interna, especialmente durante las horas críticas de enfriamiento ambiental.

Figura 7

Comparación de las temperaturas interiores y exteriores registradas durante los periodos seco y húmedo



## Discusión

Los resultados obtenidos en las dos etapas de medición —junio (clima seco) y noviembre (clima húmedo)— evidencian un comportamiento térmico significativamente más estable en el prototipo que en el ambiente exterior. Esta estabilidad confirma la efectividad del sistema compuesto por carrizo, mucílago de tuna y membrana rebatible como estrategia pasiva. Al comparar estos hallazgos con estudios similares, el comportamiento del prototipo coincide con lo reportado por Pérez et al. (2011) y Lewandowski et al. (2003), quienes demuestran que el uso de fibras vegetales y sistemas pasivos naturales reduce la demanda energética y mejora el aislamiento térmico frente a los materiales industriales convencionales. Asimismo, el confort alcanzado se alinea estructuralmente con los principios de la arquitectura bioclimática descritos por Givoni (1998) y Olgyay (2015).

Al analizar los datos específicos, se observa que durante las horas de mayor radiación (10:00 a. m.) el interior alcanza temperaturas ligeramente superiores a las del exterior, con diferencias de 3 a 5,6 °C. Este fenómeno de captación térmica controlada se debe a la estructura física del carrizo (*Arundo donax*). Tal como indican Lewandowski et al. (2003), esta gramínea posee tallos huecos que generan cámaras de aire continuas de baja conductividad térmica. Esto le confiere una baja conductividad térmica, lo que permite acumular calor de forma moderada sin que el interior sufra un sobrecalentamiento brusco. Por otro lado, el comportamiento más crítico e importante se observa durante las horas de enfriamiento (4:00 p. m.). Mientras la temperatura exterior cae drásticamente hasta 18-20 °C, el interior del módulo se mantiene entre 27 y 34 °C, lo que reduce la pérdida térmica en 7-15 °C. ¿Por qué se produce este nivel de retención térmica? La respuesta radica en el uso del biopanel a base de tuna. Como señalan Feugang et al. (2006) y Cobana y Antezana (2007), el mucílago y la amilopectina actúan como estabilizantes con una fuerte capacidad aglutinante. En el sistema constructivo evaluado, este biomaterial actúa como un sellante orgánico que rellena los microespacios entre el triplay y el carrizo, evitando la infiltración de aire frío del exterior y reteniendo eficientemente el calor captado durante la mañana.

Finalmente, la estabilidad comprobada en los datos valida la pertinencia operativa del sistema rebatible. Que la temperatura interna se conserve durante las tardes demuestra que la membrana actúa como una barrera aislante eficaz cuando está cerrada. Este resultado se alinea con lo planteado por Kronenberg (2007), quien sostiene que los sistemas modulares y rebatibles permiten gestionar activamente la radiación y la ventilación según las condiciones del entorno. En síntesis, el módulo propuesto cumple con los parámetros de eficiencia de los cerramientos térmicos (Neila González, 2004), lo que demuestra empíricamente que la combinación del diseño triangular y de materiales vernáculos genera un microclima interior estable y autosuficiente.

A pesar de los resultados positivos en la estabilidad térmica del módulo, la investigación presenta limitaciones metodológicas y técnicas que deben precisarse en futuras réplicas. En primer lugar, la recolección de datos empíricos se limitó a un diseño descriptivo basado en un estudio de caso tecnológico exploratorio, lo que conllevó prescindir de análisis estadísticos inferenciales más complejos o de un modelado computacional predictivo de fluidos (CFD). Asimismo, la muestra evaluada consistió en un prototipo cúbico experimental, a escala reducida de 20 × 20 cm, expuesto temporalmente a la intemperie. Si bien este prototipo reprodujo con rigor la estratigrafía del paquete constructivo de carrizo y mucílago de tuna, no refleja las dinámicas espaciales de ventilación y ocupación reales ni las cargas térmicas internas propias de un módulo habitable macroecoturístico completo. Finalmente, el procedimiento de monitoreo de campo se limitó a periodos climáticos puntuales de cuatro días consecutivos en cada estación (seco y húmedo) en la ciudad de Huánuco, restringiendo las lecturas a dos horarios críticos por jornada. Por lo tanto, no se evaluó el comportamiento térmico continuo de veinticuatro horas ni la degradación, la durabilidad ni la vulnerabilidad biológica de los aglomerantes orgánicos a largo plazo.

## Conclusión

La investigación demuestra que el módulo ecoturístico prefabricado, con su estructura triangular rebatible, es una solución técnica y sostenible que garantiza estabilidad indeformable y ligereza para un montaje rápido en entornos naturales. Se confirmó que el diseño bioclimático integral (orientación, ventilación y separación del suelo) permite un confort térmico pasivo sin climatización artificial, apoyado por una membrana térmica rebatible dispuesta sobre un sistema rebatible que se apoya en el marco triangular de la estructura, la cual regula la radiación y retiene el calor. Los resultados validaron la alta eficiencia del biopanel de carrizo y mucílago de tuna, destacando que en junio la variación térmica interior fue de solo 9.2 °C, frente a los 12.5 °C del exterior, mientras que en noviembre la estabilidad fue aún mayor, con apenas 3.5 °C de cambio interno ante una fluctuación externa de 10.3 °C. El sistema permitió mantener el interior entre 27 y 35 °C cuando el exterior descendía a 18-20 °C, logrando diferencias constantes de entre 7 y 15 °C por encima del entorno en horas críticas, gracias a la baja conductividad del carrizo y al sellado orgánico del mucílago.

La importancia de este estudio radica en la sinergia funcional de sus componentes: el carrizo, como aislante tubular; el mucílago, como sellante contra las infiltraciones; y la ventana rebatible, como regulador dinámico, lo que reduce significativamente la huella energética. Las implicancias de estos hallazgos sugieren que la integración de la biofabricación y la arquitectura bioclimática puede transformar la infraestructura turística en microclimas autosuficientes y culturalmente adaptados. Como recomendación, dado que los resultados corresponden a una validación preliminar a escala experimental, es imperativo realizar estudios adicionales en módulos habitables a escala real. Se sugiere priorizar la evaluación de la durabilidad a largo plazo de los biomateriales, un análisis detallado de los costos de implementación y un examen crítico de su replicabilidad social y económica, lo que abriría camino a una transición efectiva hacia soluciones constructivas sostenibles.

## Referencias

- Cobana, M., y Antezana, R. (2007). Proceso de extracción de almidón de yuca por vía seca. *Revista Boliviana de Química*, 24(1), 77-83. <http://www.scielo.org.bo/pdf/rbqv/v24n1/v24n1a14.pdf>
- Gere, J. M., y Timoshenko, S. P. (1997). *Mecánica de materiales* (4.ª ed.; J. de la Cera Alonso, trad.). International Thomson Editores.
- Givoni, B. (1994). *Enfriamiento pasivo y de baja energía en edificios*. John Wiley & Sons.
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design* [Consideraciones climáticas en el diseño de edificios y urbanismo]. John Wiley & Sons.
- González Meza, E. (2016). *Estructuras de retícula triangular: transformaciones constructivas de las edificaciones* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio Institucional UPM. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.42929>
- Hiramoto, C. (2016, 6 de noviembre). *Pempén: módulo transformable para la selva por estudiantes peruanos*. ArchDaily. [https://www.archdaily.cl/cl/797538/pempen-modulo-transformable-para-la-selva-por-estudiantes-peruanos/581de7dfe58ece9230000075-pempen-modulo-transformable-para-la-selva-por-estudiantes-peruanos-proceso-de-construccion?next\\_project=no](https://www.archdaily.cl/cl/797538/pempen-modulo-transformable-para-la-selva-por-estudiantes-peruanos/581de7dfe58ece9230000075-pempen-modulo-transformable-para-la-selva-por-estudiantes-peruanos-proceso-de-construccion?next_project=no)
- Honey, M. (2008). *Ecotourism and sustainable development. Who owns paradise?* [Ecoturismo y desarrollo sostenible. ¿Quién es el dueño del paraíso?] (2.ª ed.). Island Press.
- Feugang, J. M., Konarski, P., Zou, D., Stintzing, F. C., & Zou, C. (2006). Nutritional and medicinal use of Cactus pear (*Opuntia*

- spp.) cladodes and fruits. *Frontiers in Bioscience*, 11(3), 2574-2589. <https://doi.org/10.2741/1992>
- Kronenburg, R. (2007). *Flexible: Architecture that responds to change* [Flexible: arquitectura que responde al cambio]. Laurence King Publishing.
- Lewandowski, I., Scurlock, J. M. O., Lindvall, E., & Christou, M. (2003). The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy*, 25(4), 335-361. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00030-8)
- Neila González, F. J. (2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Munilla-Lería.
- Olgay, V. (2015). *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism* [Diseño con el clima: enfoque bioclimático del regionalismo arquitectónico]. Princeton University Press.
- Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J. M., & Cabeza, L. F. (2011). Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Applied Energy*, 88(12), 4854-4859. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.032>
- Smith, R. E. (2010). *Prefab architecture: A guide to modular design and construction* [Arquitectura prefabricada: una guía para el diseño y la construcción modular]. John Wiley & Sons.
- Torroja, E. (1957). *Razón y ser de los tipos estructurales*. Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento.
- World Intellectual Property Organization. (2024). 1. PE2024-1165 - *Módulo de estructura triangular prefabricado, armable y rebatible con aislamiento térmico y control de asoleamiento*. PATENTSCOPE. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=PE433335122>

#### Contribución de los autores

PRRV: investigador principal, supervisión general del proyecto, conceptualización y desarrollo del estudio.

JSHZ: coinvestigador, redacción de resultados y discusión.

ECG: redacción de resultados.

JAPSM: redacción de resultados.

LDAO: coinvestigador conceptualización y desarrollo del estudio.

HRZV: metodología y estadística del estudio.

#### Fuentes de financiamiento

Este estudio se realizó con recursos propios de los autores y apoyo logístico de la universidad, sin financiamiento externo específico.

#### Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés. No existen relaciones financieras, personales o profesionales que puedan influir en los resultados presentados.

#### Correspondencia:

Pablo Renato Rojas Vidal

E-mail: pablo.rojas@udh.edu.pe