

# Thermal comfort of an adobe house in the high Andean area: case study's the houses in the Pampa Quehuar - Peru

Keila Nora Quispe Corahua, estudiante<sup>1</sup>, y Gilmer Challco Mamani, magister<sup>(1,2,3)</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica del Perú, Perú, [u18210561@utp.edu.pe](mailto:u18210561@utp.edu.pe), [c23404@utp.edu.pe](mailto:c23404@utp.edu.pe)

<sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, [challco.gilmer@pucp.edu.pe](mailto:challco.gilmer@pucp.edu.pe)

<sup>3</sup>Universidad Nacional del Altiplano, Perú, [gilmermace\\_5@hotmail.com](mailto:gilmermace_5@hotmail.com)

***Abstract** – The research aims to analyze the thermal comfort of an adobe house located in the high Andean area of Peru, specifically in the Pampa Quehuar - Cusco; likewise, previous studies are described in relation to the thermal properties of adobe in various areas of Peru and are contrasted with research carried out in Latin America and Europe. A design proposal is then presented to improve livability and reduce construction waste in adobe homes, prioritizing adobe material that is accessible and affordable. Finally, the relevance of using traditional, renewable, and economical materials to ensure thermal comfort is highlighted, that is a solution to increase the thickness of adobe walls is proposed to ensure the quality of life of the population in the Cusco region.*

***Keywords**– Adobe, bajo costo, confort térmico, renovable y zona altoandina.*

# Confort térmico de una vivienda de adobe en zona altoandina: caso de las viviendas del centro poblado Pampa Quehuar - Cusco – Perú

## Thermal comfort of an adobe house in the high Andean area: case study's the houses in the Pampa Quehuar - Peru

Keila Nora Quispe Corahua, estudiante<sup>1</sup>, y Gilmer Chalco Mamani, magister<sup>(1,2,3)</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica del Perú, Perú, [u18210561@utp.edu.pe](mailto:u18210561@utp.edu.pe), [c23404@utp.edu.pe](mailto:c23404@utp.edu.pe)

<sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, [challco.gilmer@pucep.edu.pe](mailto:challco.gilmer@pucep.edu.pe)

<sup>3</sup>Universidad Nacional del Altiplano, Perú, [gilmermace\\_5@hotmail.com](mailto:gilmermace_5@hotmail.com)

**Resumen** – El estudio de investigación tiene como objetivo analizar el confort térmico de una vivienda de adobe ubicada en la zona altoandina del Perú, específicamente en el centro poblado Pampa Quehuar - Cusco; asimismo, previamente se describe los estudios en relación con las propiedades térmicas del adobe en diversas áreas de Perú y se contrastan con investigaciones realizadas en Latinoamérica y Europa. Luego se presenta una propuesta de diseño para mejorar la habitabilidad y reducir los desechos de construcción en las viviendas de adobe, priorizando el material adobe que es accesible y económico. Finalmente, se resalta la relevancia de emplear materiales tradicionales, renovables y económicos para asegurar el confort térmico, por ello se plantea una solución de incremento del espesor de los muros de adobe para asegurar la calidad de vida de la población en la región Cusco.

**Abstract** – The research aims to analyze the thermal comfort of an adobe house located in the high Andean area of Peru, specifically in the Pampa Quehuar - Cusco; likewise, previous studies are described in relation to the thermal properties of adobe in various areas of Peru and are contrasted with research carried out in Latin America and Europe. A design proposal is then presented to improve livability and reduce construction waste in adobe homes, prioritizing adobe material that is accessible and affordable. Finally, the relevance of using traditional, renewable, and economical materials to ensure thermal comfort is highlighted, that is a solution to increase the thickness of adobe walls is proposed to ensure the quality of life of the population in the Cusco region.

**Palabra clave**– Adobe, bajo costo, confort térmico, renovable y zona altoandina.

### I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, las zonas altoandinas son afectadas por heladas y friajes desde abril hasta octubre [1]. En consecuencia, durante el periodo del 2003 al 2016 en el departamento de Cusco la

cantidad de damnificados se incrementó a más de 20 mil habitantes [2]. En respuesta a los referidos acontecimientos, el Estado peruano promovió distintos proyectos para enfrentar este fenómeno climático. Uno de los proyectos fue denominado “Sumac Wasi”, que consistió en reforzar el adobe con caña brava proveniente de la Amazonía [3]. Por otro lado, otro proyecto propuesto por el Estado se denominó “Mi abrigo”, el cual consistió en la implementación del muro trombe (pared caliente), cuyo proceso constructivo necesita materiales como marcos de madera, policarbonato transparente, piedras negras, entre otras [4]. No obstante, los materiales que se utilizaron en dichos proyectos no son accesibles para la población de Cusco y generan un costo elevado para su implementación.

En ese sentido, el presente trabajo de investigación consiste en la evaluación del confort térmico de una vivienda de adobe del centro poblado Pampa Quehuar, distrito de Quiquijana, provincia de Quispicanchi, del departamento de Cusco, ubicado en la zona altoandina del Perú, de acuerdo a las condiciones establecidas en la Norma Técnica EM.110 “Confort térmico y lumínico con eficiencia energética”; asimismo, se propone una solución de diseño para determinar el espesor adecuado del muro de la vivienda con el propósito de incrementar la temperatura interna de la misma y se cumpla los requerimientos mínimos de confort térmico establecidos en la referida normativa.

Dichas viviendas construidas en base de adobe, que es un material tradicional, accesible, renovable y económico en la zona donde se ubica la vivienda materia de estudio, también son amigables con el medio ambiente toda vez que no emiten gases de efecto invernadero, siendo así una alternativa en el sector de construcción en estos tiempos de cambio climático.

De otra parte, dichas viviendas de adobe también deben garantizar el confort térmico para la calidad de vida de la

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

**DO NOT REMOVE**

población, por ello se plantea el uso del adobe como material predominante en los muros de las viviendas. Este material, además de las bondades señaladas, tiene propiedades térmicas que permiten mantener la temperatura interna estable. Sin embargo, factores como la falta de aislamiento, vientos, la calidad de ventanas y puertas, material envolvente, orientación de la vivienda y la orientación solar pueden afectar el confort térmico.

A lo largo del tiempo, se han realizado investigaciones acerca del adobe, en las cuales se abordaron las propiedades térmicas del adobe elaborados con suelos de Lima, Cajamarca y Abancay, determinándose una conductividad térmica que varía entre 0.25 a 0.33 W/°K.m [5]. Asimismo, en estudios realizados en Puno se estableció que la conductividad térmica es de 0.061 W/°K.m en una pared de adobe y madera de una vivienda con 4 ambientes, ubicada a 3500 m.s.n.m., concluyendo que el adobe es un material con buen aislamiento térmico, porque la resistencia térmica obtenida fue mayor a investigaciones realizadas con anterioridad, además el coeficiente de transferencia de calor fue menor en comparación con los resultados obtenidos por otros estudios [6].

De igual forma, se construyó un módulo experimental ubicado en Ilave - Puno a 3868 m.s.n.m. con muro de adobe doble, con 20 cm de espesor cada uno y una separación de 2 cm uno del otro, logrando incrementar la temperatura interna de la vivienda de 5.54°C a 11.8°C, mejorando el confort térmico [7]. Incluso en Arequipa se evaluó 5 módulos experimentales con diferentes materiales y propiedades térmicas, lográndose incrementar la temperatura interna de dichos módulos de 11°C a 18.4°C[8].

De lo expuesto, se advierte que en las zonas altoandinas del Perú se puede incrementar la temperatura interna de las viviendas considerando los materiales y el proceso constructivo idóneo, aprovechando la energía solar durante el día y aislando la pérdida de dicha energía durante la noche [9]; [8]; [7]; [6] y [5].

A nivel de Latinoamérica, se evaluó el rendimiento térmico que aporta los elementos constructivos de una vivienda solar, combinando diferentes materiales: ladrillo, madera y poliestireno, que permita el bienestar del habitante. En dicho estudio se varió el espesor de la pared al doble del valor inicial, obteniendo un incremento leve de la cantidad de calor almacenado al interior de la vivienda [10].

Igualmente, en Europa se estudió los principios de diseño pasivo en un edificio Earthbag, en forma de cúpula, del establecimiento de Cappont de la Universidad de Lleida, el cual usa la técnica del super adobe de 35 cm de espesor con una conductividad térmica de 2.18 W/m°K y una densidad de 2 190 kg/m<sup>3</sup>, lográndose un incremento de la temperatura en 1.37°C [11].

Por otro lado, la microestructura de los materiales compuestos influye en el rendimiento térmico, siendo uno de los componentes que mejora las propiedades térmicas de los materiales de construcción [12]. Es así que en el caso de los materiales de almacenamiento térmico, debido a su baja conductividad térmica, es necesario incrementar su ancho para obtener un mayor tiempo de interfase de transferencia de calor [10].

De lo expuesto, se advierte que el confort térmico en viviendas altoandinas se mejora al incrementar las propiedades termo-físicas del material de construcción. Los estudios demuestran que el empleo de diferentes envolventes mejora la capacidad de almacenamiento de calor en el interior de una vivienda; no obstante, esta alternativa no es aplicable al presente caso de estudio debido a su elevado costo y dificultad para el acceso a dichos materiales en las zonas rurales altoandinas. Ante ello, la alternativa de variación de las dimensiones del muro de adobe representaría la solución razonable por disponerse de la materia prima para su elaboración en la zona de estudio.

Cabe mencionar que el objetivo principal planteado en este trabajo es analizar el confort térmico de una vivienda de adobe en zona altoandina, así como proponer el espesor óptimo del muro que cumpla las condiciones de temperatura de confort en el interior de la vivienda, mediante una simulación del método de elementos finitos.

## II. METODOLOGÍA

### A. Características de las viviendas de adobe en estudio

La vivienda evaluada se encuentra ubicada en el centro poblado de Pampa Quehwar, distrito de Quiquijana, provincia de Quispicanchi, del departamento de Cusco, a una altitud de 3231 m.s.n.m. Dicha vivienda es de material adobe de 2 niveles, cuya distribución cuenta con dos habitaciones, una sala, una cocina y un baño, como se muestra en los planos de arquitectura de las figuras 1 y 2.

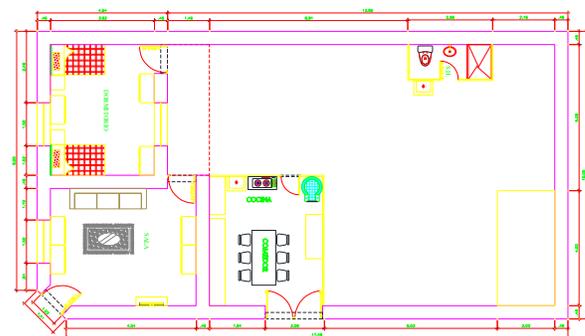


Fig. 1 Plano de arquitectura de la primera planta

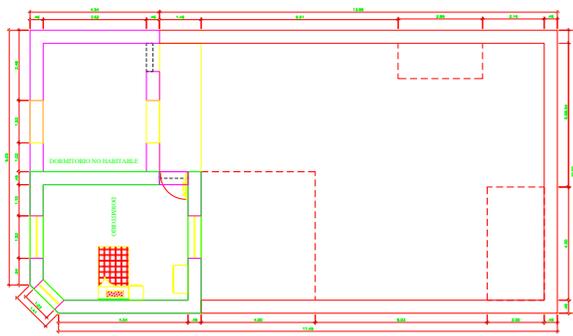


Fig. 2 Plano de arquitectura de la segunda planta

Cabe precisar que la vivienda en estudio no cuenta con estudio de ingeniería, ya que es una autoconstrucción efectuada con el conocimiento empírico del poblador. Los muros de la vivienda tienen un espesor promedio de 0.46 m, los cuales no cuenta con contrafuertes y viguetas; asimismo, las ventanas y techos están fabricadas con material de madera. La vivienda presenta aberturas, por la presencia de tres (03) ventanas y tres (03) puertas, como se muestra en la figura 3.



Fig. 3 Vista de elevación de la vivienda típica de adobe

### B. Conductividad térmica del adobe

Se consideró cuatro (04) especímenes de adobe de dimensiones volumétricas de 13 cm x 18.5 cm x 39.2 cm para el ensayo de resistividad y conductividad térmica, de acuerdo con la Norma ASTM D5334-14. Para dicho fin se empleó el equipo de medición TLS-100 Thermtest, con una precisión de 5%, el cual se muestra en la figura 4.



Fig. 4 Equipo de medición de conductividad térmica

Los resultados obtenidos en el referido ensayo se muestran en la tabla I.

TABLA I  
PROPIEDADES TÉRMICAS DEL ADOBE

Muestra	Resistividad térmica	Conductividad térmica	Temperatura
1	1.307 m <sup>2</sup> K/W	0.766 W/m <sup>2</sup> K	23.00°C
2	1.019 m <sup>2</sup> K/W	0.981 W/m <sup>2</sup> K	20.85°C
3	1.238 m <sup>2</sup> K/W	0.808 W/m <sup>2</sup> K	21.33°C
4	1.121 m <sup>2</sup> K/W	0.893 W/m <sup>2</sup> K	21.25°C

De la tabla anterior, se verifica que la conductividad mínima es de 0.766 W/m<sup>2</sup>K y una máxima de 0.981 W/m<sup>2</sup>K para el adobe empleado en las viviendas del centro poblado de Pampa Quehuar.

### C. Evaluación del confort térmico de la vivienda de adobe

La verificación del confort térmico se efectúa de acuerdo con el procedimiento establecido en la Norma Técnica EM.110, que se describe a continuación.

#### Paso 1: Datos del proyecto.

Se debe determinar la zona bioclimática a la que pertenece la vivienda de adobe. Requiriéndose como datos la altitud y la provincia en la que se ubica la vivienda evaluada, para el empleo del Anexo 1B “Características climáticas de cada zona bioclimática” y Anexo 1A “Ubicación de provincia por zona bioclimática” de la Norma Técnica EM.110. Sobre el particular, la vivienda de adobe del presente estudio se encuentra ubicada en la zona bioclimática mesoandina; no obstante, de acuerdo con SENAMHI<sup>1</sup> [13] la provincia de Quispicanchi pertenece a la zona altoandina.

#### Paso 2: Transmitancias térmicas máximas.

De acuerdo con la tabla N° 2 “Valores de Transmitancias térmicas máximas” de la Norma Técnica EM.110, la transmitancia máxima permisible es de 1.00 W/m<sup>2</sup>K para la zona altoandina.

<sup>1</sup> SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

**Paso 3:** Verificación del tipo de envolvente que posee la investigación de edificación:

De acuerdo con el capítulo 5 de la Norma Técnica EM.110, se ha clasificado cuatro (04) tipos de envolventes, cada uno depende de la disposición de los muros de la vivienda.

En el presente caso, la vivienda consta de dos tipos de envolventes como se muestran en las figuras 5 y 6.

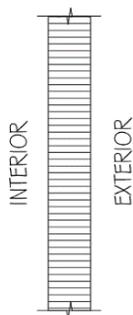


Fig. 5 Muro Tipo 1A.



Fig. 6 Muro Tipo 2A.

A continuación, en la figura 7 se muestra los tipos de envolvente identificados en el ambiente de la sala de vivienda materia de estudio.

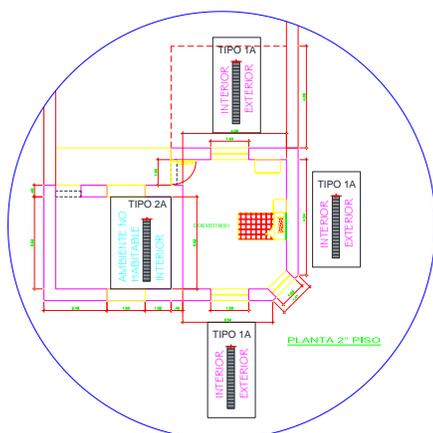


Fig. 7 Tipología de muros en la habitación evaluada.

**Paso 4:** Procesamiento del cálculo de transmitancia térmica.

Para el cálculo de transmitancia térmica se considera el promedio de la conductividad térmica de  $0.86 \text{ W/m}^\circ\text{K}$  y el espesor del adobe de  $0.46 \text{ m}$ , que se muestran en la figura 8. Cabe precisar que no se considera el revestimiento debido a que su espesor es menor a  $5 \text{ mm}$ .

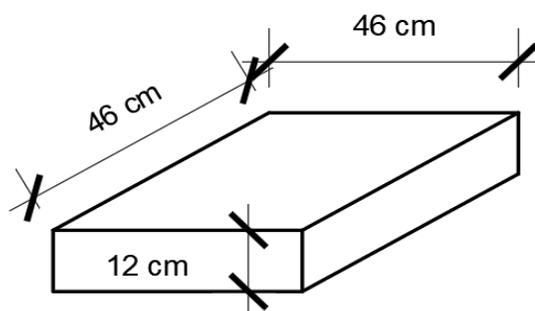


Fig. 8 Dimensiones del adobe.

Se determina la resistencia superficial externa ( $R_{se}$ ) y la resistencia superficial interna ( $R_{si}$ ) para cada tipo de muro, de acuerdo con lo previsto en el numeral 3, paso 4, del Anexo 2 de la referida Norma Técnica EM.110; determinándose que la  $R_{se}$  es igual a  $0.11 \text{ W/m}^2\text{K}$  y la  $R_{si}$  es equivalente a  $0.06 \text{ W/m}^2\text{K}$  para el muro tipo 1ª; en el caso del muro tipo 2ª, la  $R_{se}$  y  $R_{si}$  es igual a  $0.11 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Por otro lado, la transmitancia térmica de ventanas y puertas se determina empleando las tablas denominadas “Transferencia térmica según tipos de carpintería o marco de ventanas en muros tipo 1A vertical” y “Transmitancia térmica de puertas en muros tipo 1A” de la Norma Técnica EM.110, respectivamente, así como su Anexo N° 3 “Lista de características higrométricas de los materiales de construcción” de la referida norma.

En base a los datos mencionados, se determina que la transmitancia de las ventanas y puerta es de  $5.12 \text{ W/m}^2\text{K}$  (resultado de la división de  $31.91/6.23$ ) y  $3.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  (de la relación de  $8.40/2.40$ ), respectivamente, que se detallan en las tablas II y III:

TABLA II  
TRANSMITANCIA TÉRMICA EN VENTANAS

Elementos	Espesor (m)	Cantidad	Perímetro (m)	Coef. de transmitancia térmica k (W/m K)	$S_1$	$U_1$	$S_1 \times U_1$
<b>Ventanas</b>							
<b>Tipo de vidrio</b>							
Vidrio crudo incoloro	0.006	2			3.90	5.70	22.23
Vidrio crudo incoloro	0.006	1			1.30	5.70	7.41
<b>Tipo de carpintería del marco</b>							
Madera de densidad media alta	0.13	2	2.80		0.73	2.20	1.61
Madera de densidad media alta	0.13	1	2.30		0.30	2.20	0.66
<b>Total:</b>					<b>6.23</b>		<b>31.91</b>

TABLA III  
TRANSMITANCIA TÉRMICA EN PUERTAS

Elementos	Espesor (m)	Cantidad	Perímetro (m)	Coef. de transmitancia térmica k (W/m K)	S <sub>i</sub>	U <sub>i</sub>	S <sub>i</sub> U <sub>i</sub>
<b>Puertas</b>							
Tipo de puerta:							
Hoja maciza de madera	0.06			3.50	2.40	3.50	8.40
<b>Total:</b>					<b>2.40</b>		<b>8.40</b>

Asimismo, se calcula la transmitancia térmica de los muros de adobe sin cámaras de aire (Tipos 1A y 2A), que se detalla en las tablas IV y V. Cabe resaltar que no se considera los vanos de la estructura.

TABLA IV  
TRANSMITANCIA TÉRMICA EN MUROS 1A

Elementos	Espesor (m)	Cantidad	Perímetro (m)	RST/ RCA (W/ m <sup>2</sup> K)	Coef. de transmitancia térmica k (W/ m K)	S <sub>i</sub>	U <sub>i</sub>	S <sub>i</sub> U <sub>i</sub>
<b>Resistencias superficiales</b>								
Rse				0.11				
Rsi				0.06				
<b>Muro sin cámara de aire (Muro tipo 1A)</b>								
Composición del muro								
Adobe	0.46			0.86	34.45	1.4212	48.96	
<b>Total</b>					<b>34.45</b>		<b>48.96</b>	

TABLA V  
TRANSMITANCIA TÉRMICA EN MUROS 2A

Elementos	Espesor (m)	Cantidad	Perímetro (m)	RST/ RCA (W/ m <sup>2</sup> K)	Coef. de transmitancia térmica k (W/ m K)	S <sub>i</sub>	U <sub>i</sub>	S <sub>i</sub> U <sub>i</sub>
<b>Resistencias superficiales</b>								
Rse				0.11				
Rsi				0.11				
<b>Muro sin cámara de aire N°1</b>								
Composición del muro								
Adobe	0.46			0.86	11.42	1.3269	15.15	
<b>Total</b>					<b>11.42</b>		<b>15.15</b>	

Finalmente, con los resultados obtenidos en las tablas II, III y IV, se calcula la transmitancia térmica final del muro tipo 1A mediante la siguiente ecuación.

$$U_{final-1A} = \frac{\sum S_i \cdot U_i}{\sum S_i} = \frac{31.91 + 8.40 + 48.96}{6.23 + 2.40 + 34.45} = 2.07 \text{ W/m}^2\text{°K} \quad (1)$$

Para el caso de un muro sin cámaras de aire tipo 2A, la transmitancia final se determina mediante la ecuación siguiente.

$$U_{final-2A} = 0.5 * \frac{\sum S_i \cdot U_i}{\sum S_i} = 0.5 * \frac{15.19}{11.42} = 0.67 \text{ W/m}^2\text{°K} \quad (2)$$

De lo expuesto, la transmitancia de la vivienda de adobe con muro 1A es de 2.07 W/m<sup>2</sup>°K, la cual supera en 107% al valor máximo permisible establecido en la Norma Técnica EM.110 (Ver el paso 2).

#### D. Temperatura interna, externa y ambiental de la vivienda.

La temperatura interna y externa se determinó con un higrotermómetro, obteniéndose una temperatura mínima de 13.37°C y una máxima de 21.80°C en la cara externa del muro de la vivienda; asimismo, en la cara interna del muro la temperatura mínima y máxima es de 17.60°C y 22°C, respectivamente. En la figura 9 se muestra las mediciones de temperatura que se obtuvieron en noviembre de 2023.

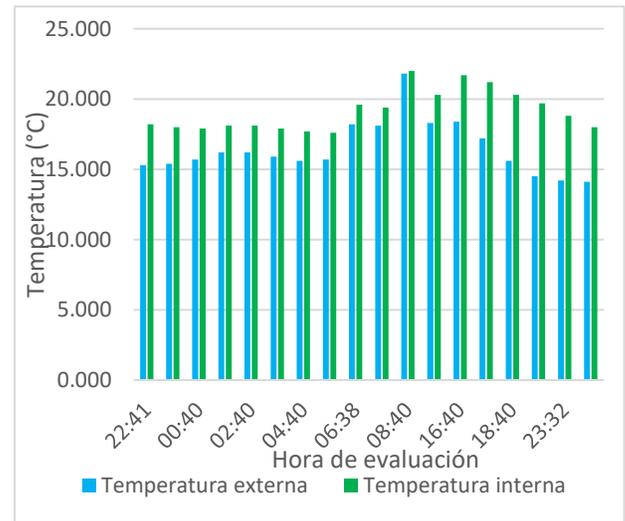


Fig. 9 Temperatura interna vs temperatura externa.

Asimismo, la temperatura ambiental se obtuvo del aplicativo Microsoft Start, determinándose una temperatura máxima y mínima promedio de 16°C y 3°C, respectivamente, para el mes de noviembre, como se muestra en la figura 10.

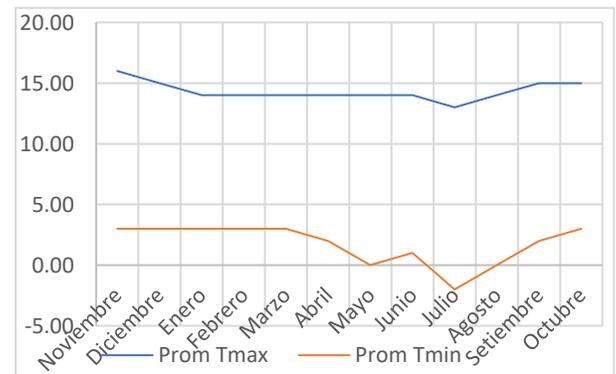


Fig. 10 Temperatura ambiente por cada mes.

Seguidamente, considerando los valores mínimo y máximo de la temperatura ambiente se determinó la temperatura de confort, mediante la expresión siguiente:

$$T_c = 13.5 + 0.54T_A = 13.5 + 0.54 \left( \frac{16+3}{2} \right) = 18.6^\circ\text{C} \quad (3)$$

De lo anterior, la vivienda debe tener una temperatura de confort es de  $18.6^{\circ}\text{C}$  en el mes de noviembre.

*E. Simulación numérica para determinar el espesor óptimo del muro de adobe.*

Para los efectos de la simulación numérica se consideraron los siguientes datos:

$K = 0.86 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$  (conductividad térmica)

$$h_L = \frac{1}{R_{se}} = \frac{1}{0.11} = 9.09 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ (coeficiente de convección externa)} \quad (4)$$

$$h_R = \frac{1}{R_{si}} = \frac{1}{0.06} = 16.66 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ (coeficiente de convección interna)} \quad (5)$$

$T_L = 13.92^{\circ}\text{C}$  (mínima temperatura en la cara externa del muro)

$T_R = 18.6^{\circ}\text{C}$  (temperatura de confort en la cara interna del muro)

$T_{\infty L} = 13.37^{\circ}\text{C}$  (temperatura ambiente en la cara externa del muro)

$T_{\infty R} = 18.89^{\circ}\text{C}$  (temperatura ambiente en la cara interna del muro)

$A = 1\text{m}^2$  (se asume un área de control)

El objetivo de la simulación es determinar un espesor “L” del muro de adobe, que cumpla con las condiciones de temperatura de confort en la parte interna de la vivienda considerando la temperatura mínima en la parte exterior de la misma, como se muestra en la figura 11.

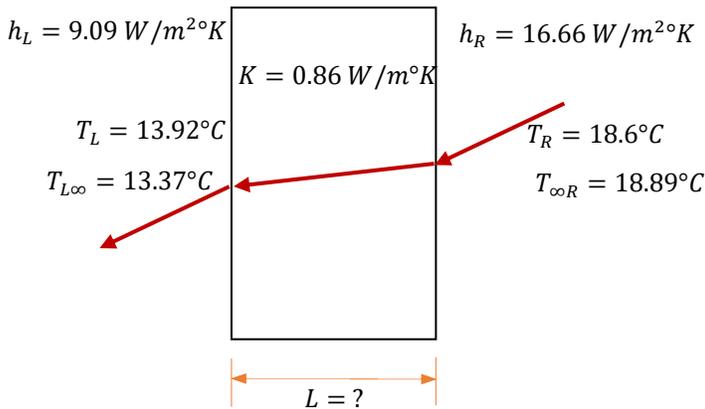


Fig. 11 Datos para la simulación

A continuación, se describe el proceso de la simulación numérica:

**Paso 1:** Definición del volumen de control y el modelo numérico

El volumen de control para la presente investigación fue de  $0.46 \text{ m}^3$ , con un espesor de  $0.46 \text{ m}$  y un área de  $1 \text{ m}^2$ .

De otra parte, se considera un modelo de una dimensión con dos elementos lineales, como se muestra en la figura 12.

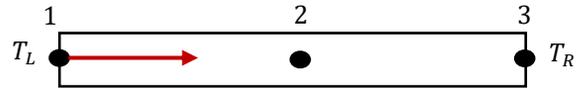


Fig. 12 Modelo unidimensional de tres nodos

**Paso 2:** Ensamblaje de las matrices de conducción y convección.

La matriz de conducción esta dada por la Ley de Fourier siguiente:

$$[k_c] = \frac{AK}{(L/2)^2} \int_0^x \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} dx \quad (6)$$

Se considera de manera iterativa un valor para el espesor “L”, obteniéndose el valor final de  $L = 0.82 \text{ m}$ . Entonces, las matrices de conducción para los elementos 1-2 y 2-3 son de la forma:

$$[k_c] = \frac{1 \cdot 0.86}{0.41^2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.09 & -2.09 \\ -2.09 & 2.09 \end{bmatrix} \quad (7)$$

De otra parte, la matriz de convección esta dada por la Ley de Newton:

$$[k_h]_1 = h_L A \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Para los elementos 1-2 y 2-3, las matrices de convección son de la forma:

$$[k_h]_1 = 9.09 * 1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.09 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[k_h]_3 = 16.66 * 1 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 16.66 \end{bmatrix} \quad (10)$$

**Paso 3:** Definición del gradiente de temperatura y gradiente de flujo del calor.

El flujo de temperatura esta dada por la ecuación siguiente:

$$\{f_h\} = h T_{\infty} A \int_0^L \left\{ \begin{matrix} \frac{x}{L} \\ 1 - \frac{x}{L} \end{matrix} \right\} dx \quad (11)$$

Es así que el flujo para el nodo 1 y 3 tiene la siguiente forma:

$$\{f_h\}_L = 9.09 * 13.37 * 1 \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 121.63 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$\{f_h\}_R = 16.66 * 18.89 * 1 \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 314.90 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

**Paso 4:** Ensamblaje las ecuaciones de cada elemento para obtener la ecuación global y condiciones de frontera.

Se ensambla la matriz considerando la afluencia de calor por convección y conducción, cumpliendo la siguiente ecuación global:

$$\{F\} = [K]\{t\} \rightarrow \begin{Bmatrix} 121.63 \\ 0 \\ 314.90 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 11.18 & -2.09 & 0 \\ -2.09 & 4.19 & -2.09 \\ 0 & -2.09 & 18.76 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

#### Paso 5: Determinación de las temperaturas nodales

Se determina la temperatura global  $\{t\}$  resolviendo la ecuación 14.

$$\begin{Bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 11.18 & -2.09 & 0 \\ -2.09 & 4.19 & -2.09 \\ 0 & -2.09 & 18.76 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} 121.63 \\ 0 \\ 314.90 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 13.9 \\ 16.3 \\ 18.6 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Como se puede advertir, el valor del espesor “L” de 0.82 m, obtenida de manera iterativa, cumple con las condiciones de la temperatura interna de confort “ $t_3$ ” y la temperatura externa de la cara del muro de adobe “ $t_1$ ”, que se obtuvo *in situ*.

### III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los adobes empleados por los pobladores de Pampa Quehuar para la autoconstrucción de sus viviendas tiene una conductividad térmica de 0.86 W/m<sup>2</sup>K, la cual es aproximado al valor establecido en la Norma Técnica EM.110 de 0.90 W/m<sup>2</sup>K. De otra parte, el valor obtenido de conductividad térmica en el presente estudio es mayor en 160% con relación al valor determinado por los investigadores [5] para adobes compuestos en Lima, Cajamarca y Apurímac, quienes concluyeron que la conductividad térmica del adobe varía de 0.25 a 0.33 W/m<sup>2</sup>K.

A la fecha del presente estudio, la lectura de la temperatura mínima obtenida en el exterior de la vivienda fue de 13.90°C y la máxima temperatura fue de 21.80°C; asimismo, la temperatura en el interior de la vivienda tuvo una mínima y máxima de 17.60°C y 22°C, respectivamente, correspondiendo las mínimas temperaturas al horario de 03:00 a 04:00 A.M. Al respecto, en otro estudio [15] se determinó una temperatura mínima y máxima de 4.6°C y 14.0°C, respectivamente, en una vivienda de la región Puno, cuyas mediciones se realizaron durante un periodo de 40 a 50 días consecutivos en el mes de junio. En ese sentido, es recomendable recolectar las temperaturas en una estación del año más crítica, siendo estos los meses de junio y julio.

Por otro lado, de los resultados obtenidos del análisis de confort térmico aplicando la Norma Técnica EM.110, se observa las siguientes particularidades, la diferencia en la zona

bioclimática para el centro poblado Pampa Quehuar, de acuerdo con lo establecido en la clasificación de la referida norma corresponde a la zona mesoandina y conforme a la Nota Técnica N° 001-2019 de SENAMHI corresponde a una zona altoandina. Sobre el particular, para efectos de cálculo de la transmitancia térmica se consideró que la vivienda evaluada se ubica en una zona altoandina, considerando que la zona de estudio se encuentra a una altitud entre 3200 y 4000 m.s.n.m. En ese sentido, tomando en cuenta la zona bioclimática mencionada y las características de la arquitectura y estructura de la vivienda de adobe se obtuvo una transmitancia de 2.07 W/m<sup>2</sup>K que es mayor en 107% al valor máximo permisible en la citada norma. Por tanto, la vivienda evaluada no cumple con las condiciones mínimas de confort térmico, debido a que estas fueron autoconstruidas por los mismos pobladores de dicha localidad sin la asesoría de un profesional técnico.

De esta manera, con la finalidad de mejorar el confort térmico en la vivienda se planteó incrementar el espesor de los muros, para ello se realizó una simulación numérica mediante el método de elementos finitos. Se consideró para dicho análisis las condiciones en la frontera: la temperatura en la parte externa de la vivienda 13.9°C y la temperatura de confort en el interior de la vivienda de 18.6°C, obteniéndose para dichas condiciones un espesor de 0.82 m, es así como se logró incrementar la temperatura interna de la vivienda en 4°C. De otra parte, esta alternativa de solución incrementa el peso del adobe, siendo necesario uno con dimensiones de 82 cm x 41 cm x 21 cm, que tendría un peso aproximado por unidad de 80 kg, generando que el proceso constructivo sea más lento, recomendándose en estos casos mejorar la elaboración de los adobes con materiales compuestos para obtener una conductividad térmica similar al obtenido en la investigación [5].

Finalmente, la solución planteada de incremento del espesor de los muros para mejorar el confort térmico es compatible a las investigaciones realizadas [7], [8], [9], [10], [11] y [12], en las cuales se obtuvo un incremento en la temperatura interna como resultado de simular una vivienda incrementando el espesor de la pared o considerando una pared doble. En realidad, conforme a lo señalado por el autor [14], se debe emplear los materiales tradicionales que volverán a ganar terreno en las preferencias, por el empleo de materia prima renovable, económico y accesible, priorizándose en este estudio una solución con el material adobe.

### IV. CONCLUSIONES

La conductividad térmica del adobe es de 0.86 W/m<sup>2</sup>K, el cual es empleado para la autoconstrucción de viviendas por los pobladores de Pampa Quehuar. Al respecto, de acuerdo con la Norma Técnica EM.110, la conductividad térmica del adobe es de 0.9 W/m<sup>2</sup>K, el cual es mayor en 0.04 W/m<sup>2</sup>K con respecto al valor obtenido en la presente investigación.

La temperatura mínima registrada en el exterior de la vivienda es de 13.9°C y un máximo de 21.8°C, habiéndose registrado los valores mínimos en el horario de 03:00 a 04:00 A.M.; asimismo, la temperatura interna registrada varía de 17.6°C a 22°C. Considerando las temperaturas mínimas se determinó que la temperatura de confort para la vivienda en estudio es de 18.6°C, que es mayor al determinado en el interior de la vivienda, por lo que, se requiere mejorar las características de la misma para mejorar el confort térmico.

La transmitancia térmica de la vivienda (incluyen ventanas y puertas) es de 2.07 W/m<sup>2</sup>°K, la cual supera en 137% el valor máximo permitido en la Norma Técnica EM.110; por lo tanto, los muros de adobe de la vivienda no cumplen con las condiciones mínimas de confort térmico.

De la simulación del método de elementos finitos, se determinó que el espesor óptimo es de 0.82 m para el muro de adobe, que garantiza la estabilidad de la temperatura de confort de 18.6°C en el mes de noviembre.

#### REFERENCIAS

- [1] Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. “CENEPRED. Escenarios de riesgo por heladas y friajes 2021.” (2021)
- [2] MINSA. “Análisis de situación de salud del Perú 2019.” Recuperado el 17 de octubre de 2023, de Ministerio de Salud: <https://www.gob.pe/institucion/minsa/noticias/42784-heladas-y-friaje-causan-danos-materiales-y-afectan-la-salud-de-las-personas> (2019).
- [3] E. P. Beteta y S. D. Reyes. “Inadecuada ejecución del programa Sumaq Wasi del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento para mejorar la situación de vivienda de poblaciones rurales en riesgo ante heladas y friaje.” Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú. (2023).
- [4] Fondo de Cooperación para el Desarrollo Social. “Mi abrigo, Casitas calientes y seguras ante heladas.” (2020).
- [5] G. A. Abanto, M. M. Gómez, M. Horn, M. Karkri, G. Lefebvre & J. L. Soliz. “Propiedades térmicas del adobe empleado en las zonas rurales peruanas: Resultados experimentales y simulación numérica de un material biocompuesto tradicional.” *Case studies in construction materials*, vol. 6, pp. 177-191. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.02.001> (2017).
- [6] K. U. Escobar Copa, A. Holguino Huarza & L. Olivera Marocho. “Confort térmico en una habitación de adobe con sistema de almacenamiento de calor en los Andes de Perú.” *Revistas de Investigaciones Altoandinas*, vol. 20(3), pp. 289-300. Recuperado el 24 de 03 de 2024, en [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S2313-29572018000300003&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2313-29572018000300003&lng=pt&nrm=iso) (2018).
- [7] A. Flores Condori. “Construcción de una vivienda solar en base a las propiedades termofísicas y evaluación experimental de su confort térmico en Ilave.” *Revistas de Investigaciones Altoandinas*, vol. 16(1), pp. 177-186. Recuperado el 24 de 03 de 2024, en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5893905> (2014).
- [8] M. M. Gómez, M. Horn, G. Lefebvre & J. O. Molina. “Diseño de un módulo experimental bioclimático obtenido a partir del análisis de simulaciones térmicas para el centro poblado de Imata (4519 m.s.n.m.) ubicado en Arequipa, Perú.” *Información tecnológica*, vol. 31(2), pp. 173-186. Recuperado el 24 de 03 de 2024, en <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000200173> (2020).
- [9] R. Barrionuevo, R. L. Espinoza Paredes, A. Gutarra, F. Huaylla, L. Lau, J. O. Molina Fuentes & G. Saavedra. “Evaluación experimental de cambios constructivos para lograr confort térmico en una vivienda altoandina del Perú.” *Avances en energías renovables y medio ambiente*, vol. 13, pp. 203-210. Recuperado el 24 de 03 de 2024, en <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/97335> (2009).
- [10] F. W. Marin Salgado. “Evaluación del rendimiento de calefacción o refrescamiento producido por los elementos constructivos y microclima de una vivienda pasiva. Una forma de integrar el rendimiento del confort térmico pasivo a su administración del ciclo de vida de un edificio.” *Revista INVI*, vol. 27(75), pp. 171-197. Recuperado el 24 de 03 de 2024, en <https://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/62339> (2012).
- [11] A. Carrobe, A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, L. Rincon & C. Sole. “Analysis of the thermal behavior of an earthbag building in mediterranean continental climate: monitoring and simulation.” *Energies*, vol. 13(1), pp. 162. Recuperado el 24 de 03 de 2024, en <https://doi.org/10.3390/en13010162> (2019).
- [12] A. Khabbazi, M. Lamrani, A. Lkoun & A. Meskini. “Thermal Behaviour of Clay-Baesd Building Materials: A numerical study using microstructural modeling.” *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 10, pp. 63-73. Obtenido el 24 de 03 de 2024, en <https://doi.org/10.4236/jpee.2022.104005> (2022).
- [13] SENAMHI. “SENAMHI-PERÚ. Orientaciones para el análisis del clima y determinación de los peligros asociados al cambio climático.” (2020).
- [14] A. Cedeño Valdiviezo. “Materiales Bioclimáticos.” *Revista de Arquitectura*, vol. 12, pp. 100-110. Recuperado el 24 de 03 de 2024, en <https://revistadearquitectura.ucatolica.edu.co/article/view/760> (2010).
- [15] R. L. Espinoza Paredes, G. Saavedra, A. Galarreta, A. Gutarra & F. Huaylla. “Análisis y diagnóstico térmico en viviendas altoandinas del Perú” *Avances en energías renovables y medio ambiente*, vol. 12, pp. 17-24. Recuperado el 24 de 03 de 2024, en <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/95022> (2008).