

ARTÍCULO ORIGINAL**Propuesta de diseño de un Sistema de Calefacción Sostenible (SCS) utilizando biomasa residual ganadera para la producción de biogás en viviendas altoandinas****Proposal for the design of a Sustainable Heating System (SCS) using livestock waste biomass to produce biogas in high Andean homes**Luis Linares¹* y Brenda Huaytalla²**RESUMEN**

Este estudio presenta el diseño y evaluación de un Sistema de Calefacción Sostenible (SCS) que utiliza biomasa residual ganadera como fuente de energía para calentar un fluido térmico. Esta energía almacenada se emplea en la climatización de un prototipo de vivienda de 1 m², pensado específicamente para regiones altoandinas, donde las bajas temperaturas representan un desafío para el confort térmico. El sistema está compuesto por una red de tuberías de cobre dispuestas en forma de serpentín, conectadas a un tanque de almacenamiento en el cual se realiza la combustión de biomasa, abastecido por gas generado en un biodigestor externo. La vivienda prototipo se construyó utilizando materiales termoaislantes, como planchas de yeso y lana de oveja, para optimizar la retención de calor en su interior. Se evaluaron tres escenarios: vivienda sin aislamiento, vivienda con aislamiento, y vivienda con aislamiento junto con el sistema de calefacción. Los resultados demostraron que la implementación del sistema completo permitió alcanzar una temperatura interna 4.1°C superior a la de las viviendas rurales locales, evidenciando su efectividad y capacidad para proporcionar un ambiente más confortable en climas fríos. Este SCS representa una solución viable y sostenible para mejorar el confort térmico en viviendas altoandinas.

Palabras clave: Biogás, Sistema de Calefacción Sostenible, biomasa residual, confort térmico, aislamiento térmico.

ABSTRACT

This study presents the design and evaluation of a Sustainable Heating System (SCS) that uses livestock waste biomass as an energy source to heat a thermal fluid. This stored energy is used in the air conditioning of a 1 m² prototype house, specifically designed for high Andean regions, where low temperatures represent a challenge for thermal comfort. The system is composed of a network of copper pipes arranged in the form of a coil, connected to a storage tank in which biomass combustion takes place, supplied by gas generated in an external biodigester. The prototype house was built using thermo-insulating materials, such as gypsum board and sheep wool, to optimize heat retention inside. Three scenarios were evaluated: house without insulation, house with insulation, and house with insulation together with the heating system. The results showed that the implementation of the complete system allowed reaching an internal temperature 4.1°C higher than that of local rural dwellings, evidencing its effectiveness and capacity to provide a more comfortable environment in cold climates. This SCS represents a viable and sustainable solution to improve thermal comfort in high Andean dwellings.

Keywords: Biogas, sustainable heating system, residual biomass, thermal comfort, thermal insulation

*Autor por correspondencia

¹ Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú. Email: 20241759@lamolina.edu.pe

² Universidad Científica del Sur, Perú. Email: 180000382@cientifica.edu.pe

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la sierra peruana se ha visto afectada por las bajas temperaturas durante la temporada de invierno, caracterizadas por las intensas heladas y friajes (Ministerio de Salud [MINSA], 2016). Estas condiciones extremas han generado efectos significativos en la agricultura, ganadería y en la salud de las poblaciones vulnerables, damnificadas tanto por su situación socioeconómica y por su ubicación geográfica (Cerrón, 2022). Según el Instituto de Defensa Civil (INDECI), en el año 2016 el descenso de temperaturas en las zonas rurales afectó la salud de 257.251 personas, causando enfermedades respiratorias, impactando en mayor medida a los departamentos de Puno (51%) y Cusco (21%).

De acuerdo con el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres ([CENEPRED], 2022), alrededor de siete millones de peruanos se encuentran en el nivel de riesgo alto ante descensos bruscos de la temperatura. Además, el 80% de la población habita en zonas rurales, donde las viviendas son construidas con materiales inadecuados térmicamente (Umán, 2019). Las técnicas constructivas utilizadas en estas zonas son generalmente poco eficientes en términos de aislamiento térmico, lo que las hace inadecuadas para resistir las heladas y el friaje (Santa, 2008).

En las zonas altoandinas, la mayoría de las viviendas están construidas con materiales de bajo costo, como adobe en los muros, techos de paja y madera, lo cual dificulta la retención de calor en el interior, además estas estructuras permiten que el frío penetre con facilidad, incrementando la exposición de sus habitantes a las bajas temperaturas (Moncloa, 2018). Esta situación evidencia la vulnerabilidad de gran parte de la población en estas áreas, que vive en condiciones de pobreza y carece de recursos para mejorar el aislamiento térmico de sus viviendas (Núñez, 2012).

Para enfrentar esta problemática, ante el desafío de las bajas temperaturas, y el esfuerzo por explorar alternativas sostenibles de energía, se ha desarrollado alternativas sostenibles de calefacción y aislamiento que buscan ser accesibles y de bajo impacto ambiental (Navarro y Rojas, 2018). Este sistema busca aprovechar los recursos naturales locales, utilizando materiales accesibles y económicos que se encuentran en las zonas rurales, con el objetivo de maximizar la eficiencia energética y mejorar el confort térmico (Horn y Molina, 2016).

Un factor clave es el uso de biomasa residual, que en esta área del estudio proviene de los residuos ganaderos de los corrales cercanos a las viviendas. En la mayoría de los casos, estos residuos son gestionados de manera inadecuada (Paucar y Quispe, 2015). Además, la generación de residuos agrícolas en las parcelas representa un problema ambiental debido a la falta de técnicas de reaprovechamiento que podrían beneficiar a los agricultores, como el compostaje y la producción de energía para la agroindustria, reduciendo así la dependencia de combustibles fósiles como el biodiésel y el carbón (Gamarrá et al., 2021).

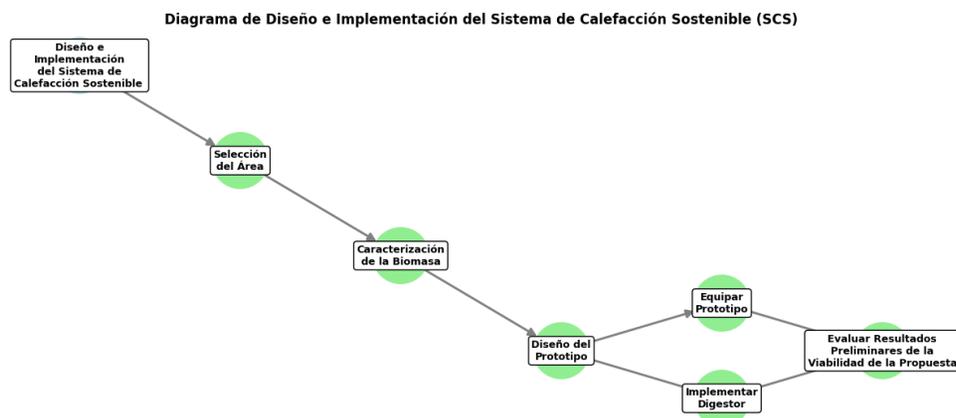
La biomasa residual representa un potencial energético significativo, ya que puede reemplazar al carbón mineral y utilizarse en sistemas energéticos de mayor escala, como instalaciones térmicas, mitigando el impacto ambiental (Romero, 2010). Estudios previos han demostrado que la biomasa generada en la agricultura no solo es una fuente de energía renovable, sino también una opción ambientalmente sostenible que podría ser evaluada en términos de su capacidad calorífica (Camargo y Williams, 2012). El objetivo de este estudio preliminar es diseñar un prototipo de sistema de calefacción sostenible (SCS) que utilice biomasa residual ganadera para la producción de biogás e implemente aislamiento térmico en la estructura, con el fin de climatizar una vivienda altoandina en la comunidad de Chupascunca. Se espera que este prototipo no solo sea una alternativa para enfrentar las bajas temperaturas, sino que también sirva como un modelo replicable en el futuro, incorporando nuevas tecnologías basadas en energías renovables y utilizando materiales termoaislantes para optimizar el calor específico dentro de la vivienda.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio preliminar de carácter primario tiene como objetivo evaluar la viabilidad de un sistema de calefacción sostenible (SCS) en viviendas altoandinas, utilizando biomasa residual ganadera como fuente de energía y aislamiento térmico adicional. La metodología empleada se estructuró en varias fases: selección del área de estudio, caracterización de las fuentes de biomasa, diseño del prototipo de vivienda y evaluación del rendimiento del sistema de calefacción. El diseño experimental incluyó la implementación de un digestor para la producción de biogás, así como un prototipo de vivienda equipado con materiales termoaislantes y un sistema de distribución de calor mediante tuberías. Las mediciones de eficiencia térmica y producción de metano se realizaron bajo condiciones controladas y sistemáticas, con el fin de garantizar la precisión y validez de los resultados en el contexto local.

Figura 1

Estructura metodológica de la implementación del Sistema de Calefacción Sostenible (SCS)



Área de estudio

El ámbito de estudio donde se implementó el Sistema de Calefacción Sostenible (SCS) fue en la comunidad de Chupascunca que se encuentra ubicado en la provincia de Cangallo, Departamento de Ayacucho, a una altitud de 2746 msnm, latitud sur de 13° 31' 17"S y una longitud de 74° 8' 43"W. Limita con el centro poblado de Incaraccay y Accomayo. Las principales actividades económicas en la comunidad son la agricultura, ganadería y silvicultura, que constituyen la fuente principal para la generación de biomasa residual (Moncloa, 2018).

Caracterización de la biomasa

El área de estudio se distingue por sus principales actividades económicas: la agricultura y la ganadería, que constituyen la principal fuente de generación de biomasa residual (Moncloa, 2018). En este contexto, para la caracterización de la biomasa, se seleccionó una superficie de 50 m² en una parcela agrícola cercana a una fuente de biomasa ganadera residual. En total, se recolectaron 150 L de estiércol, estimándose, según estudios previos, que el volumen diario de excretas por bovino es de aproximadamente 0.053 m³/día, lo que equivale a 50 kg/día (Duque et al., 2007). Posteriormente, el estiércol fue mezclado con agua en una proporción de 1:1, asegurando una adecuada homogeneización del sustrato (Alvarado et al., 2016). Esta mezcla fue tamizada para garantizar su uniformidad, y se utilizó en el biodigestor con el fin de optimizar la producción de biogás, asegurando condiciones óptimas de humedad y desempeño anaeróbico.

Figura 2

Proceso de recolección del estiércol vacuno



Nota. Recolección y traslado del estiércol vacuno utilizado en el biodigestor

Diseño del biodigestor

Se empleó un biodigestor de 150 L de tipo estacionario o batch, ubicado a 130 cm de la vivienda prototipo, con el fin de optimizar el alcance y la utilización del material orgánico, aprovechando además el subproducto (biogás) generado en la digestión anaeróbica. El diseño del biodigestor contempló que el sustrato ocupara el 70 % del volumen total, dejando el 30 % restante como espacio libre para la acumulación de gases (Giraldo y Ortiz, 2018). En este sentido, se utilizó una mezcla compuesta por un 50 % de sustrato y un 50 % de agua, es decir, 50 L de estiércol y 100 L de agua, en una dilución de 1:1. Tras la instalación del biodigestor con el sustrato, se procedió a medir los parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, % de humedad), y se estableció un tiempo de retención hidráulica de tres meses.

Figura 3

Diseño del biodigestor

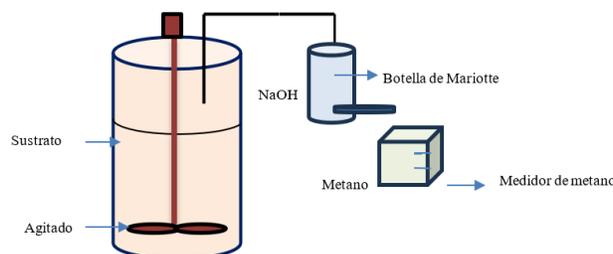


Nota. (a) Fotografía del diseño del biodigestor, (b) Medición con el Peachímetro PHMETER, modelo PH-009

La cuantificación de metano se realizó mediante el método volumétrico, que se basa en la absorción y desplazamiento de volumen. La medición se llevó a cabo utilizando una botella de Mariotte de 1 litro, donde el gas se canalizó a través de una válvula que contenía agua para absorber gases como ácido sulfhídrico (H_2S) y dióxido de carbono (CO_2), permitiendo así la medición precisa del metano (CH_4) (Castillo et al., 2003). Este proceso se efectuó de forma continua, realizando lecturas diarias para asegurar la precisión de los datos (Pacheco, 2016).

Figura 4

Medición del metano por botella de Mariotte



Nota. Adaptado de “Construcción y evaluación de un digestor anaerobio para la producción de biogás a partir de residuos de alimentos y poda a escala banco”, (Pacheco, 2016).

Diseño Propuesto de la vivienda

Se propone la simulación de un prototipo de vivienda con dimensiones de 1 m de largo y 0,5 m de ancho, que se ubicará en la parcela de un agricultor de la comunidad de Chupascunca. El proceso de construcción comienza con la colocación de planchas de yeso sobre un piso de barro seco. La capa de yeso tiene un espesor de 0,015 m, y para mejorar sus propiedades termoaislantes, se incorporarán planchas de lana de oveja en su interior, con un espesor de 0,05 m. Las características y materiales utilizados se detallan en la Tabla 1. En este contexto, se emplea la ecuación de inercia térmica propuesta por Menconi y Grohmann (2014), que permite medir la capacidad de un material para almacenar y liberar calor. La inercia térmica (I) se calcula mediante la fórmula $I=(k \times \rho \times c)^{1/2}$, donde k es la conductividad térmica, que indica cuán bien el material conduce el calor; ρ es la densidad, que representa la masa por unidad de volumen; y c es la capacidad calorífica específica, que determina la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa en un grado Celsius. Esta fórmula proporciona una herramienta útil para evaluar cómo los materiales empleados en la construcción de la vivienda contribuyen a la regulación térmica interna, destacándose la capacidad aislante de la lana de oveja y del yeso como materiales clave para el aislamiento térmico.

Tabla 1

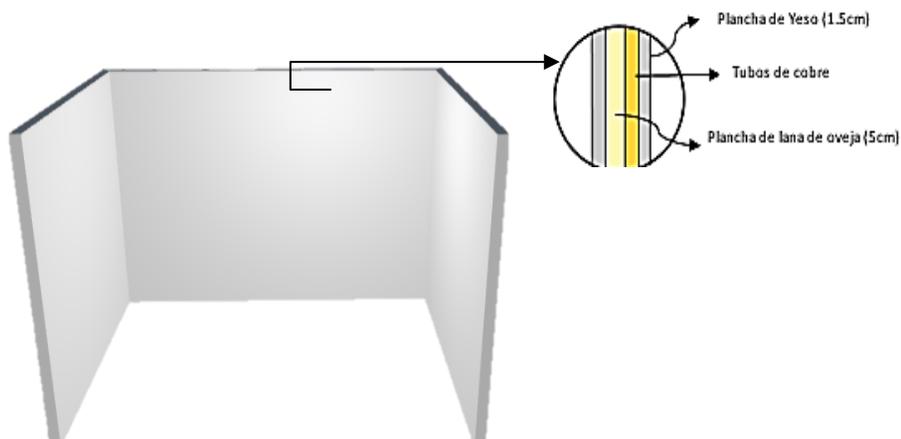
Componentes de la pared del prototipo de vivienda

Material	medida	Espesor (m)	Cond. térmica (W/m ² K)	Fuente
Plancha de yeso	1 x 0.5	0.015	0.25	Park (2014)
Plancha de lana de oveja	1 x 0.5	0.05	0.35 – 0. 50	Pacheco (2016)
Barro	10	-	0.35	Escobar et al., (2018)

Nota. Elección de materiales para la implementación de la pared con aislamiento

Figura 5

Paredes del prototipo de vivienda



Nota. Vista representativa de las paredes del prototipo de vivienda

Sistema de Calefacción

El diseño y construcción de un sistema de calefacción con biomasa residual requiere la selección de materiales adecuados que garanticen eficiencia térmica, resistencia y seguridad durante su funcionamiento. Cada componente debe soportar las condiciones de combustión, transferencia de calor y almacenamiento de biogás. Por ello, en la Tabla 2 se muestran los materiales utilizados para el sistema de calefacción.

Tabla 2

Materiales para el sistema de calefacción

Materiales	Unidad	Cant.
Aceite térmico	L	10
Tanque de Almacenamiento de acero inoxidable de 10 L	L	1
Niples galvanizados de acero inoxidable de ½’’	unidad	3
Tubos de cobre de ½’’	metros	6
Bomba	unidad	1
Válvula Solenoide o bobina	unidad	1
Válvula piloto	unidad	1
Soldadura (equipo)	-	1

Nota. Cantidad de herramienta y equipos utilizados en la elaboración del sistema de calefacción

El sistema de calefacción está diseñado en un circuito cerrado (Figura 6), similar a las instalaciones eléctricas en las paredes, lo que permite acumular una mayor energía térmica en el interior de la vivienda. Esta energía se distribuye a través de un intercambiador de calor en forma de serpentín (Chávez, 2009; Espinoza, 2010). El funcionamiento básico sigue la metodología empleada por Canqueri (2019), en la que el biogás producido por la digestión anaeróbica es transportado por una manguera hacia una válvula solenoide. Esta válvula genera un campo magnético a través de un émbolo interno, lo que permite el paso del gas al desplazarse. A su vez, la válvula solenoide estará conectada a una válvula piloto, la cual se enlaza a la válvula principal mediante conexiones roscadas.

La primera válvula solenoide incorporará un termostato que regulará la apertura o cierre del circuito eléctrico a batería, dependiendo de la temperatura. La segunda válvula piloto servirá como medida de seguridad, controlando el flujo del gas. Una vez que el flujo de gas sea regulado por la válvula solenoide, continuará hasta el tanque de almacenamiento, donde se encontrará el quemador. Este quemador estará ensamblado con la boquilla de la manguera de gas y funcionará mediante un encendedor eléctrico, que generará fuego para calentar el aceite. El aceite caliente será impulsado por una bomba hacia las tuberías de cobre para distribuir el calor.

Figura 6*Paredes del sistema de calefacción y tanque de almacenamiento*

Nota. (a). Bomba con sus válvulas, (b). Salidas del tubo de cobre, (c). Tanque de almacenamiento, (d) hornilla para calentar el aceite.

Además, se compararon las temperaturas de la vivienda prototipo, equipada con materiales termoaislantes como planchas de lana de oveja y yeso, junto con el sistema de calefacción propuesto. Para el contraste, se evaluó una vivienda rural tradicional construida con materiales locales, como paredes de barro y techo de paja. Las mediciones de temperatura se realizaron durante la noche, entre las 18:00 p.m. y las 6:00 a.m., utilizando un termómetro ambiental digital data logger. Una vez registradas las temperaturas de ambas viviendas, con y sin calefacción, los datos sobre las variaciones térmicas fueron recopilados en una PC. Posteriormente, se elaboró un climograma en Excel para comparar ambos tipos de viviendas y analizar el impacto de los materiales termoaislantes en la regulación de la temperatura.

RESULTADOS

Los datos de la temperatura interna promedio de los prototipos de vivienda durante los meses de heladas intensas (junio, julio y agosto) se presentan en la Tabla 3. Estos datos fueron registrados en función de las técnicas de aislamiento utilizadas: el primer prototipo de vivienda no incluyó técnicas de aislamiento y mostró una temperatura interna promedio de 9°C. El segundo prototipo fue evaluado con técnicas de aislamiento (planchas de lana de oveja y planchas de yeso), registrando una temperatura interna promedio de 10.5°C. Finalmente, el tercer prototipo, que incluyó tanto las técnicas de aislamiento mencionadas como el sistema de calefacción propuesto, mostró una temperatura interna.

Tabla 3*Temperaturas diarias del interior de los prototipos de vivienda.*

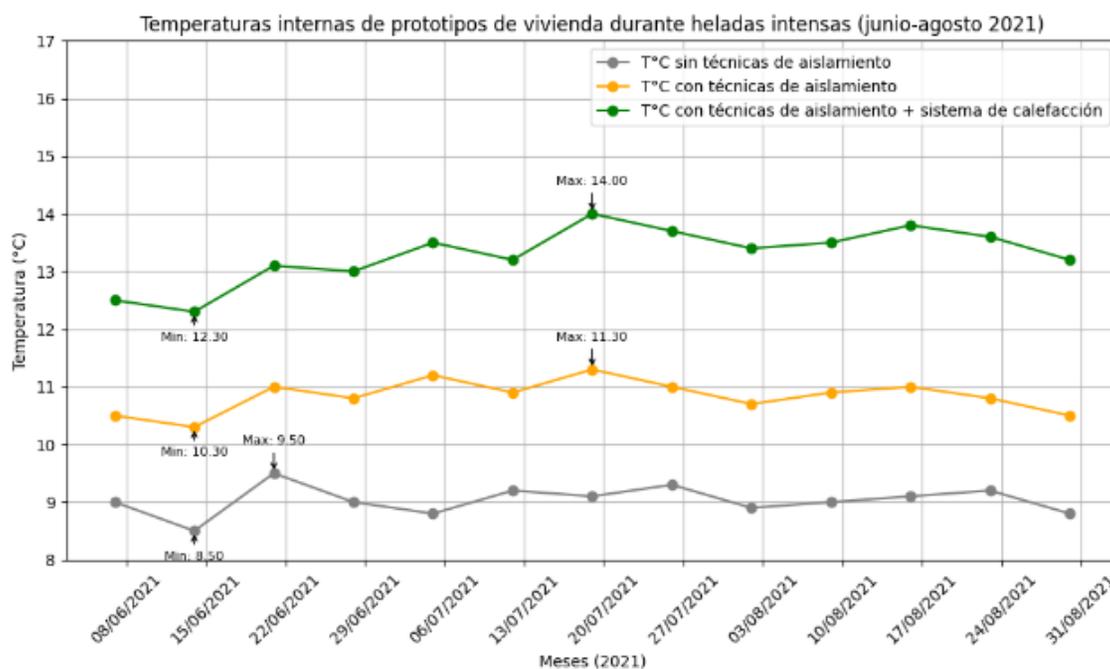
Condición	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Promedio (°C)
Temperaturas (°C) sin técnicas de aislamiento	8.0	10.0	9.0
Temperaturas (°C) con técnicas de aislamiento (plancha de lana de oveja + yeso)	8.5	12.5	10.5
Temperaturas (°C) con técnicas de aislamiento + Sistema de calefacción	10.3	14.4	12.35

Nota: Comparación de temperaturas internas de los prototipos de viviendas

La serie de datos de las temperaturas obtenidas se graficó para un análisis más detallado, permitiendo observar el comportamiento térmico de cada uno de los prototipos de vivienda. En la Figura 8 muestra la frecuencia con la que se midió la temperatura promedio cada siete días, desde el 7 de junio hasta el 30 de agosto de 2021. En la primera vivienda, las temperaturas oscilaron entre un mínimo de 8°C y un máximo de 10°C; en la segunda vivienda, las temperaturas fluctuaron entre 8.5°C y 12.5°C; y en la tercera vivienda se registraron temperaturas mínimas de 10.3°C y máximas de 14.4°C. Como se observa, la tercera etapa de medición muestra un aumento en las temperaturas gracias a la integración de los sistemas de aislamiento y calefacción en conjunto.

Figura 8

Gráfica de las temperaturas promedio día de las tres viviendas prototipo, durante los meses de intensas heladas de junio, julio y agosto de la Comunidad de Chupascunca.



Para un enfoque más preciso, se registraron las temperaturas internas en una noche específica, comparando una vivienda rural con el prototipo de vivienda. Dado el clima de la zona, se realizaron mediciones en horario nocturno para captar las temperaturas más bajas y evaluar el impacto de las técnicas de aislamiento y el sistema de calefacción propuesto. La Tabla 4 muestra las lecturas registradas entre las 18:00 y las 6:00 horas. En la vivienda rural, se observó una temperatura mínima de 2°C a las 2:00 de la mañana y una máxima de 8°C a las 18:00 horas. En el prototipo de vivienda, se registró una temperatura mínima de 10.3°C a las 18:00 horas y una máxima de 14°C a las 6:00 horas. Las temperaturas ambientales también se midieron en el mismo intervalo para comparar con las demás lecturas.

Tabla 4

Registro de las temperaturas medidas durante un día (noche)

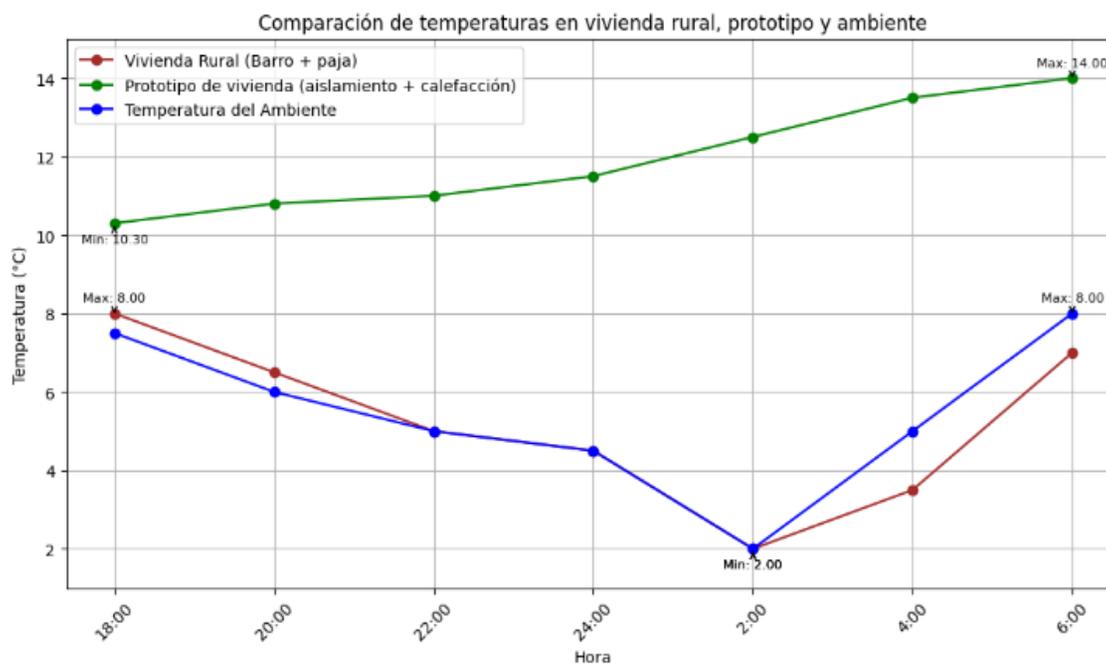
Hora	T °C de la vivienda Rural (Barro + paja)	T °C del prototipo de vivienda (técnicas de aislamiento + Sistema de calefacción)	T °C del Ambiente
18:00	8.0	10.3	7.5
20:00	6.5	10.8	6.0
22:00	5.0	11.0	5.0
24:00	4.5	11.5	4.5
02:00	2.0	12.5	2.0
04:00	3.5	13.5	5.0
06:00	7.0	14.0	8.0

Nota. Comparación de temperaturas promedios durante las 18 a 06 horas del día posterior

En la Figura 9 se muestra el comportamiento de las temperaturas medidas durante la noche. En dos horas, se observa un descenso significativo a las 2:00 de la mañana en las viviendas rurales y en el ambiente circundante de la zona, característico de las heladas de junio a agosto. Como es habitual, las temperaturas mínimas se registran en las horas de la madrugada, cuando el frío es más intenso. Por otro lado, el prototipo de vivienda, que cuenta con técnicas de aislamiento y un sistema de calefacción, muestra un aumento progresivo de la temperatura, con una diferencia de 10.5°C en su punto más bajo, contrarrestando las bajas temperaturas externas gracias a los materiales empleados.

Figura 9

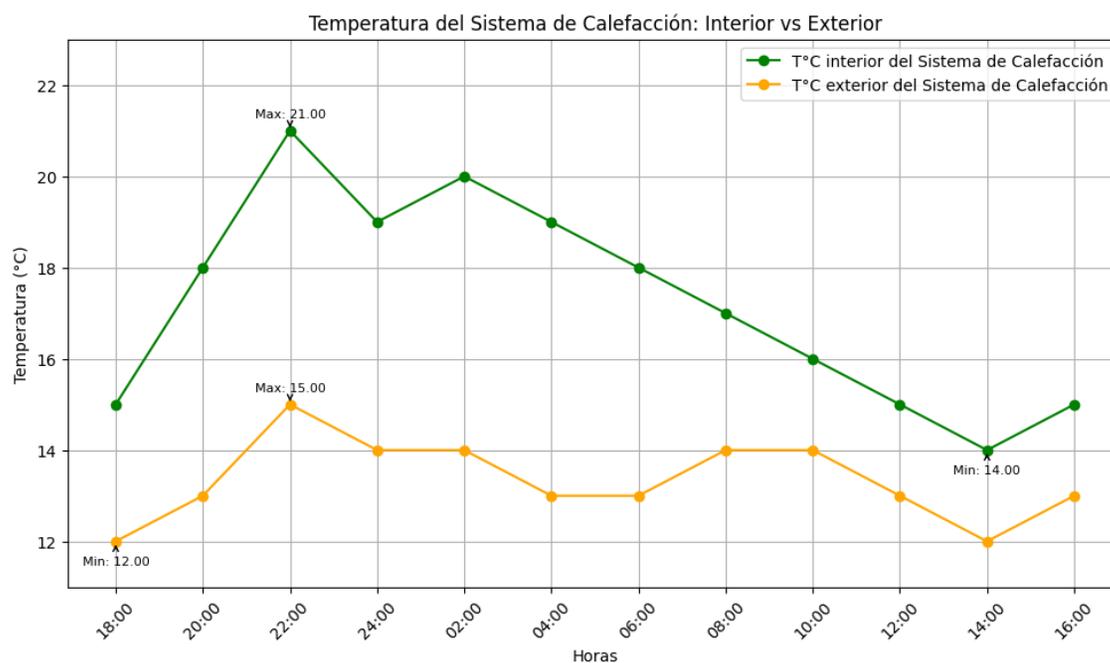
Gráfica de las temperaturas medidas en el prototipo de vivienda y en la vivienda rural durante el horario nocturno.



El sistema de calefacción diseñado en forma de serpentín transfiere calor mediante la convección del fluido (aceite) en su superficie interna, seguido de un proceso de conducción a través del serpentín. La Figura 10 representa las horas del día y de la noche en las que se produce la transferencia de calor desde el serpentín. Las mediciones del sistema de calefacción al interior de la vivienda muestran un pico máximo de 20°C a las 22:00 horas, y una temperatura mínima de 13°C a las 00:00 horas. Por otro lado, las lecturas tomadas en el exterior del sistema de calefacción variaron entre 13 y 16°C, lo que indica que las técnicas de aislamiento concentran y mantienen un confort térmico en el interior de la vivienda.

Figura 10

Gráfica de las temperaturas medidas en el prototipo de vivienda rural durante en el interior y exterior.



DISCUSIÓN

El uso adecuado de materiales de construcción y el diseño eficiente del sistema de calefacción son factores fundamentales para lograr un aislamiento térmico efectivo en viviendas altoandinas, como lo evidencian diversos estudios previos (Escobar et al., 2018; García et al., 2010). En este sentido, los resultados obtenidos en este estudio, específicamente en el prototipo de vivienda con aislamiento (planchas de lana de oveja y planchas de yeso) y sistema de calefacción, reflejan una mejora significativa en el confort térmico comparado con una vivienda rural tradicional (de barro y paja). La Tabla 3 muestra que, mientras que la temperatura interna del prototipo con aislamiento y calefacción alcanzó un promedio de 12.35°C, la vivienda rural sin estas medidas de aislamiento presentó un promedio de solo 9°C. Esta diferencia resalta la efectividad del sistema de aislamiento y calefacción en la mejora de las condiciones

térmicas, un fenómeno que también ha sido documentado en investigaciones previas que subrayan la eficiencia térmica de materiales como la lana de oveja (Escobar et al., 2018).

La mejora en la temperatura interna del prototipo también se refleja en la Figura 9, donde se muestra cómo, durante las noches frías, la vivienda rural experimentó temperaturas mínimas cercanas a los 2°C, lo que es típico en zonas de heladas intensas. En cambio, el prototipo de vivienda mantuvo temperaturas mucho más estables, con un mínimo de 10.3°C a las 18:00 horas y un máximo de 14°C a las 06:00 horas. Esto coincide con las recomendaciones de Gómez et al. (2020), quienes afirman que las temperaturas óptimas para el confort térmico en las viviendas deben oscilar entre los 12.4°C y los 19.8°C. La implementación de las técnicas de aislamiento y calefacción no solo permitió mejorar la temperatura interna, sino también garantizar condiciones más favorables para los habitantes, en comparación con las condiciones extremas de la vivienda rural.

En cuanto al comportamiento del sistema de calefacción, el diseño basado en un serpentín, que transfiere calor por convección y conducción, jugó un papel crucial en mantener la temperatura interna confortable, incluso durante la noche. Como se muestra en la Figura 10, las mediciones del sistema de calefacción indicaron que la temperatura interna alcanzó un máximo de 20°C a las 22:00 horas y descendió a 13°C a la medianoche. Esto demuestra la efectividad del sistema de calefacción para mantener un ambiente térmico adecuado en la vivienda, incluso cuando las temperaturas exteriores caen a niveles cercanos a los 2°C, como ocurre en la vivienda rural.

El contraste entre los dos tipos de viviendas también evidencia la importancia de combinar el aislamiento térmico con un sistema de calefacción sostenible (SCS), es eficiente para enfrentar las heladas intensas típicas de las regiones altoandinas. Estos resultados corroboran lo planteado por Taylor et al. (2008), quienes afirman que el comportamiento térmico de una vivienda depende de la selección adecuada de materiales de construcción y sistemas de calefacción. En nuestro caso, la mejora significativa en la temperatura interna del prototipo con aislamiento y calefacción valida la eficacia de estas soluciones en el contexto de viviendas rurales expuestas a condiciones climáticas extremas.

Finalmente, en cuanto a la viabilidad económica de los sistemas propuestos, los hallazgos están en línea con los realizados por Park. S (2014), quien destaca que las tecnologías basadas en biomasa, como el estiércol de ganado, son económicamente viables para la producción de energía. En este contexto, la implementación de un sistema de calefacción utilizando biomasa residual no solo mejora la eficiencia energética y el confort térmico, sino que también promueve la sostenibilidad ambiental al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Siendo una buena alternativa este tipo de tecnologías en

regiones altoandinas, donde las condiciones climáticas extremas y la disponibilidad de biomasa ganadera son beneficiosas.

CONCLUSIONES

Se llevó a cabo un estudio sobre el comportamiento térmico de dos prototipos de vivienda en la Comunidad de Chupascunca. Los resultados demuestran que los materiales termoaislantes son efectivos y viables para mantener el confort térmico, usando técnicas constructivas como planchas de lana de oveja y planchas de yeso, junto con un sistema de calefacción. Estos materiales presentan una capacidad adecuada para almacenar energía, lo que se refleja en el aumento de temperatura registrado, con un incremento de 4.1°C, pasando de una temperatura mínima interior de 10.3°C a 14.4°C. Además, la hermeticidad de la vivienda resulta fundamental, ya que permite un aumento de la temperatura interna de hasta un 60% durante las horas nocturnas, lo que asegura un confort térmico óptimo para los habitantes. Como limitaciones del estudio, se destaca la necesidad de evaluar el comportamiento térmico en una temporada de verano, para analizar el impacto de temperaturas elevadas y radiación solar, y determinar si estos materiales mantienen su efectividad y confort térmico en las diferentes estaciones del año, considerando las características particulares del lugar de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, J., Martínez, S. y Numpaqué, H. (2016). Efecto de la Temperatura en la Producción de Biogás en un Bioreactor tipo Batch a través de la Descomposición Anaeróbica de Residuos Sólidos Orgánicos. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 3(1).
- Camargo, N. y Williams, D. (2012). Uso de los residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el Departamento del Meta. *Tecnura*, 16(34), 142–156. <https://www.redalyc.org/pdf/2570/257024712012.pdf>
- Canqueri, A. (2019). *Diseño de un sistema de riego por aspersión automatizado y controlado para el centro poblado de Huitaca Sencca*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional UNAP. <http://tesis.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/11145>
- Castillo, E., Cristancho, D. y Arellano, V. (2003). Estudio de las condiciones de operación para la digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 2, 11-22. <https://www.redalyc.org/pdf/776/77650202.pdf>
- Chávez, G. (2009). *Almacenamiento de energía solar térmica para diferentes aplicaciones*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Agustín].
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (2022). Escenario de riesgo por bajas temperaturas según el pronóstico para julio-setiembre. <https://goo.su/ETDC6v>

- Cerrón, A. (2022). Sistemas de calefacción pasiva para lograr el confort térmico en viviendas altoandinas de Perú. *Cátedra Villarreal*, 10(1), 87–99. <https://doi.org/10.24039/cv20221011379>
- Duque, C., Galeano, C. y Mantilla, J. (2007). Diseño y estudio económico preliminar de una planta productora de biogás utilizando residuos orgánicos de ganado vacío. *Ingeniería e Investigación*, 27 (3), 133-142. <https://www.redalyc.org/pdf/643/64327316.pdf>
- Espinoza, C. (2010). *Sistema de calefacción solar para reducir el friaje en viviendas altoandinas*. [Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio UNCP. <https://n9.cl/od9i1>
- Escobar, K., Holguino, A. y Olivera, L. (2018). Confort térmico en una habitación de adobe con sistema de almacenamiento de calor en los Andes del Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20(3), 289–300. <https://dx.doi.org/10.18271/ria.2018.394>
- García, A., Oliver, A. y Neila, J. (2010). Caracterización térmica de placas de yeso con material de cambio de fase incorporado. *Informes de la Construcción*, 62(519), 55-66. <https://doi.org/10.3989/ic.09.036>
- Gómez, M., et al. (2020). 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*, 31(2), 173-186. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000200173>.
- Gamarra, A., Quiroz, R., & Vilca, P. (2021). Aplicación de técnicas de calefacción pasiva en viviendas altoandinas para enfrentar el cambio climático. *Revista Peruana de Arquitectura Sostenible*, 9(2), 115-128.
- Giraldo, Y. y Ortiz, M. (2018). *Producción de biogás a partir de la codigestión de biomasa residual en un sistema de digestión anaerobia con agitación a escala laboratorio*. [Tesis de pregrado, Universidad de América Bogotá]. Repositorio Institucional UAMÉRICA. <https://n9.cl/qjy0e>
- Horn, M. y Molina, J. (2016). *Evaluación sistemática del desempeño térmico de un módulo experimental de vivienda altoandina para lograr el confort térmico con energía solar*. [Simposio Peruano de Energía Solar y Del Ambiente XXIII-SPES]. <http://repositorio.uni.pe/handle/uni/14755>.
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2024). INDECI recomienda medidas de preparación ante bajas temperaturas. <https://goo.su/Vw7AvqX>
- Menconi, M. E., & Grohmann, D. (2014). Model integrated of life-cycle costing and dynamic thermal simulation (MILD) to evaluate roof insulation materials for existing livestock buildings. *Energy and Buildings*, 81, 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.004>
- Moncloa, C. (2018). Un sistema aislante para la vivienda Altoandina fabricado con materiales reciclados. *Módulo Arquitectura*, 18(1), 73–90. <https://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.18.1.2017.04>.

- Ministerio de Salud (2016). *Plan de Prevención y Reducción del riesgo de desastres del Ministerio de Salud ante la temporada de las bajas temperaturas, 2016 - 2017*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/399838/PLAN-BT-2016-2017.pdf>
- Núñez, W. (2012). Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta. *Tecnura*, 16 (34), 142-156. <https://www.redalyc.org/pdf/2570/257024712012.pdf>
- Navarro, M., y Rojas, P. (2018). Uso de materiales locales en la construcción de viviendas para zonas frías en la sierra del Perú: una alternativa sostenible. *Revista de Ingeniería y Desarrollo Sostenible*, 5(1), 35-46.
- Pacheco, S. (2016). *Construcción y evaluación de un digestor anaerobio para la producción de biogás a partir de residuos de alimentos y poda a escala banco*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56095>
- Park, S. (2014). Análisis energético BES de una planta combinada de calor y electricidad que utiliza estiércol de ganado con su análisis económico.
- Paucar, L. y Quispe, M. (2015). *Producción y evaluación de la calidad del biogás y biol en un biodigestor usando estiércol de la codorniz de la granja Velebit S.A.C ubicado en el distrito Lurigancho Chosica*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio UNALM. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/5f76e2a0-c2a6-49db-9b7c-44c90fb1bfce>
- Romero, A. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica*, 104(2), 331-345.
- Santa, R. (2008). La iniciativa de vivienda saludable en el Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 25(4), 419-430. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342008000400013&lng=es&tlng=es.
- Taylor, P., Fuller, R. y Luther, M. (2008). Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building. *Energy and buildings*, 40(5), 793-800. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778807001715>
- Umán, S. (2019). Estrategias de climatización pasiva y confort térmico en la vivienda de adobe en la zona rural de Anta-Cusco, 2017. [Tesis de Maestría, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Universidad Ricardo Palma. <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2860>