

Mejoramiento de la envolvente para el comportamiento térmico de viviendas rurales. Valle del Colca, Perú

Envelope improvements for thermal behavior of rural houses in the Colca Valley, Perú

Resumen:

La vivienda rural en zonas altoandinas del Perú es precaria y no apta para resistir las bajas temperaturas del clima. Se han desarrollado proyectos para mejorar el comportamiento térmico de las viviendas; pero no se han reproducido masivamente por su alto costo y el requerimiento técnico de mano de obra. Se busca analizar el comportamiento termo energético de la vivienda del Valle del Colca y ofrecer mejoras en la envolvente que puedan ser implementadas por el mismo poblador. Se analizan las condiciones climáticas, se evalúan escenarios de mejora térmica a través de simulaciones y se presenta una valoración comparativa de costos. Debido a limitaciones de precisión del software utilizado se recomienda complementar con otros programas de simulación térmica. Se concluye que el aislamiento interior del techo tiene mayor incidencia en el comportamiento térmico, disminuyendo la demanda energética en un 23%; y ejecutando todos los escenarios se logra disminuir en un 29%. Se recomienda aplicar las mejoras progresivamente, priorizando el espacio de estancia nocturna para minimizar costos.

Palabras clave: viviendas rurales; adobe; aislación térmica; clima; autoconstrucción.

Abstract:

Rural housing in the Andes of Peru is precarious and does not protect communities from the ravages of cold temperatures. This problem has justified the development of projects to improve thermal behavior; however, they have not been developed massively due to their high cost and technical requirement. This article analyzes the thermal behavior of the housing in Colca Valley and offers improvements that can be implemented by the villager. It reviews climatic conditions, typological and constructive aspects of the dwelling and proposes strategies to improve energy efficiency that are evaluated through a dynamic simulation, and a comparative evaluation of costs. Due to precision limitations of the software used, it is recommended that the results be complemented with other thermal simulation programs. It is concluded that the roof improvement has a greater impact on the thermal behavior, it decreases energy requirement in 23%; and applying all strategies, does it in 29%. It is recommended to apply strategies in a progressive way, giving priority to the night-time spaces, to achieve an affordable expense.

Keywords: rural housing; adobe; thermal insulation; weather; self – construction.

Autores:

Carla Iruri – Ramos*
ciruri@ucsm.edu.pe
Patricia Domínguez - Gómez**
patricia.dominguez@uah.es
Flavio Celis – D'amico**
flavio.celis@uah.es

*Universidad Católica de Santa
María

**Universidad de Alcalá de Henares

*Perú
**España

Recibido: 28/May/2022
Aceptado: 10/Oct/2022

1. Introducción

El Colca es un valle interandino, ubicado en la provincia de Caylloma, departamento de Arequipa, al sur del Perú. Se extiende a lo largo del río Colca, en el tramo comprendido entre los pueblos de Callalli (4 200 m.s.n.m.) y Huambo (3 200 m.s.n.m), con una extensión de más de 200 kilómetros y una profundidad de más de 3200 metros. Se conviene que al formar parte de la región natural Suni (Pulgar, 2014) su clima es templado frío, con grandes oscilaciones térmicas entre el día y la noche. El mapa climático nacional presentado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI (2020) lo describe como un clima de Tundra, que presenta veranos lluviosos e inviernos secos con heladas moderadas. Las variaciones de temperatura, sobre todo en invierno, determinan períodos de frío intenso que merman la salud y la capacidad productiva de la población, siendo los más afectados niños y adultos mayores (Abanto et al., 2017). Diversos informes indican que durante el invierno del año 2018 se presentaron 1432 episodios de neumonía en menores de 5 años y 1426 en mayores de 60 años, dejando 180 fallecidos (Ministerio de Salud del Perú [MINSA], 2018).

El Valle del Colca cuenta con una población de 20 000 habitantes cuyas actividades económicas son la agricultura, ganadería, turismo y producción artesanal. La población vive en situación de pobreza y pobreza extrema, con un alto nivel de necesidades básicas insatisfechas (Instituto Nacional de Estadística e Informática -INEI-, 2020). Los bajos recursos económicos de los pobladores se reflejan en el estado precario de sus viviendas, no aptas para resistir las bajas temperaturas nocturnas. Se utilizan materiales y métodos de autoconstrucción tradicional. Los muros están hechos de adobe y piedra; las cubiertas son tradicionalmente de madera y paja y los pisos de piedra rústica. De lograrse un adecuado confort térmico al interior de la vivienda podrían reducirse las probabilidades de contraer enfermedades respiratorias; y en caso de enfermedad se propiciaría un espacio saludable para la recuperación.

Los sistemas de construcción tradicionales constituyen una herramienta para edificar viviendas dignas, seguras, salubres, de fácil alcance y fortalecedoras de la identidad cultural (González, 2011). La construcción con tierra es sostenible (Holguino et al., 2018) y valiosa por la gran disponibilidad de materia prima en la naturaleza; cuenta con un bajo impacto ambiental en sus procesos de fabricación, construcción y demolición (Abanda et al., 2015), y su bajo costo y viabilidad técnica le posicionan como uno de los métodos constructivos más utilizados en áreas de pobreza (Sharma et al., 2015).

Respecto al comportamiento térmico, los muros de tierra cuentan con un alto nivel de aislamiento (Quagliarini et al., 2015) gracias a la inercia térmica que se consigue al incrementar su espesor, recomendándose un mínimo de 60 cm. (Heathcote, 2011). No obstante, en el caso del adobe, la conductividad térmica – capacidad para conducir calor - puede considerarse baja ($\lambda = 0.25$ a $0.33 \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) dos o tres veces menor que la de ladrillos convencionales de arcilla u hormigón (Abanto et al., 2017). Las propiedades higrotérmicas del adobe regulan la humedad relativa en interiores y determinan su capacidad termorreguladora (Holguino et al., 2018) adecuada para climas con saltos térmicos importantes.

Son escasas las investigaciones sobre las condiciones de confort térmico en viviendas rurales de tierra, sin climatización artificial y en climas de frío extremo. Los autores señalan que durante la noche las pérdidas de calor más significativas tienden a darse a través de los muros y techo; y durante la mañana, a través del piso (Molina, 2016). La apertura de claraboyas en el techo (Espinoza et al., 2009; Molina, 2016; Wieser et al., 2021), el adosamiento de invernaderos (Espinoza et al., 2009), el aislamiento de pisos (Espinoza et al., 2009; Holguino et al., 2018), aislamiento exterior en los muros (Evans et al., 2012; Zhang et al., 2016; Holguino et al., 2018), el aislamiento de techos (Espinoza et al., 2009; Evans et al., 2012; Wieser et al., 2021) y un control adecuado de infiltraciones por puertas y/o ventanas (Evans et al., 2012; Molina, 2016; Molina et al., 2020; Wieser et al., 2021) son medidas eficientes para mejorar las temperaturas interiores de la vivienda.

El confort térmico en viviendas tradicionales debe ser optimizado especialmente en invierno (Zhang et al., 2016) y debe considerarse que los habitantes suelen ser más tolerantes a climas hostiles (Xu et al., 2018). Es posible mejorar las condiciones de confort en viviendas rurales a partir de estrategias pasivas y el uso casi exclusivo de materiales locales y naturales (Wieser et al., 2021). Se puede considerar el uso complementario de estrategias activas tomando en cuenta las restricciones económicas y técnicas para su implementación (Jiménez et al., 2017; Zhang et al., 2016). Reynoso et al. (2021) presentan una alternativa de material aislante de buen rendimiento y bajo costo- a partir de la reutilización de residuos de poliestireno expandido (EPS). San Juan et al. (2010) proponen el uso de energía renovable a través de colectores solares de bajo costo, que reemplazarían la quema de biomasa al interior de la vivienda.

En el Perú, el uso del adobe predomina en zonas altoandinas. El Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) normaliza su uso como sistema constructivo sísmo resistente; sin embargo, no se hace mención sobre su comportamiento térmico (Norma Técnica E.080 del RNE, 2020). En este contexto se reconocen esfuerzos del sector público y privado en el desarrollo de propuestas para la mejora del confort térmico de las viviendas de adobe. Destacan tres proyectos basados en: estrategias de aislamiento de la envolvente, uso del muro trombe, cocinas y paneles solares, apertura de claraboyas e invernaderos adosados. El primero, elaborado por la Pontificia Universidad Católica del Perú – PUCP con un costo de \$1450.00 dólares por vivienda (Abanto y Montenegro, 2016); el segundo,

por la Universidad Nacional de Ingeniería – UNI, con una inversión de \$7150.00 dólares por vivienda (Harman, 2010) y el tercero, del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento - MVCS, cuyo costo por vivienda es de \$8300.00 dólares (MVCS, 2019). Si bien los resultados energéticos obtenidos por estos proyectos son adecuados, su alcance es reducido por su alto costo y el requerimiento de conocimiento técnico superior (Molina, 2016).

La investigación expone la búsqueda de mejoras en la envolvente térmica de la vivienda del Colca a través de simulaciones dinámicas y un análisis comparativo de costos en dólares, de manera que se rescaten aquellas que mejoren la demanda energética y sean económicamente accesibles, pudiendo ser implementadas por el poblador.

2. Métodos

La metodología conjugó técnicas descriptivas con otras de tipo experimental y analíticas que articularon el desarrollo de la investigación en tres fases: (i) Análisis climático y caracterización de la vivienda del Valle del Colca; (ii) Análisis de la envolvente y simulación de escenarios de mejora del comportamiento térmico; (iii) Evaluación comparativa de costos.

2.1. Análisis climático y caracterización de la vivienda del Valle del Colca

En la primera fase se caracteriza y analiza el clima del Valle del Colca haciendo uso de datos hidrometeorológicos provistos por el SENAMHI (2018). Se elabora el diagrama psicrométrico propuesto por el autor clásico Givoni (1998), el cual permite establecer estrategias de diseño específicas para el lugar de estudio (Amraoui et al., 2021; Andreoni y Ganem, 2021). Posteriormente, se identifican los aspectos tipológicos y morfológicos de la vivienda, así como los patrones socioculturales de los pobladores en base a una revisión documental y visitas de campo.

2.2. Análisis de la envolvente y simulación de escenarios de mejora del comportamiento térmico

La segunda fase es experimental. Se caracteriza la envolvente de la vivienda típica en términos constructivos y térmicos mediante una revisión documental y visita de campo (Alzoubi y Almalkawi, 2019; Ascanio et al., 2021; Kajjoba et al., 2021). Se utiliza el software de simulación OpenStudio, versión 3.2.0 para estudiar posibles mejoras en el desempeño térmico de la vivienda. Se evalúa el comportamiento térmico de la envolvente actual, de un caso alternativo y de cinco escenarios de mejora correspondientes a cada elemento que compone la envolvente (muros, techos, puertas, ventanas y suma de todos los escenarios). El proceso de validación para asegurar la calibración de los resultados de la simulación consistió en verificar la consistencia entre las temperaturas del archivo meteorológico (.epw) y las medidas provistas por el SENAMHI. Para calibrar correctamente el modelo, el margen de error entre estos valores no debe exceder el 5% (Amroui et al., 2020; Andreoni y Ganem, 2021).

2.3. Evaluación comparativa de costos

En la tercera fase se presenta una evaluación comparativa en dólares entre los costos asociados a los escenarios propuestos para el mejoramiento de la envolvente térmica y el ingreso familiar per cápita en la provincia de Caylloma, a la que pertenece el Valle del Colca. Los precios presentados para cada escenario se obtuvieron del mercado local e incluyen material y transporte, mas no la mano de obra; ya que las labores serían ejecutadas por los mismos pobladores. De esta manera se concluye indicando qué escenarios de mejora tienen mayor impacto en el comportamiento térmico de la vivienda y cuáles son más factibles a ser implementados por los pobladores, según su costo.

3. Resultados

3.1. Análisis Climático

Se analizaron los datos hidrometeorológicos registrados por las Estaciones Meteorológicas del SENAMHI en Sibayo y Cotacota (pueblos del Valle del Colca en latitud: 15° 29'39.39" y altitud: 3806 msnm.) durante el año 2018. Se registró en verano (diciembre a marzo) la temperatura máxima promedio entre los 17°C y 21°C, descendiendo por la noche entre los 0°C y 4°C. Este periodo se caracterizó por una temporada de lluvia de gran intensidad, incrementando la humedad relativa hasta el 86%. Durante el invierno (junio a setiembre) la temperatura en la noche descendió en promedio hasta -5°C y en el transcurso de la mañana alcanzó un máximo de 20°C, presentando nevadas en las madrugadas. La humedad promedio mínima descendió hasta un 13%. La velocidad promedio del viento tuvo leves variaciones en el año, oscilando entre los 4 y 5.6 m/s, con una dirección predominante noroeste de enero a julio y suroeste de agosto a diciembre.

Con los datos obtenidos del SEHAMHI (Tabla 1) se elaboró el climograma (Figura 1) que propone el autor clásico Givoni (1998) para establecer estrategias de diseño en respuesta al análisis del clima.

Se estableció que en el Valle del Colca existe gran demanda de calor a lo largo de todo el año, dados los contrastes de temperatura entre el día y la noche. Se recomienda hacer uso de calefacción convencional en los meses de abril a diciembre debido a las bajas temperaturas alcanzadas durante la madrugada. Esto implica que se requiere conservar el máximo de calor ganado durante la mañana para cuando la temperatura descienda durante la noche, y para ello se debe considerar la inercia térmica. En los meses de agosto y septiembre se hace necesaria la humidificación, y solo en noviembre y diciembre se alcanza la zona de confort permisible durante la mañana.

3.2. Caracterización de la vivienda del Valle del Colca

La estructura urbana de los pueblos del Colca proviene de asentamientos indígenas llamados "reducciones", que cuentan con un trazado de tipo damero, adaptado

	Temp. Máxima promedio °C	Temp. Mínima Promedio °C	Humedad máxima promedio %	Humedad mínima promedio %
Enero	17,5	3,8	82,7	61,7
Febrero	17,8	4,3	82,6	61,3
Marzo	17,3	3,9	84,1	56,1
Abril	18,4	0,3	86	53,5
Mayo	17,8	-4,7	82,3	29,9
Junio	15,8	-3,7	94,4	28,7
Julio	16	-4,1	88,3	30,9
Agosto	17,1	-4,9	78,4	21,5
Setiembre	19,8	-5	69,2	12,7
Octubre	19,6	0	86,3	24,5
Noviembre	21,5	0,2	75,5	24,2
Diciembre	20,5	0,8	86,2	29

Tabla 1: Temperatura de Bulbo Seco y Humedad Relativa en el Valle del Colca- 2018

Fuente: Elaboración propia en base a Datos Hidrometeorológicos registrados por las Estaciones Meteorológicas del SENAMHI en Sibayo y Cotacota (2019)

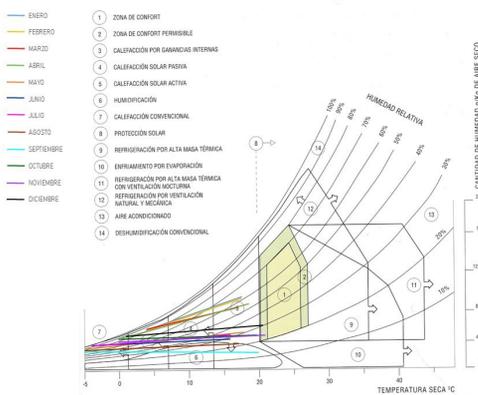


Figura 1: Climograma de Givoni para el Valle del Colca

Fuente: Elaboración de los autores (2019)

al relieve. Factores como el clima, soleamiento y vientos no fueron considerados para la traza (Zúñiga, 2012). Las viviendas se distribuyen de forma adosada, son todas unifamiliares y en su mayoría de un solo nivel.

La vivienda del Colca es considerada un ejemplo de arquitectura vernácula, producto de la interrelación entre la población y el territorio, bajo el conocimiento empírico de métodos constructivos tradicionales ejecutados en comunidad. Su organización espacial se basa en una serie de ambientes dispuestos en torno a un patio, el cual conforma el único elemento organizador y de acceso. Este tipo de orden encuentra sus raíces en la tipología ancestral de la “cancha inca”. Los ambientes alrededor del patio o cancha crecen progresivamente por adosamiento, independientes unos de otros. Por lo tanto, su única conexión es el patio. Se reconocen cuatro variaciones tipológicas de organización de la vivienda (Figura 2).

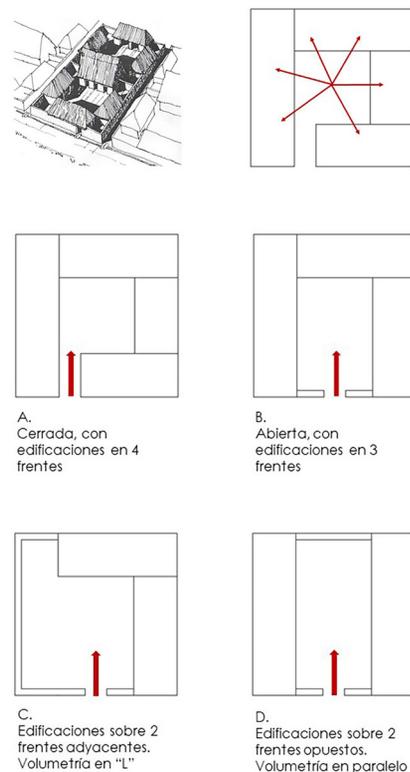


Figura 2: Caracterización tipológica de la vivienda del Valle del Colca: Organización espacial de la Cancha Inca

Fuente: Imágenes extraídas de González (2011)

El área de la vivienda oscila entre los 90m² -120m² construidos. Su proceso de consolidación se da en dos etapas. La primera, compuesta por el patio, corral, cocina y espacio multiuso. La segunda, por la cocina, el dormitorio, recibidor – multiuso, granero, corral y patio (Zúñiga, 2012). La cocina es el único lugar que se construye inicialmente y no admite la realización de otra actividad. Se consideran espacios multiuso para establecer un comercio, taller de artesanía o dormitorio extra para hospedaje de turistas. Culturalmente el patio adquiere relevancia al albergar actividades sociales; asimismo, cumple un papel en la actividad agrícola, por lo que requiere exposición al sol y resguardo de vientos. Esto define su tamaño relativamente pequeño en proporción a la altura de las habitaciones y sus coberturas (Zúñiga, 2012). Los pobladores suelen iniciar sus labores poco antes de las 5 de la mañana, momento que coincide con las horas más frías, y finalizan la jornada alrededor de las 5 de la tarde. Al no contarse con energía eléctrica es generalizado el uso de cocinas tradicionales, que funcionan a leña o estiércol, sin chimenea. Si bien esta práctica ayuda a calefactar el interior de la vivienda es considerada altamente nociva para la salud debido a los gases contaminantes que emana, los que superan 20 veces los valores máximos admitidos por la Organización Mundial de la Salud (Abanto y Montenegro, 2016).

3.3. Características de la Envolvente

Los materiales predominantes en el Colca son la albañilería de adobe y piedra en los muros, techos de rollizos de madera y paja tejida o esteras, pisos de piedra de río y piedra rústica (Chávez et al., 2016). Igualmente, se observan intervenciones con materiales contemporáneos que restan valor al paisaje del lugar: esto en referencia al uso actual de calamina (zinc) en reemplazo de la paja y esteras en los techos (Tabla 2).

La vivienda del Colca es tipológicamente defensiva e introvertida. En su concepción se busca conseguir cobijo de un clima exterior hostil; por lo tanto, sus proporciones y alto grado de cerramiento responden a dicho propósito. El grosor de los muros de adobe y sobre cimientado de piedra (45 a 50 cm. de espesor) refleja la búsqueda empírica de una protección térmica no siempre exitosa. Por otro lado, el cambio del material tradicional por el zinc en el techo genera grandes pérdidas de calor, contraponiéndose con el deseado confort térmico. Los vanos de la envolvente (puertas y ventanas) tienden a ser de pequeño tamaño. Para dinteles y carpintería, en la mayoría de los casos, se hace uso de madera. Las ventanas generalmente son de vidrio simple de 4 a 6 mm., y las puertas de madera maciza. (Figura 3).

Componente de la envolvente	Material predominante	%de viviendas en las que predomina el material	Conductividad térmica W/(m·K)
Muros	Piedra	98%	1,70
	Adobe	85%	0,46
	Sillar	7%	
	Revoque de barro	41%	0,30
	Ladrillo	0%	
	Hormigón	0%	
Techos	Listones de madera	1%	
	Rollizos	100%	0,18
	Calamina (zinc)	100%	110,00
	Paja tejida / esteras	95%	0,072
	Teja	6%	
Pisos	Ladrillo pastelero	5%	
	Piedra rústica	92%	1,70
	Piedra de río	70%	
	Hormigón	2%	
	Sillar (piedra volcánica)	0%	
	Ladrillo	0%	

Tabla 2: Materiales predominantes y caracterización térmica

Fuente: Elaboración propia en base a Chávez et al. (2016), Cuitiño et al. (2020), Costes et al. (2017) y Código Técnico de la Edificación de España – CTE (2010)

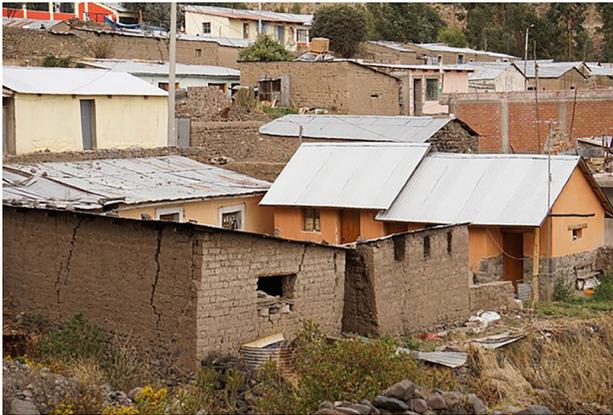


Figura 3: Materiales predominantes en la vivienda del Valle del Colca
Fuente: María Pilar Rondón Rodríguez (2019)

3.4. Análisis de la envolvente y simulación de escenarios de mejora del comportamiento térmico

El análisis del comportamiento térmico de la vivienda y los escenarios de mejora se realizaron a través de simulaciones en el software OpenStudio. Se inició con un modelo de vivienda típica (Escenario 0 – E0) de 95 m² construidos, de una planta; compuesta por un espacio multiuso (comercio), cocina, dormitorio, baño y patio. Se consideró la orientación menos favorable (sur) para la simulación y la existencia de edificaciones colindantes al norte, este y oeste (Figura 4).

Se tomó como referencia la Norma Técnica EM. 110 del Reglamento Nacional de Edificaciones (2020), sin carácter obligatorio, donde se indican los valores límites máximos de transmitancia térmica (U) de los elementos constructivos para la zona climática altoandina. Según la norma, la U máxima del muro debe ser de 1.0 w/m²K, la U máxima del techo, 0.83 w/m²K y la U máxima del piso, 3.26 w/m²K.

Los coeficientes de conductividad térmica (Tabla 2) utilizados para el cálculo de la transmitancia (U) fueron recogidos del Código Técnico de la Edificación de España – CTE (2010), a excepción del correspondiente al adobe: 0.46 W/mK, el revoco de barro alivianado con paja: 0.30

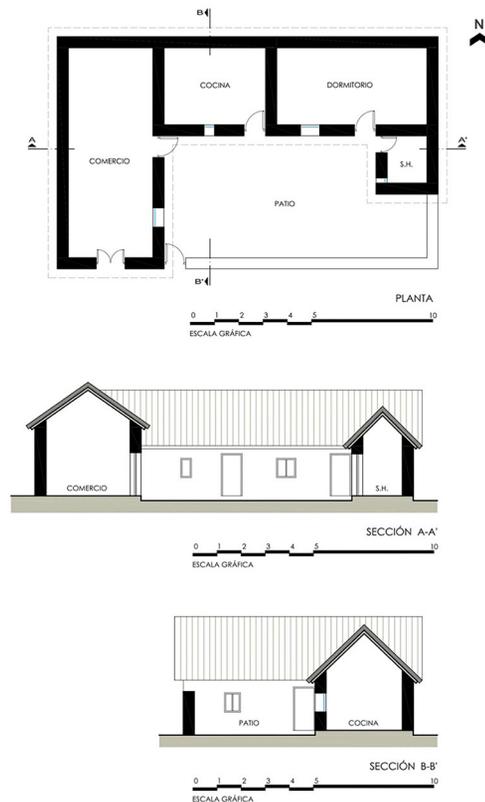


Figura 4: Planta y secciones de modelo de vivienda típica del Valle del Colca
Fuente: Elaboración propia (2019)

W/mK (Cuitiño et al., 2020), y el tejido de paja para el techo: 0.072 W/mK (Costes et al., 2017).

Primero se evaluó el caso alternativo, que consiste en el reemplazo del techo de paja (10 cm. de espesor) por planchas de calamina (0.4 cm. de espesor). Actualmente esta práctica es muy común debido al mantenimiento que requiere el material tradicional (repajado cada 2 años) y a su asociación con una imagen de pobreza y retraso. Se evidenció que el incremento de la demanda de calefacción originada por la calamina (zinc) es 1.4 veces mayor que la cobertura de paja, incrementándose la demanda energética a 103.85 Kwh/m²año. Se resalta que el valor U del techo de calamina se encuentra fuera de lo permitido por la Norma Técnica nacional, a diferencia del material tradicional (Tabla 3).

Se procedió a desarrollar un estudio comparativo de escenarios de mejoramiento para la envolvente. El primer escenario (E1 en Figura 5) consistió en adicionar un aislamiento de tejido de paja y carrizo al exterior del muro, de 5 cm. de espesor como máximo para asegurar su sostén al adobe. A esto se le añadió un revoco aligerado de barro y paja de 2 cm. En el segundo escenario (E2 en Figura 5) se mejoraron las ventanas, reemplazando el vidrio simple por uno doble de 4mm. con una cámara de aire de 12 mm. No se propusieron cambios para las puertas por ser de madera maciza. En el tercer escenario (E3 en Figura 5) se mantuvo la cobertura tradicional de paja sobre rollizos y se acompañó con un aislamiento interior de poliestireno expandido de 10 cm. acabado con enlucido de yeso, práctica común entre los pobladores. En el cuarto escenario (E4 en Figura 5), se mejoró el piso. Sobre la piedra existente se asentó una capa de tierra apisonada con cal (para reducir la humedad del suelo) y se instaló un falso piso de madera, conformándose cámaras rellenas de lana animal. Este último constituye un buen aislante térmico biodegradable, además de regulador de humedad. En el último escenario (E5) se calculó la suma de todas las mejoras mencionadas anteriormente.

La demanda energética de la vivienda típica (E0) fue de 71.92 Kwh/m²año. El E5 (suma de todas las intervenciones) logró disminuir la demanda energética de la vivienda a 50.80 Kwh/m²año, lo que representó una mejora importante, cercana al 30% (Tabla 4).

respecto al caso base (Tabla 4). El E1 (mejora de muros) permitió optimizar la demanda térmica en un 14.46% con 61.52 Kwh/m²año. La intervención menos relevante correspondió al E2 (mejora de ventanas), que consiguió disminuir la demanda energética a 71.26 Kwh/m²año, representando una mejora del 0.92% (Tabla 4).

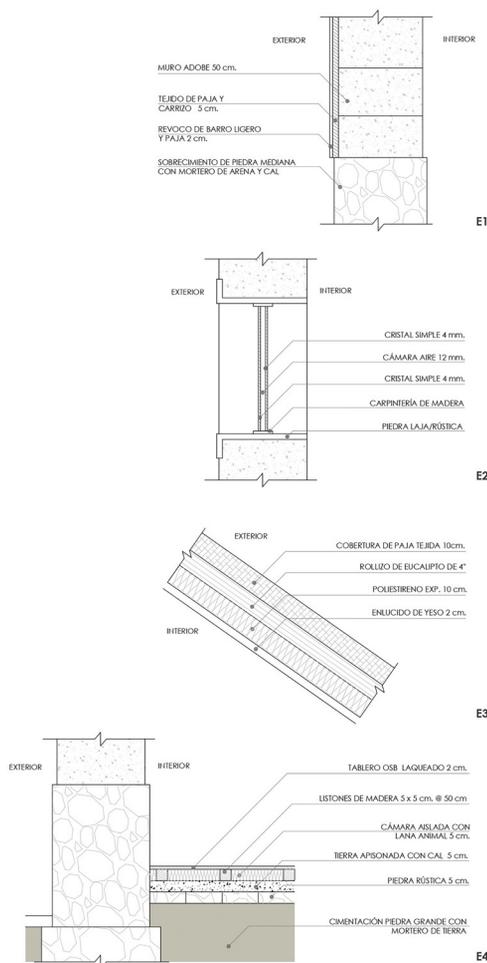


Figura 5: Escenarios de Mejoramiento para la envolvente: Muros, ventanas, cobertura y piso (de arriba a abajo) **Fuente:** Elaboración propia (2021)

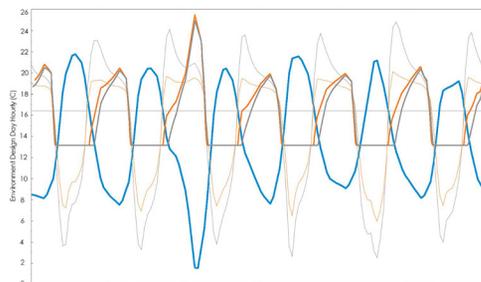
Caso alternativo	Valor U (w/m ² K) Techo	Norma técnica: valor máximo de U (w/m ² K) Techo	Demanda calefacción kWh	Demanda energética Kwh/m ² año
Caso: Techo tradicional (rollizos de madera + paja)	0,50	0,83	6795,93	71,92
Caso: Cambio de Techo (rollizos de madera + calamina)	1,80	0,83	9751,89	103,85

Tabla 3: Caso Alternativo, reemplazo de cobertura por material no tradicional **Fuente:** Elaboración propia (2021)

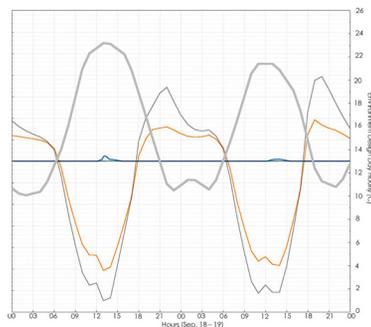
Escenarios de mejora	Valor U Muros w/m ² K	Valor U Ventanas w/m ² K	Valor U Techo w/m ² K	Valor U Piso w/m ² K	Demanda Calefacción kWh	Demanda Refrigeración kWh	Demanda Energética Kwh/m ² año	% Mejora respecto Escenario 0
Norma Técnica: Valor máximo de U (w/m²K)	1,00	---	0,83	3,26	---	---	---	---
E0: Vivienda Típica	0,92	5,86	0,50	0,97	6795,93	---	71,92	---
E1: Mejora Muros	0,54	5,86	0,50	0,97	5813,02	---	61,52	14,46%
E2: Mejora Ventanas	0,92	2,70	0,50	0,97	6733,53	---	71,26	0,92%
E3: Mejora Techos	0,92	5,86	0,12	0,97	5233,21	---	55,38	22,99%
E4: Mejora Piso	0,92	5,86	0,50	0,81	7644,15	1,26	80,91	-12,50%
E5: 1+2+3+4	0,54	2,70	0,12	0,81	4800,04	---	50,8	29,37%

Tabla 4: Cálculos de Demanda Energética para cada Escenario

Fuente: Elaboración propia (2021)



— TRANSFERENCIA CON EL TERRENO - ESTADO ORIGINAL
 — TRANSFERENCIA CON EL TERRENO - ESTADO REFORMADO
 — DEMANDA DE CALEFACCIÓN ESTADO ORIGINAL
 — DEMANDA DE CALEFACCIÓN ESTADO REFORMADO
 — TEMPERATURA EXTERIOR (BULBO SECO)



— TRANSFERENCIA CON EL TERRENO - ESTADO ORIGINAL
 — TRANSFERENCIA CON EL TERRENO - ESTADO REFORMADO
 — DEMANDA DE REFRIGERACIÓN ESTADO ORIGINAL
 — DEMANDA DE REFRIGERACIÓN ESTADO REFORMADO
 — TEMPERATURA EXTERIOR (BULBO SECO)

El E4 (mejora de piso) mostró un comportamiento anómalo. Si bien se mejoró el valor U, se observó un incremento de la demanda respecto al E0, tanto en calefacción como en refrigeración, alcanzándose una carga energética de 80.91 Kwh/m²año (Tabla 4). A través de la simulación se profundizó el estudio del intercambio de calor entre la vivienda y el terreno, notándose cómo varía notablemente del estado original del piso al estado reformado correspondiente al E4 (Figura 6).

En el gráfico de Demanda de Calefacción (Figura 6) se observa que, durante el día -cuando las temperaturas exteriores son más altas- la vivienda cede energía al terreno a través del solado; y cuando las temperaturas exteriores son más bajas, el terreno cede energía a la vivienda, resultando así una fuente de energía que contribuye al confort térmico del interior. Por lo tanto, si se aísla el piso esa cesión se ve considerablemente disminuida, desaprovechándose la fuente natural de energía que supone la temperatura constante del terreno (entre 16°C y 18°C). En el caso de la demanda de refrigeración, esta tiene un incremento despreciable en los meses de enero, agosto, setiembre y diciembre; sin embargo, resulta interesante observar que esta demanda también está relacionada con la energía que se disipa a través del piso. En el gráfico de Demanda de Refrigeración (Figura 6) se observa que cuando el aire del interior de la vivienda se calienta y toma una temperatura superior a la del terreno, este actúa como termorregulador y absorbe el calor excedente, refrigerando de forma natural los espacios interiores.

Figura 6: Comparativa entre Demandas de Calefacción (mes de agosto) y Refrigeración (mes de setiembre) para el escenario de mejoramiento E4: Aislamiento de suelo de la envolvente

Fuente: Elaboración propia (2021)

3.5. Evaluación comparativa de Costos

El ingreso familiar per cápita en la provincia de Caylloma, a la que pertenece el Valle del Colca, es: \$168.00 (Banco Central de Reserva del Perú -BCRP-, 2016). Los escenarios que mayor aporte térmico ofrecían a la vivienda, E3 (mejora de techos) y E5 (suma de todas las mejoras) presentaron un costo de \$500.00 y \$1535.00 dólares respectivamente (Tabla 5). El primer precio triplica el ingreso familiar mensual y el segundo es 9 veces mayor, lo que refleja la dificultad económica para sus ejecuciones. Sin embargo, esta condición puede ser superada si las mejoras se aplican de manera progresiva, dando prioridad a los espacios de estancia nocturna, dado que el requerimiento de calor es prioritario por la noche y madrugada. Se revisaron los costos de las mejoras aplicadas solo para el dormitorio (Tabla 5) y se obtuvo que implementar el E3 costaría \$115.00 y el E5, \$373.00 dólares. Ambos precios serían financiables por las familias en un plazo de 2 y 4 meses respectivamente. Cabe mencionar que los costos presentados para cada escenario se obtuvieron del mercado local e incluyen material y transporte, más no la mano de obra; ya que las acciones serían ejecutadas por los mismos pobladores.

4. Discusión

La evaluación de cinco escenarios de mejoramiento de la envolvente en relación con un caso base permitió ratificar estrategias eficientes estudiadas por otros autores. La incorporación de aislamiento externo en muros (E1), si bien proporciona una mejora, esta no es la más significativa ya que el adobe brinda desde un primer momento aislamiento a la vivienda gracias a su inercia térmica y al espesor de los muros. La estrategia de mejoramiento para las ventanas (E2) produjo el menor impacto debido a la mínima superficie que representan en la envolvente. Podrían ensayarse otras técnicas para mayor control de infiltraciones por los vanos, pero a mayores costos y grado de ejecución técnica.

La intervención aislada que mayor incidencia tuvo consistió en incorporar aislamiento interno al techo (E3).

De esta manera se logró disminuir la demanda energética de 71.92 Kwh/m²año a 55.38 Kwh/m²año, lo que representa una mejora del 23% respecto al caso base. Esto comprueba lo señalado por Molina (2016), el techo es uno de los componentes de la envolvente a través del cual se generan las pérdidas de calor más significativas.

Si bien hay autores que refieren el aislamiento de pisos como una acción eficaz, en este estudio se observa que la mejora de la transmitancia térmica de la envolvente en contacto con el terreno (E4) no contribuye a la mejora de la eficiencia energética de la vivienda. El terreno, que se mantiene a una temperatura constante, funciona como un refrigerante natural cuando las temperaturas son altas, y aporta energía calorífica cuando las temperaturas son bajas. Plantear un aislamiento en el piso evita las transferencias de calor mencionadas entre los espacios interiores y el terreno, por lo que, a pesar de mejorarse empíricamente la regulación de humedad interior, esta es una estrategia que no se recomendaría aplicar. Las intervenciones para aislar el piso son también presentadas en los proyectos de las universidades PUCP y UNI y del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento; mostrándose como adecuadas al someterse a la evaluación térmica de la envolvente completa; sin embargo, al realizarse el análisis aislado de la intervención se revela que no es favorable.

Si comparamos las mejoras conseguidas en el comportamiento térmico de la envolvente de la presente investigación con los proyectos planteados por las universidades PUCP y UNI, se observan mayores logros en las últimas, incrementando en 10°C y 5°C respectivamente la temperatura interior de las viviendas (Abanto y Montenegro, 2016; Harman, 2010). Esto se debe a la incorporación de otras medidas para incrementar ganancias de calor internas (adosamiento de invernadero, apertura de claraboyas) y al uso de sistemas activos. A pesar de que los resultados obtenidos por otros proyectos son mejores, su alcance en ejecución ha sido reducido debido a que las estrategias planteadas son costosas y requieren de mano de obra calificada.

Escenarios de mejora	Costo de mejoras en la vivienda completa \$ dólares americanos	% respecto al ingreso familiar per cápita mensual \$168.00	Costo de mejoras solo en el dormitorio \$ dólares americanos	% respecto al ingreso familiar per cápita mensual \$168.00
E1: Mejora Muros	25,00	14,80%	8,00	4,76%
E2: Mejora Ventanas	140,00	83,30%	50,00	29,76%
E3: Mejora Techos	500,00	297,61%	115,00	68,45%
E4: Mejora Piso	870,00	517,85%	200,00	119,04%
E5: 1+2+3+4	1535,00	913,70%	373,00	222,02%

Tabla 5: Costos de mejoramiento térmico para la vivienda

Fuente: Elaboración propia (2021)

5. Conclusiones

Las viviendas del Valle del Colca se caracterizan por una morfología tradicional proveniente de la tipología ancestral de la “cancha inca”, que consiste en una serie de ambientes dispuestos en torno a un patio. Son construcciones vernáculas de tipo rural, adosadas, de un piso en su mayoría, con un área construida entre los 90 y 120 m². Se edifican por autoconstrucción, bajo métodos tradicionales ejecutados en comunidad. La materialidad predominante es la albañilería de adobe y sobrecimientos de piedra, techos de madera y paja tejida, pisos de piedra rústica, carpintería de madera y ventanas de cristal simple.

La zona presenta un clima templado frío, con grandes oscilaciones térmicas entre el día y la noche. En las noches de invierno se determinan periodos de frío intenso por lo que los requerimientos energéticos son sustancialmente de calefacción.

Se comprueba que el creciente reemplazo del techo de paja por calamina (zinc), además de menoscabar el valor patrimonial- deteriora el comportamiento térmico de la envolvente, ocasionando grandes pérdidas de calor. Se incrementó la demanda energética a 103.85 Kwh/m²año respecto a la vivienda con cobertura tradicional, cuya demanda es 71.92 Kwh/m²año.

Si bien los valores U de la vivienda típica cumplen con lo señalado en la Norma Técnica; se evidencia que esta condición es insuficiente para certificar condiciones de confort. Los escenarios de aislamiento de muros, techo y ventanas generan disminuciones en los valores U respecto a la vivienda típica y por lo tanto mejoran el comportamiento térmico de la envolvente. El caso del aislamiento del piso, a pesar de optimizar empíricamente la regulación de humedad interior, no contribuye a la mejora termo energética de la vivienda.

Con la implementación de todos los escenarios se alcanzaron 50.80 Kwh/m²año, lo que representa una mejora significativa de cerca del 30% en ahorro energético. La intervención aislada de mayor incidencia fue el aislamiento del techo, que permitió disminuir la demanda energética de 71.92 Kwh/m²año a 55.38 Kwh/m²año, lo que representa una mejora del 23% respecto al caso base. Se reafirma que el techo es uno de los componentes de la envolvente a través del cual se generan mayores pérdidas de calor.

A pesar de que los escenarios propuestos implican un nivel técnico básico y accesible para el poblador rural, el costo de las intervenciones más significativas para el desempeño térmico es alto en contraste al ingreso familiar per cápita mensual en el Colca. Por lo tanto, se recomienda su aplicación prioritaria y de manera progresiva en los espacios de estancia nocturna (dormitorio), dado que el requerimiento de calor es prioritario por la noche y madrugada; de esta manera se hace factible su ejecución en un corto plazo (2 a 4 meses).

Si bien la investigación se direcciona al mejoramiento del comportamiento térmico de la envolvente, no puede obviarse el actual uso de cocinas tradicionales para la

calefacción activa de la vivienda. Se recomienda sustituir estos equipos por colectores solares de bajo costo (San Juan et al., 2010) o por “cocinas mejoradas” que disminuyen los niveles de partículas contaminantes hasta más del 90% (Abanto y Montenegro, 2016).

El logro de esta investigación radica en obtener mejoras energéticas al menor costo posible y de fácil ejecución para poder alcanzar un mayor impacto en las comunidades rurales de las zonas altoandinas.

5. Recomendaciones

Se debe tomar en cuenta las limitaciones de precisión del software utilizado; si bien permite obtener una orientación general se recomienda complementar la evaluación con otros programas (DesignBuilder, plugins LadyBug y HoneyBee de Rhinoceros o Green Building Studio).

6. Agradecimientos

La investigación se enmarca en el desarrollo del máster universitario: Proyecto Avanzado de Arquitectura y Ciudad de la universidad de Alcalá, España. Se agradece a los arquitectos Antonio Baño Nieva y Jorge Mendoza Antezana por las contribuciones en su desarrollo.

Cómo citar este artículo/How to cite this article:
Iruri-Ramos, C., Domínguez-Gómez, P. y Celis-D’amico, F. (2023). Mejoramiento de la envolvente para el comportamiento térmico de viviendas rurales. Valle del Colca, Perú. *Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 12(23), 113-124. <https://doi.org/10.18537/est.v012.n023.a09>

7. Referencias bibliográficas

- Abanda, H., Tah, J. y Nkeng, G. (2015). 22- Earth-block versus sandcrete-block houses: Embodied energy and CO₂ assessment. En F. Pacheco-Torgal, En P.B. Lourenço, J.A. Labrincha, S. Kumar, y P. Chindaprasirt (Eds.), *Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks. Design, Properties and Durability* (pp. 481-514). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-305-8.00022-X>
- Abanto, G., Karkri, M., Lefebvre, G., Horn, M., Solis, J. y Gómez, M. (2017). Thermal properties of adobe employed in Peruvian rural areas: Experimental results and numerical simulation of a traditional bio-composite material. *Case Studies in Construction Materials*, 6, 177-191. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.02.001>
- Abanto, J. y Montenegro, E. (2016). *Los efectos del Proyecto "K'oñichuyawasi Casas Calientes y Limpias" en la salud y calidad de vida de las familias del distrito de Langui en Cusco: Un estudio de caso*. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú- PUCP]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7716>
- Alzoubi, H. y Malkawi, A. (2019). A Comparative Study for the Traditional and Modern Houses in Terms of Thermal Comfort and Energy Consumption in Umm Qais City, Jordan. *Journal of Ecological Engineering*, 20(5) 14-22. <https://doi.org/10.12911/22998993/105324>
- Amraoui, K., Sriti, L., Di Turi, S., Ruggiero, F. y Kaihou, A. (2021). Exploring building's envelope thermal behavior of the neo-vernacular residential architecture in a hot and dry climate region of Algeria. *Building Simulation*, 14, 1567-1584. <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0764-0>
- Andreoni-Trentacoste, S. y Ganem-Karlen, C. (2021). El rol activo del usuario en la búsqueda de confort térmico de viviendas en clima templado árido. *Revista Hábitat Sustentable*, 11(2), 8-21. <https://doi.org/10.22320/07190700.2021.11.02.01>
- Ascanio, J., Terés, J., Muñoz, Y., Lengerke, O. y Del Portillo, L. (2021). Assessing the thermal performance of a conventional architecture in a dry warm climate. *Heritage and Sustainable Development*, 3(2), 173-182. <https://doi.org/10.37868/hsd.v3i2.66>
- Banco Central de Reserva del Perú- BCRP. (2016). *Informe económico y social de la región Arequipa*. Editorial del Banco Central de Reserva del Perú, <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Proyeccion-Institucional/Encuentros-Regionales/2016/arequipa/ies-arequipa-2016.pdf>
- Chávez, J., Dulanto, J. y De la Serna, J. (2016). *Programa de vivienda rural y desarrollo social en el valle del Colca*. Edición: Programa de cooperación hispano peruano.
- Código Técnico de la Edificación – CTE. (2010). *Catálogo de Elementos Constructivos*. Ministerio de Vivienda del Gobierno de España. https://www.codigotecnico.org/pdf/Programas/CEC/CAT-EC_v06.3_marzo_10.pdf
- Costes, J., Evrard, A., Biot, B., Keutgen, G., Daras, A., Dubois, S., Lebeau, F. y Courard, L. (2017). Thermal conductivity of straw bales: Full size measurements considering the direction of the heat flow. *Buildings*, 7 (1), 11-25. <https://doi.org/10.3390/buildings7010011>
- Cuitiño, M., Rotondaro, R. y Esteves, A. (2020). Análisis comparativo de aspectos térmicos y resistencias mecánicas de los materiales y los elementos de la construcción con tierra. *Revista de Arquitectura*, 22 (1), 138-151. <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2020.2348>
- Espinoza, R., Saavedra, G., Huaylla, F., Gutarra, A., Molina, J., Barrionuevo, R. y Lau, L. (2009). Evaluación experimental de cambios constructivos para lograr confort térmico en una vivienda altoandina del Perú. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 203-210 http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/97335/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Evans, J., De Schiller, S. y Garzón, L. (2012). Desempeño térmico de viviendas construidas con quincha. *Construcción con Tierra. Publicación periódica de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo Universidad de Buenos Aires*, 5, 93 – 102. <https://core.ac.uk/download/pdf/151807279.pdf#page=125>
- Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. Van Nostrand Reinhold publishers.
- González, Z. (2011). La vivienda andina peruana en el Valle del Colca: Propuesta productiva de sistemas de aprovechamiento de recursos y regulación pasiva a través de la autoconstrucción con materiales locales. El tapial armado mejorado. En *Construcción con tierra. Tecnología y arquitectura. Congresos de arquitectura de tierra en Cuenca de Campos 2010/2011* (pp. 367-376). Universidad de Valladolid. http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2011/2011_9788469481073_p367-376_gonzalez.pdf
- Harman, L. (2010). *Confort térmico en viviendas altoandinas, un enfoque integral*. Care Perú, Balcari editores. <https://www.paho.org/cub/dmdocuments/RED%20VIV%20Final%20-%20ManualViviendas%20Altoandinas%20Enf%20Integral.pdf>
- Heathcote, K. (2011). The thermal performance of earth buildings. *Revista Informes de la Construcción*, 63(523), 117-126. <https://doi.org/10.3989/ic.10.024>
- Holguino, A., Olivera, L. y Escobar, K. (2018). Confort térmico en una habitación de adobe con sistema de almacenamiento de calor en los andes del Perú. *Revista de investigaciones altoandinas. Journal of High Andean Research*, 20(3), 289-300. <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2018.393>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú – INEI. (2020). *Mapa de pobreza monetaria provincial y distrital del Perú, 2018*. Editorial INEI. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1718/Libro.pdf

- Jiménez, G., Wieser, M. y Biondi, S. (2017). Improving Thermal Performance of Traditional Cabins in the High-Altitude Peruvian Andean Region. En L. Brotas, S. Roaf, F. Nicol. (Eds.), *PLEA 2017: 33rd International Conference on Passive and Low Energy Architecture*, (pp. 4101 - 4108). Network for Comfort and Energy Use in Buildings. https://plea2017.net/wp-content/themes/plea2017/docs/R_PLEA2017_proceedings_volume_III.pdf
- Kajjoba, D., Kasedde, H., Olupot, P.W. y Lwanyaga J.D. (2021). Evaluation of Thermal Comfort and Air Quality of Low-Income Housing in Kampala City, Uganda. *Energy and Built Environment*, 3(4), 508-524. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.05.007>
- Ministerio de Salud del Perú - MINSa. (2018). Situación epidemiológica de las enfermedades respiratorias agudas (IRAS) en el Perú. *Boletín Epidemiológico del Perú*, 27 – SE 04, 53 – 68. <http://www.dge.gob.pe/portal/docs/vigilancia/boletines/2018/04.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú – MVCS. (diciembre del 2019). *Programa Nacional de Vivienda Rural, ¿qué hacemos?* Gobierno de Perú. <https://www.gob.pe/6977-programa-nacional-de-vivienda-rural-que-hacemos>
- Molina, J. (2016). *Evaluación bioclimática de una vivienda rural alto andina de la comunidad de San Francisco de Raymina de Ayacucho*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería - UNI]. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/5327>
- Molina, J., Horn, M., Gómez, M. (2020). Evaluación sistemática del desempeño térmico de un módulo experimental de vivienda altoandina para lograr el confort térmico con energía solar. *Tecnia*, 3(1), 71-79. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v30i1.841>
- Norma Técnica E.080 del Reglamento Nacional de Edificaciones. (2020). *Diseño y Construcción con tierra reforzada*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú - MVCS. <https://www.gob.pe/en/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
- Norma Técnica EM.110 del Reglamento Nacional de Edificaciones. (2020). *Confort térmico y lumínico con eficiencia energética*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú - MVCS. <https://www.gob.pe/en/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
- Pulgar, J. (2014). *Las 8 regiones naturales del Perú*. 12va edición. Pontificia Universidad Católica del Perú - PUCP Fondo Editorial.
- Quagliarini, E., Orazio, M y Lenci, S. (2015). 16 - The properties and durability of adobe earth-based masonry blocks. En F. Pacheco-Torgal, En P.B. Lourenço, J.A. Labrincha, S. Kumar, P. Chindapasirt (Eds.), *Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks. Design, Properties and Durability* (pp. 361-378). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-305-8.00016-4>
- Reynoso, L., Carrizo, A., Viegas, G., San Juan, G. (2021). Characterization of an alternative thermal insulation material using recycled expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, 301. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124058>
- San Juan, G., Viegas, G., Discoli, C., Pérez, F., Lamónica, M., Ruótolo, C., Güimil, A. (2010). Construcción y ensayo de colectores solares calentadores de aire utilizando materiales no habituales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, 14, 7-14. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/67329>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI (2018) *Datos hidrometeorológicos a nivel nacional*. Perú. Ministerio de Medio Ambiente. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI (2020) *Mapa Climático del Perú*. Perú. Ministerio de Medio Ambiente. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>
- Sharma, V., Vinayak, H. y Marwaha, B. (2015). Enhancing sustainability of rural adobe houses of hills by addition of vernacular fiber reinforcement. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(2), 348-358. <https://doi.org/10.1016/j.ijse.2015.07.002>
- Wieser, M., Rodríguez-Larraín, S. y Onnis, S. (2021). Estrategias bioclimáticas para clima frío tropical de altura. Validación de prototipo en Orduña, Puno, Perú. *Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 10(19), 9-19. <https://doi.org/10.18537/est.v010.n019.a01>
- Xu, C., Li, S., Zhang, X. y Shao, S. (2018) Thermal comfort and thermal adaptive behaviours in traditional dwellings: A case study in Nanjing, China. *Building and Environment*, 142, 153-170. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.006>
- Zhang, J., Xu, W., Li, A., Zheng, K. y Zhang, J. (2016). Study on improving thermal environment and energy conservation of quadrangle adobe dwelling. *Energy and Buildings*, 129, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.048>
- Zúñiga, A. (2012). *Historia de la arquitectura en Arequipa, cuatro investigaciones: Transformación de la arquitectura colonial a la republicana; la catedral de Arequipa; el color en la arquitectura de Arequipa; arquitectura vernácula en el valle del Colca*. Editorial de la Universidad Católica de Santa María- UCSM.