

REVISIÓN SISTEMÁTICA DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE ESTRATEGIAS DE CAPTACIÓN SOLAR EN VIVIENDAS ALTOANDINAS

SYSTEMATIC REVIEW OF THE THERMAL PERFORMANCE OF SOLAR CAPTURE STRATEGIES IN HIGH ANDEAN DWELLINGS

REVISÃO SISTEMÁTICA DO DESEMPENHO TÉRMICO DE ESTRATÉGIAS DE CAPTAÇÃO SOLAR EM HABITAÇÕES DA REGIÃO ALTOANDINA

Frank Saldaña-Acuña

Arquitecto
 Arquitecto, Facultad de Ingeniería
 Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú
<https://orcid.org/0009-0002-9727-1036>
 1520778@utp.edu.pe

Francisco Soto-Holgado

Magíster en Arquitectura y Medio ambiente
 Docente, Facultad de Ingeniería
 Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-1815-3350>
 C19333@utp.edu.pe



RESUMEN

Las viviendas altoandinas del Perú ubicadas entre los 3,000 a 5,000 m.s.n.m., enfrentan condiciones críticas de confort térmico por temperaturas invernales de -3°C a -20°C y limitada capacidad constructiva para conservar el calor. Aunque existen investigaciones sobre sistemas pasivos, no se cuenta con una comparación sistemática que evalúe la eficiencia de las estrategias según las condiciones térmicas y ambientales características de la región. Ante este vacío, el presente estudio aplica la metodología PRISMA para identificar y comparar estrategias pasivas de captación solar orientadas a mejorar el confort térmico, a partir de 15 investigaciones publicadas entre los años 2013 y 2024, cuyos resultados muestran que las estrategias semidirectas, como muros Trombe e invernaderos adosados, alcanzan los mayores incrementos térmicos, mientras que las de captación directa y almacenamiento complementan la estabilidad interior. En conjunto, estos sistemas establecen una base técnica para el diseño bioclimático de viviendas altoandinas adaptadas a climas fríos.

Palabras clave

captación solar, calentamiento solar pasivo, confort térmico, arquitectura solar

ABSTRACT

High-Andean dwellings in Peru, located between 3,000 and 5,000 meters above sea level, face critical thermal comfort conditions due to winter temperatures ranging from -3°C to -20°C and limited construction capacity to retain heat. Although there are studies on passive systems, there is no systematic comparison that evaluates the efficiency of these strategies, considering the region's typical thermal and environmental conditions. This study addresses this gap by using the PRISMA methodology to identify and compare passive solar gain strategies aimed at improving thermal comfort, based on 15 investigations published between 2013 and 2024. The results show that semidirect strategies, such as Trombe walls and attached greenhouses, achieve the highest temperature increases, while direct gain and storage systems contribute to indoor thermal stability. Together, these systems establish a technical basis for the bioclimatic design of high Andean dwellings adapted to cold climates.

Keywords

solar capture, passive solar heating, thermal comfort, solar architecture

RESUMO

As residências nas altas montanhas do Peru, localizadas entre 3.000 e 5.000 metros acima do nível do mar, enfrentam condições críticas de conforto térmico devido às temperaturas inverniais de -3°C a -20°C e à capacidade limitada das construções para conservar o calor. Embora existam pesquisas sobre sistemas passivos, não há uma comparação sistemática que avalie a eficiência das estratégias de acordo com as condições térmicas e ambientais características da região. Diante dessa lacuna, o presente estudo aplica a metodologia PRISMA para identificar e comparar estratégias passivas de captação solar destinadas a melhorar o conforto térmico, a partir de 15 investigações publicadas entre os anos de 2013 e 2024, cujos resultados mostram que as estratégias semidiretas, como paredes Trombe e estufas anexas, alcançam os maiores aumentos térmicos, enquanto as de captação direta e armazenamento complementam a estabilidade interior. Em conjunto, estes sistemas estabelecem uma base técnica para o projeto bioclimático de habitações andinas adaptadas a climas frios.

Palavras-chave

captação solar, aquecimento solar passivo, conforto térmico, arquitetura solar

INTRODUCCIÓN

Las regiones altoandinas del Perú situadas entre los 3 000 y 5 000 m.s.n.m., presentan condiciones climáticas extremas caracterizadas por bajas temperaturas, marcadas oscilaciones térmicas y frecuentes episodios de heladas (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 2020). Durante la temporada de invierno, la temperatura puede descender hasta -20°C , lo que genera ambientes interiores nocturnos cercanos o incluso inferiores a 0°C , lo que repercute gravemente en la salud, el bienestar y la calidad de vida de la población rural, especialmente en niños y adultos mayores. Esta problemática se intensifica por la pobreza energética, el limitado acceso a tecnologías eficientes y la precariedad de los sistemas constructivos tradicionales, que emplean materiales de baja inercia térmica y escaso aprovechamiento de la radiación solar, que originan viviendas con deficientes condiciones de habitabilidad (Wieser et al., 2021).

Ante esta problemática, las estrategias pasivas de captación solar han emergido como una solución técnicamente viable y económicamente accesible para mejorar las condiciones térmicas en viviendas altoandinas. En este contexto, algunos estudios han abordado la temática mediante revisiones de literatura científica. Cerrón Contreras (2022) recopiló artículos sobre sistemas de calefacción pasiva aplicados a viviendas altoandinas, concluyéndose que las estrategias más eficientes alcanzaron incrementos térmicos de $\Delta T = 9.5\text{ K}$ en la temperatura interior, con valores pico de $\Delta T = 22\text{ K}$, respecto a condiciones exteriores cercanas a -7°C . De manera complementaria, Molina Fuentes et al. (2020) realizaron una evaluación sistemática del desempeño térmico de un módulo experimental de vivienda altoandina en San Francisco de Raymina, Ayacucho (3,700 m.s.n.m.). El estudio consideró doce configuraciones que incorporaban técnicas arquitectónicas pasivas (piso aislado, dobles puertas, ventanas con doble vidrio), sistemas solares activos (muro radiante y

tubo radiante) y cargas internas (cocina a gas y pernoctación). Los resultados reportaron incrementos de $\Delta T = 9.5\text{ K}$ y picos de hasta $\Delta T = 16.6\text{ K}$ durante horas críticas de madrugada, en relación con temperaturas exteriores de -7.1°C .

Pese a los avances descritos, las limitaciones metodológicas identificadas en los estudios previos evidencian la necesidad de una comparación sistemática que permita identificar qué estrategias pasivas son más eficientes según el tipo de sistema y las condiciones locales específicas de las regiones altoandinas. Comprender cómo los materiales de construcción, la radiación solar y el clima influyen en el comportamiento térmico de las viviendas es clave para evaluar el potencial y las limitaciones de cada estrategia mediante criterios de calidad metodológica rigurosos y clasificaciones tipológicas estructuradas.

En este marco, el presente estudio tiene como objetivo analizar comparativamente, mediante una revisión sistemática de literatura científica publicada entre 2013 y 2024, el desempeño térmico de distintas estrategias pasivas de captación solar en viviendas altoandinas. Estas se clasifican en tres grupos: captación directa, semidirecta, conservación y almacenamiento. El propósito es identificar cuáles son más eficaces para mejorar la temperatura interior y el confort térmico, que generar lineamientos técnicos que respalden políticas públicas y programas estatales orientados a promover viviendas sociales térmicamente adecuadas en zonas altoandinas.

METODOLOGÍA

La presente investigación se realizó bajo el enfoque de las directrices PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), reconocida por su utilidad metodológica en revisiones sistemáticas al garantizar la transparencia y reproducibilidad del proceso

Tabla 1. Criterios de selección de estudios. Fuente: Elaborado por los autores.

Criterio	Inclusión	Exclusión
Idioma	Español o inglés	Otros idiomas
Acceso	Acceso abierto (texto completo disponible)	Sin acceso completo
Año de publicación	Entre (2013-2024)	Anteriores a 2013
Tipo de estudio	Estudios originales, revisiones sistemáticas, artículos de investigación	Editoriales, cartas al editor, Tesis, Libros.
Tema	Desempeño térmico y/o sostenibilidad en viviendas de zonas altoandinas o climas fríos.	Estudios sobre climas cálidos, urbanos, costeros o sin relación con el tema.
Estrategias analizadas	Estrategias pasivas de captación solar (muros Trombe, invernaderos adosados, etc.)	Sistemas activos o mecánicos de climatización.
Datos presentados	Presenta resultados cuantitativos o cualitativos sobre confort térmico, demanda energética o eficiencia energética	Estudios sin datos relevantes o cuantificable "solo teóricos"

Nota. Estos criterios garantizan la pertinencia y actualidad de la literatura analizada

Tabla 2. Cadena de búsqueda empleada en las bases de datos. Fuente: Elaborado por los autores.

Término principal	Términos relacionados	Operador booleano	Estructura de consulta
Estrategias pasivas	"diseño pasivo", "estrategias bioclimáticas"	OR	"estrategias pasivas" OR "diseño pasivo"
Desempeño térmico	"eficiencia térmica", "comportamiento térmico"	OR	"desempeño térmico" OR "eficiencia térmica"
Zonas altoandinas	"altiplano", "climas fríos", "regiones andinas"	OR	"zonas altoandinas" OR "climas fríos" OR "regiones andinas"
Captación solar	"ganancia solar", "aprovechamiento solar pasivo"	OR	"captación solar" OR "ganancia solar"
		AND (combinador general)	("estrategias pasivas" AND "desempeño térmico" AND ("zonas altoandinas" OR "climas fríos"))

Nota. Las palabras clave se combinaron al utilizar operadores booleanos (AND, OR) para enlazar las estrategias.

Tabla 3. Cadena de búsqueda empleada en las bases de datos. Fuente: Elaborado por los autores.

Término principal	Estructura de búsqueda	Resultados obtenidos
Estrategias pasivas	"estrategias pasivas" OR "diseño pasivo" OR "estrategias bioclimáticas"	24
Desempeño térmico	"desempeño térmico" OR "eficiencia térmica" OR "comportamiento térmico"	18
Zonas altoandinas	"zonas altoandinas" OR "climas fríos" OR "altiplano" OR "regiones andinas"	20
Captación solar	"captación solar" OR "ganancia solar" OR "aprovechamiento solar pasivo"	15
	Total	77

de investigación (Page et al., 2021). Por ello, la búsqueda se limitó a estudios en español e inglés de acceso abierto publicados en los últimos años, que aborden el desempeño térmico y la sostenibilidad en viviendas de zonas altoandinas o climas fríos, con énfasis en estrategias pasivas de captación solar. En ese sentido, la metodología se estructura en cuatro etapas basados en las directrices PRISMA: Criterios de elegibilidad, fuentes de información, evaluación estudios y síntesis de resultados:

ETAPA 1: CRITERIOS DE ELEGIBILIDAD

Para asegurar la calidad y relevancia de los estudios, se definieron criterios claros de inclusión y exclusión (Tabla 1) centrados en el desempeño térmico y la sostenibilidad de viviendas altoandinas con estrategias pasivas de captación solar.

ETAPA 2: FUENTES DE INFORMACIÓN

Estrategia de búsqueda

Se definieron bases de datos científicas especializadas para la recopilación de los estudios: Scopus por su cobertura amplia y multidisciplinaria en investigación

científica, SciELO por su enfoque en publicaciones de acceso abierto en Latinoamérica y el buscador de Google Académico, entre los meses de marzo y mayo del 2025. Para ello, se elaboraron cadenas de búsqueda (Tabla 2) utilizando palabras clave en español e inglés, al emplear operadores booleanos (AND, OR) para optimizar la precisión y el alcance de los resultados.

ETAPA 3: EVALUACIÓN DE ARTÍCULOS

Identificación de estudios

Tras definir la estructura de consulta, se ejecutaron búsquedas sistemáticas en las bases de datos utilizando combinaciones de términos clave relacionados con estrategias pasivas, desempeño térmico, zonas altoandinas y captación solar, conectados mediante operadores booleanos (Tabla 3).

Nota. Las búsquedas se realizaron entre marzo y abril del 2025 aplicado a artículos abiertos desde 2013.

Eliminación de duplicados

Para garantizar la precisión del proceso de revisión, se realizó la eliminación de estudios duplicados con el

Tabla 4. Cribado inicial de estudios. Fuente: Elaborado por los autores.

N°	Título del estudio	Relevancia	Motivo de decisión
1	Evaluación sistemática del desempeño térmico de un módulo experimental de vivienda alto andina para lograr el confort térmico con energía solar	Sí	Emplea estrategias de calefacción pasiva y softwares de simulación energética como Energy Plus.
2	Un enfoque bioclimático para desarrollar mapas de zonificación espacial para estrategias de confort, calefacción y refrigeración pasivas dentro de una zona compuesta de la India	No	Contexto urbano, no altoandino

Nota. Se registra la selección y descarte tras del cribado por título y resumen, que aseguran la transparencia en la revisión.

Tabla 5. Estudios representativos según criterios de inclusión y exclusión. Fuente: Elaborado por los autores.

Título (Año/Autor)	Selección	Motivo de exclusión o inclusión
Iruri Ramos et al. (2023) Valle del Colca, Perú	Incluido	Analiza estrategias pasivas de captación solar, aislamiento y hermeticidad en vivienda altoandina, con resultados experimentales de incremento térmico y confort interior.
Zwalnan et al., (2021)	Excluido	Evalúa sistemas activos de calentamiento solar de agua en Nigeria; el enfoque es en sistemas activos y el contexto geográfico/climático no corresponde a la zona altoandina de Perú.

Nota. Incluye sólo 2 estudios, seleccionados para ejemplificar el proceso de filtrado de la revisión.

objetivo de evitar redundancias y asegurar que cada publicación fuera considerada una sola vez durante el análisis. Esta depuración se llevó a cabo mediante el uso del gestor de referencias Mendeley que permitió organizar, clasificar y consolidar eficientemente los artículos seleccionados. Como resultado de los 77 estudios inicialmente recuperados de las bases de datos, se identificaron y eliminaron 17 artículos duplicados obteniéndose un total de 60 estudios para la siguiente fase.

CRIBADO POR TÍTULO Y RESUMEN

Con el fin de garantizar la transparencia del proceso de selección, se elaboró una tabla de cribado (Tabla 4) con dos estudios representativos, evaluados en función del título y el resumen. Esta se presenta a continuación como evidencia metodológica de la etapa preliminar de revisión.

Durante la etapa de cribado inicial, se excluyeron 33 de los 60 estudios preliminares por centrarse en sistemas activos o desarrollarse en contextos no altoandinos. Como resultado, se identificaron 27 investigaciones potencialmente relevantes para el análisis del desempeño térmico en viviendas ubicadas en zonas altoandinas.

ETAPA 4: SINTESIS Y RESULTADOS

Tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión establecidos en la Tabla 1, se procedió a evaluar el texto

completo de las 27 investigaciones preseleccionadas, al considerar su relevancia temática y metodológica. En esta etapa se presentan dos estudios representativos, con el fin de ilustrar de manera clara y transparente el proceso de evaluación y clasificación, para evitar sobrecargar el documento (Tabla 5).

La selección de los estudios incluidos y excluidos responde a las directrices de PRISMA 2020 y a las recomendaciones metodológicas propuestas por Gisbert & Bonfill (2004) para revisiones sistemáticas, al priorizar la presentación de ejemplos paradigmáticos que reflejen el cumplimiento riguroso de los criterios establecidos. Por ejemplo, se incluyó el estudio de Iruri Ramos et al. (2023), por analizar estrategias pasivas en el Valle del Colca (Arequipa), respaldado por datos cuantitativos que evidencian una reducción del 23 % en la demanda energética y un incremento térmico de +5.9 °C mediante aislamiento de techos con materiales locales, al emplear simulaciones dinámicas y valores específicos de transmitancia térmica para la envolvente.

De los 27 estudios preseleccionados, se seleccionaron finalmente 15 que aportan evidencia sobre el desempeño térmico de estrategias pasivas de captación solar en edificaciones altoandinas. Este proceso se sintetiza en el diagrama de flujo PRISMA (Figura1), el que detalla las etapas desde la identificación inicial hasta la selección final. Estas investigaciones constituyen la base para la sección de resultados y discusión del presente estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis de los resultados de las 15 investigaciones seleccionadas, estas se organizaron según el tipo de estrategia pasiva de captación solar empleada, sintetizada en tres sistemas de ganancia térmica. Esta clasificación permitió agrupar los estudios en tres tablas comparativas, lo que facilitó tanto el análisis de los incrementos térmicos reportados (ΔT en K) entendiéndose que siempre ΔT como diferencia de temperatura entre ambiente interior y exterior como la evaluación de la eficacia de cada sistema en relación con el contexto geográfico, el volumen del espacio climatizado y el área de captación disponible.

GANANCIA POR SISTEMA DE CAPTACIÓN DIRECTA

La tabla 7, resume los principales hallazgos de investigaciones que implementaron estrategias de captación solar directa en viviendas altoandinas, que priorizan la orientación, el tipo de elemento captador (claraboyas, ventanas o colectores) y su impacto térmico.

Los sistemas captadores directos demostraron que las claraboyas implementadas por Molina et al. (2021) en San Francisco de Raymina, Ayacucho, constituyen la estrategia más exitosa al lograr un incremento térmico de $\Delta T = 16.6$ K durante el invierno andino. El hallazgo más importante revela que claraboyas de tan solo 2.4 m^2 pueden contribuir significativamente a las ganancias solares totales de una vivienda, lo que evidencia una relación costo - beneficio de (6.9 K/m^2) que aprovecha

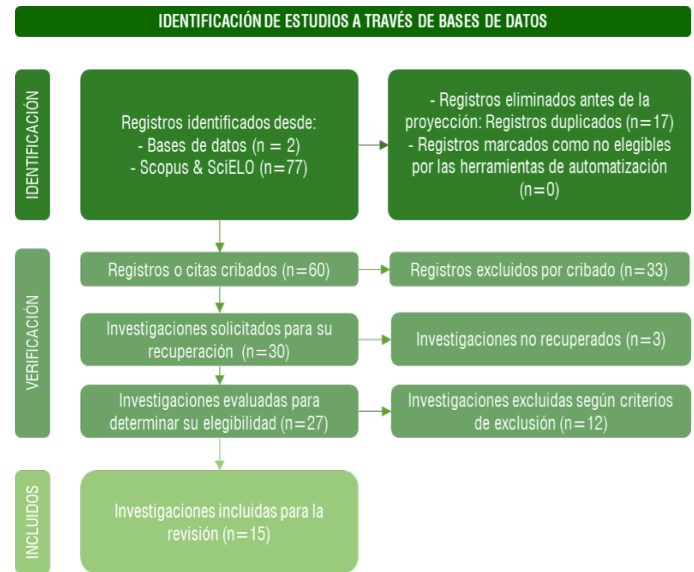


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA. Fuente: Elaborado por los autores.

la alta radiación solar cenital disponible en zonas altoandinas.

GANANCIA POR SISTEMA DE CAPTACIÓN SEMIDIRECTO

La Tabla 8, resume tres estudios representativos que aplicaron estrategias de captación solar semidirecta en viviendas altoandinas, que evalúan su impacto en la ganancia térmica durante la temporada invernal. Las

Tabla 7. Investigaciones que emplearon sistemas de captación directa. Fuente: Elaborado por los autores.

Autor (Año) - Ubicación, Altitud	Estrategia	Área captación (m ²)	Volumen climatizado (m ³)	Espesor/ Material	Conductividad (W/m·K)	ΔT (K)	Rel. $\Delta T/\text{m}^2$	Tipo estudio
Molina et al. (2021) - San Francisco de Raymina, Ayacucho, 3,700 m.s.n.m.	Claraboya policarbonato cenital	2.4	65	Policarbonato alveolar 0.006 m	0.19	16.6	6.9	Experimental
Cerrón Conteras (2024) - Sabaino, Apurímac, 4,000 m.s.n.m.	Tragaluces cenitales	3.0	60	Adobe típico, chapa metálica	0.85/50.0	10.0	3.33	Experimental
Resano et al. (2021) - Cusco, 3,399 m.s.n.m.	Ventanas norte + claraboyas cenitales	2.5	55	Adobe 0.25 m, fibrocemento	0.72/0.35	3.0	1.2	Experimental
Soto Holgado & Salcedo Guillén (2024) - Cusco, 3,214 m.s.n.m.	Colector orientado N 20°E	14.0	62	Adobe 0.40 m, vidrio doble	1.40/0.80	16.0	1.14	Simulado

Nota: Cuatro de las quince investigaciones aplicaron captación solar directa en viviendas altoandinas.

Tabla 8. Investigaciones que emplearon sistemas de captación semidirecto. Fuente: Elaborado por los autores.

Autor (Año) - Ubicación, Altitud	Estrategia	Área captación (m ²)	Volumen climatizado (m ³)	Espesor/ Material	Conductividad (W/m·K)	ΔT (K)	Rel. ΔT/m ²	Tipo estudio
Facelli Sanchez & Mercado Hancco (2024) - Cusco, 3,365 m.s.n.m.	Muro Trombe + pellets acrílicos	12.0	132	Ladrillo 0.25 m, vidrio 0.008 m, pellets 0.025 m	0.65/5.60/0.20	28.6	2.38	Simulado
Ponce Gonzales et al. (2021) - Imata, Arequipa, 4,519 m.s.n.m.	Invernadero adosado policarbonato	18.84	27.6	Adobe 0.015 m yeso, policarbonato 0.006m	0.349/0.19	14.6	0.77	Experimental + Simulado
Silva Lindo et al. (2016) - Huaraz, Áncash, 3,080 m.s.n.m.	Invernadero adosado + ventanas acristaladas	6.0	45	Adobe, vidrio simple 0.004m	0.80/0.80	3.7	0.62	Experimental

Nota: Tres de las quince investigaciones aplicaron captación solar semidirecta en viviendas altoandinas.

Tabla 9. Ganancia térmica por estrategias basadas en conservación y almacenamiento. Fuente: Elaborado por los autores.

Autor (Año) - Ubicación, Altitud	Estrategia	Área envolvente (m ²)	Volumen climatizado (m ³)	Espesor/ Material	Conductividad (W/m·K)	ΔT (K)	Rel. ΔT/m ²	Tipo estudio
Molina Fuentes et al. (2020) - San Francisco de Raymina, Ayacucho, 3,700 m.s.n.m.	Estrategias pasivas combinadas	8.0	90	Sistema combinado	0.35	9.5	1.19	Simulado
Wieser et al. (2021) - Orduña, Puno, 4,200 m.s.n.m.	Materiales naturales + aislamiento	8.0	72	Material natural 0.20m	0.15	8.0	1	Experimental
Parí Quispe et al. (2021) - Puno, 3,800 m.s.n.m.	Totora Lago Titicaca muros/ techos	15.0	78	Totora 0.15m	0.09	7.6	0.51	
Flores Condori (2014) - Colloco, llave, Puno, 3,500 m.s.n.m.	Adobe + piedra porosa + madera ciprés	10.0	110	Adobe 0.40m piedra porosa	0.72/0.55	7.5	0.75	Experimental
Espinoza Montes (2013) - Junín, 3,800 m.s.n.m.	Colector solar + cámara almacenamiento	6.84	5.76	Colector optimizado	0.30	6.0	0.88	Experimental
Iruri Ramos et al. (2023) - Valle del Colca, Arequipa, 3,600 m.s.n.m.	Aislamiento techos + muros tierra compactada	8.5	85	Tierra compactada, aislamiento	0.45/0.04	5.9	0.69	Experimental
Molina-Fuertes et al. (2024) - Imata, Arequipa, 4,500 m.s.n.m.	Pared cavidades resistencia térmica	9.0	55	Pared con cavidades	0.25	5.9	0.66	Experimental
Jimenez et al. (2017) - Región altoandina peruana, >4,000 m.s.n.m.	Aislantes autóctonos envolvente	12.0	50	Materiales locales 0.18m	0.11	5.0	0.42	Experimental

Nota: Los estudios muestran que materiales naturales y técnicas simples mejoran el confort térmico en viviendas altoandinas.

investigaciones incluyen sistemas como muros Trombe e invernaderos adosados, al detallar su configuración, altitud de emplazamiento y resultados térmicos alcanzados, esta información permite comparar la eficacia relativa de cada intervención en contextos climáticos fríos de altura.

Los sistemas semidirectos mostraron el mayor rendimiento térmico, al destacar un muro Trombe modificado con pellets de acrílico desarrollado en Cusco por Facelli Sanchez & Mercado Hanccho (2024), que alcanzó incrementos de hasta $\Delta T = 28.6$ K en invierno con la temperatura ambiente de -0.4°C . La incorporación de medios porosos mejoró significativamente la termo circulación y el almacenamiento de calor, al mantener el confort interior en las horas más frías.

GANANCIA TÉRMICA POR CONSERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO

La Tabla 9, reúne ocho estudios sobre estrategias pasivas aplicadas en viviendas altoandinas, ubicadas por encima de los 3,000 m.s.n.m., que se centran en dos mecanismos complementarios: la conservación del calor a través de materiales con elevada resistencia térmica (aislamiento) y el almacenamiento de energía solar mediante muros y elementos de alta inercia térmica. Estas soluciones, basadas en técnicas constructivas tradicionales y en el uso de recursos locales, buscan retardar la pérdida de calor hacia el exterior y reducir la oscilación térmica las temperaturas interiores durante la temporada invernal andina.

Los sistemas de conservación y almacenamiento identificaron que el aislamiento con materiales autóctonos implementado por Wieser et al. (2021) en Orduña, Puno, constituye una estrategia exitosa al lograr $\Delta T = 8.0$ K de incremento térmico en condiciones extremas de hasta -20°C . El hallazgo más importante establece que la totora del Lago Titicaca presenta una conductividad térmica excepcional de $0.09 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, comparable con aislantes industriales modernos, pero con la ventaja de ser un recurso local, renovable y de bajo costo.

DISCUSIÓN

ANÁLISIS POR PISO ALTITUDINAL

Piso Medio (3,000-3,500 m.s.n.m.): Los sistemas de captación directa mostraron mejor performance, especialmente claraboyas cenitales con $\Delta T = 16.6$ K (Molina et al., 2021) e invernaderos adosados con $\Delta T = 3.7$ K (Silva Lindo et al., 2016). A estas altitudes, la radiación solar es intensa pero las temperaturas nocturnas no son extremas, que favorecen estrategias de captación directa.

Piso Alto (3,500-4,000 m.s.n.m.): Los sistemas semidirectos y de almacenamiento térmico demostraron

mayor eficacia. Los muros Trombe modificados con $\Delta T = 28.6$ K (Facelli Sanchez & Mercado Hanccho., 2024) y las estrategias combinadas con $\Delta T = 9.5$ K (Molina Fuente et al., 2020) mantuvieron mejor estabilidad térmica durante las horas críticas nocturnas.

Piso Muy Alto (>4,000 m.s.n.m.): En condiciones extremas, las estrategias combinadas mostraron mejores resultados. El invernadero adosado de Ponce Gonzales et al. (2021) en Imata (4,519 m.s.n.m.) logró $\Delta T = 14.6$ K, mientras que los sistemas de aislamiento con materiales naturales obtuvieron $\Delta T = 8.0$ K (Wieser et al., 2021) proporcionaron estabilidad térmica nocturna esencial para la habitabilidad.

EFICIENCIA RELATIVA POR ESTRATEGIA

Los resultados muestran que la eficiencia relativa ($\Delta T/\text{m}^2$) varía significativamente:

Máxima eficiencia: Claraboyas cenitales (6.9 K/m^2)
 Eficiencia alta: Muros Trombe modificados (2.38 K/m^2)
 Eficiencia moderada: Tragaluces cenitales (3.33 K/m^2)
 Eficiencia variable: Invernaderos adosados ($0.62\text{-}0.77 \text{ K/m}^2$)

LIMITACIONES Y CONSIDERACIONES

Entre las limitaciones identificadas destacan la dependencia de simulaciones en algunos estudios, la validación limitada en campo a largo plazo, y la escasa representación de la diversidad de microclimas altoandinos. Sin embargo, estudios como Ponce Gonzales et al. (2021) demuestran la viabilidad de validación experimental-numérica con diferencias menores a 1.1°C .

IMPLICACIONES PARA POLÍTICA PÚBLICA

Los resultados evidencian que ninguna estrategia por sí sola garantiza el confort en condiciones críticas altoandinas, requiriéndose la integración de múltiples soluciones pasivas. Para el diseño de políticas de vivienda social en el altiplano andino, se recomienda:

Piso medio: Priorizar claraboyas cenitales y captación directa

Piso alto: Implementar muros Trombe modificados y estrategias combinadas

Piso muy alto: Desarrollar sistemas de invernaderos adosados con aislamiento natural

La adopción de estas estrategias pasivas adaptadas al contexto local puede mejorar significativamente la habitabilidad y reducir la pobreza energética en viviendas altoandinas, con incrementos térmicos que oscilan entre $\Delta T = 3.0$ K y $\Delta T = 28.6$ K según la altitud y estrategia implementada.

CONCLUSIÓN

Las estrategias pasivas de captación solar en viviendas altoandinas trascienden las mejoras térmicas convencionales para constituirse como vectores de transformación del hábitat sustentable capaces de redefinir las condiciones de habitabilidad en contextos de extrema vulnerabilidad climática. Los incrementos térmicos documentados ($\Delta T = 3.0\text{ K}$ a 28.6 K) representan la diferencia entre la habitabilidad y la inhabitabilidad en altitudes donde las temperaturas nocturnas alcanzan -23°C , mientras que la diferenciación por piso altitudinal captación directa para zonas medias (3,000-3,500 m.s.n.m.), sistemas semidirectos para pisos altos (3,500 a 4,000 m.s.n.m.) y estrategias combinadas para condiciones extremas ($>4,000\text{ m.s.n.m.}$) establece una nueva cartografía del confort térmico que puede orientar políticas públicas diferenciadas. La validación de materiales autóctonos como la totora (conductividad $0.09\text{ W/m}\cdot\text{K}$) que superan el desempeño de aislantes industriales, junto con eficiencia térmica de hasta 6.9 K/m^2 en claraboyas cenitales, demuestra que el espacio construido andino puede alcanzar niveles de confort térmico comparables a edificaciones convencionales mediante intervenciones de bajo costo y alta replicabilidad.

Los resultados obtenidos evidencian el potencial de las estrategias pasivas de captación solar para reducir la demanda energética destinada a calefacción y mejorar las condiciones de confort térmico en viviendas altoandinas. Además, estos hallazgos permiten identificar oportunidades para optimizar el uso de materiales locales y promover intervenciones de bajo costo adaptadas a las particularidades climáticas de cada piso altitudinal. No obstante, se reconoce como limitación la escasez de investigaciones aplicadas en zonas ubicadas por encima de los $4\,500\text{ m.s.n.m.}$, lo que restringe la validez de los resultados en condiciones de altitud extrema. Por ello, se recomienda el desarrollo de estudios experimentales y de simulación que evalúen la replicabilidad, eficiencia térmica y viabilidad económica de estas estrategias en contextos reales, así como sus implicancias en la reducción de la pobreza energética y en la sostenibilidad de las comunidades rurales.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, F.S.A y F.S.H; Curación de datos, F.S.A y F.S.H; Análisis formal, F.S.A y F.S.H; Adquisición de financiación, F.S.A y F.S.H; Investigación, F.S.A y F.S.H; Metodología, F.S.A y F.S.H; Administración de proyecto, F.S.A y F.S.H; Recursos, F.S.A y F.S.H; Software, F.S.A y F.S.H; Supervisión, F.S.A y F.S.H; Validación, F.S.A y F.S.H; Visualización, F.S.A y F.S.H; Escritura – borrador original, F.S.A y F.S.H; Escritura – revisión y edición, F.S.A y F.S.H.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cerrón Contreras, A. (2022). Sistemas de calefacción pasiva para lograr el confort térmico en viviendas alto andinas de Perú. *Cátedra Villarreal*, 10(1), 87-99. <https://doi.org/10.24039/cv20221011379>
- Cerrón Contreras, A. (2024). Estrategias de calefacción pasiva y el confort térmico en viviendas altoandinas en Apurímac-Perú. *Cátedra Villarreal*, 11(2), 80-88. <https://doi.org/10.24039/rcv20231121629>
- Espinoza Montes, C. A. (2013). *Sistema de calefacción solar para reducir el friaje en viviendas alto andinas* [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/1165>
- Facelli Sanchez, P., & Mercado Hancoco, L. (2024). Trombe walls with porous medium insertion and their influence on thermal comfort in flats in Cusco, Peru. *Energy and Built Environment*, 5(2), 194-210. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.09.003>
- Flores Condori, A. (2014). Construcción de una vivienda solar en base a las propiedades termofísicas y evaluación experimental de su confort térmico en ilave. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 16(1), 177-186. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5893905>
- Gisbert, J. P., & Bonfill, X. (2004). ¿Cómo realizar, evaluar y utilizar revisiones sistemáticas y metaanálisis? *Gastroenterología Y Hepatología*, 27(3), 129-149. [https://doi.org/10.1016/S0210-5705\(03\)79110-9](https://doi.org/10.1016/S0210-5705(03)79110-9)
- Iruri Ramos, C., Domínguez Gómez, P., & Celis D'Amico, F. (2023). Envelope improvements for thermal behavior of rural houses in the Colca Valley, Perú. *Estoa. Journal of the Faculty of Architecture and Urbanism*, 12(23), 113-124. <https://doi.org/10.18537/est.v012.n023.a09>
- Jimenez, C., Wieser, M., & Biondi, S. (2017). Improving thermal performance of traditional cabins in the high-altitude peruvian andean region. *PLEA 2017 EDINBURGH Design to Thrive*, 3, 4101-4108. <https://repositorio.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/ddf4b73b-b8cc-4582-b836-d9ee2fca3d8e/content>
- Molina, J. R., Lefebvre, G., Espinoza, R., Horn, M., & Gómez, M. M. (2021). Bioclimatic approach for rural dwellings in the cold, high Andean region: A case study of a Peruvian house. *Energy and Buildings*, 235, 110605. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110605>
- Molina-Fuertes, J., Horn-Mutschler, M., & Gómez-León, M. (2024). Evaluación del comportamiento térmico de un sistema constructivo de pared en zona altoandina utilizando un módulo experimental. *Tecnia*, 34(2), 53-61. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v34i2.2170>
- Molina Fuentes, J. O., Horn Mutschler, M. J., & Gómez León, M. M. (2020). Evaluación sistemática del desempeño térmico de un módulo experimental de vivienda alto andina para lograr el confort térmico con energía solar. *Tecnia*, 30(1), 70-79. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v30i1.841>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M.,

Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P., & Moher, D. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>

Resano, D., Rodriguez, R., & Guillen, O. (2021). Passive Comfort Strategies for Typical Peruvian Meso-Andean Houses. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 943(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/943/1/012029>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI] (20 de abril del 2025). *Clima/Mapa Climático del Perú*. Ministerio del Ambiente Perú. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>

Silva Lindo, J., Depaz Blácido, S., & Alva Villacorta, M. (2016). Mejoramiento del confort térmico de vivienda en uso en la ciudad de Huaraz con el aprovechamiento de la energía solar pasiva. *Aporte Santiaguino*, 9(1), 37–48. <https://doi.org/10.32911/as.2016.v9.n1.211>

Soto Holgado, F., & Salcedo Guillén, R. A. (July 17-19 2024). Energy performance design and analysis of a passive collector system applied to an Andean house. 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Sustainable Engineering for a Diverse, Equitable, and Inclusive Future at the Service of Education, Research, and Industry for a Society 5.0. Hybrid Event, San Jose, Costa Rica. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.745>

Parí Quispe, D. K., Ribeiro Silva, J. C., & Silva, C. F. e. (2021). Confort térmico en viviendas sociales en la zona Mesoandina de Perú – soluciones para mejorar la calefacción pasiva usando materiales autóctonos. *Revista Latinoamericana de Ambiente Construido & Sustentabilidad*, 2(6). <https://doi.org/10.17271/rlass.v2i6.2980>

Ponce Gonzales, M. C., Molina-Fuertes, J. O., Horn-Mutschler, M. J., & Gómez-León, M.M. (2021). Evaluación térmica de modificaciones en las envolventes de módulos experimentales ubicados en el centro poblado de Imata (4519 msnm), Arequipa. *Tecnia*, 31(1), 18–27. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v21i1.1106>

Wieser, M., Rodríguez-Larraín, S., & Onnis, S. (2021). Bioclimatic strategies for high altitude tropical cold climate. Prototype validation in Orduña, Puno, Perú. *Estoa. Journal of the Faculty of Architecture and Urbanism*, 10(19), 9–19. <https://doi.org/10.18537/est.v010.n019.a01>