

EVALUACIÓN DE MODELOS DE CONFORT TÉRMICO EN ZONAS RURALES DE GRAN ALTITUD DE LOS ANDES PERUANOS

EVALUATING THERMAL COMFORT MODELS IN HIGH-ALTITUDE RURAL AREAS OF THE PERUVIAN ANDES

AVALIAÇÃO DE MODELOS DE CONFORTO TÉRMICO EM ÁREAS RURAIS DE GRANDE ALTITUDE DOS ANDES PERUANOS

Enrique Mejía-Solis

Master in Innovation and Technology Management and Policy
 Lecturer- Researcher Rural Sector Support Group
 Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-5512-1286>
enrique.mejia@pucp.edu.pe

Judith Hernández-Rodríguez

Bachelor in Anthropology
 Community Relations Specialist, Swiss Cooperation Program,
 Subnational GFP, Cusco, Perú
<https://orcid.org/0009-0003-3465-263X>
judith.hernandez@gfpsubnacional.pe

Jorge Soria-Navarro

Bachelor in Mechanical Engineering
 Technology Manager
 Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0001-9679-3372>
jsorian@pucp.pe

Víctor Ramos-Abensur

Bachelor in Mechanical Engineering
 Researcher/Project Designer, Rural Sector Support Group,
 Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-4120-7097>
victor.ramosa@pucp.edu.pe

Briggith Lujan-Chumbiray

Bachelor in Public Management
 Independent Researcher
 Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú
<https://orcid.org/0009-0005-3588-391X>
alison.lujan@pucp.edu.pe

Rodrigo Alegría-Quijada

Bachelor in Psychology
 Independent Researcher
 Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-7047-0716>
rodrigo.alegria@pucp.edu.pe

Miriam Ancco-Peralta

Bachelor in Architecture
 Independent Researcher
 Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú
<https://orcid.org/0009-0004-2446-4253>
151096@unsaac.edu.pe

Lizbeth Peñafiel-Yupanqui

Bachelor in Architecture
 Independent Researcher
 Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú
<https://orcid.org/0009-0004-8378-7749>
181764@unsaac.edu.pe

Silvia Onnis

Master in Architecture
 Full-time Teacher, Department of Architecture
 Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0003-0066-9495>
sonnis@pucp.edu.pe

Martin Wieser

Doctor in Energy and Environment in Architecture
 Teacher-researcher, Department of Architecture
 Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-4556-3507>
mwieser@pucp.edu.pe



RESUMEN

Los ambientes interiores fríos en las viviendas rurales de los Andes generan preocupaciones sobre el confort térmico, pero la aplicabilidad de los modelos existentes a estos contextos sigue siendo poco examinada. Este estudio comparó las predicciones de cinco modelos de confort térmico, incluidos PMV, aPMV y enfoques regionales, con datos obtenidos en terreno. La información se recopiló de 154 residentes de Langui (3,969 m s. n. m.) mediante encuestas culturalmente adaptadas y mediciones ambientales. El modelo aPMV mostró la mayor concordancia con los votos de sensación térmica, alcanzando un 58,4 % de precisión (± 1 categoría) y permitiendo definir un rango de confort entre 14 °C y 25 °C. Los resultados resaltan la necesidad de criterios de diseño locales que aborden las condiciones de frío interior en las viviendas andinas.

Palabras clave

viviendas rurales, viviendas de montaña, viviendas sociales, condiciones de habitabilidad

ABSTRACT

Cold indoor environments in rural Andean housing raise concerns about thermal comfort, yet the applicability of existing comfort models to these contexts remains insufficiently examined. This study has compared predictions from five thermal comfort models, including PMV, aPMV, and regional approaches, against field data. Data were collected from 154 residents of Langui (3,969 m.a.s.l.) through culturally adapted surveys and environmental measurements. The aPMV model showed the highest agreement with thermal sensation votes, achieving 58.4% accuracy (± 1 category), and enabled the definition of a comfort range between 14 °C and 25 °C. The results emphasize the need for local design criteria that address cold indoor conditions in Andean housing.

Keywords

rural housing, mountain housing, social housing, habitability conditions

RESUMO

Os ambientes internos frios nas habitações rurais andinas suscitam preocupações quanto ao conforto térmico, mas a aplicabilidade dos modelos de conforto existentes a esses contextos ainda não foi suficientemente examinada. Este estudo comparou as previsões de cinco modelos de conforto térmico, incluindo PMV, aPMV e abordagens regionais, com dados de campo. Os dados foram coletados de 154 residentes de Langui (3.969 m.a.n.m.) por meio de questionários culturalmente adaptados e medições ambientais. O modelo aPMV apresentou a maior concordância com as avaliações de sensação térmica, alcançando 58,4% de precisão (± 1 categoria), e permitiu definir uma faixa de conforto entre 14 °C e 25 °C. Os resultados enfatizam a necessidade de critérios de projeto locais que abordem as condições de frio interno nas habitações andinas.

Palavras-chave

habitação rural, habitação de montanha, habitação de interesse social, condições de habitabilidade

INTRODUCCIÓN

Las regiones andinas de gran altitud presentan distintos desafíos para el confort térmico debido a las bajas temperaturas, las grandes fluctuaciones térmicas diurnas y la calidad limitada de la vivienda (Molina et al., 2023). En comunidades como Langui (Cusco, Perú), el frío persistente en interiores afecta el bienestar y aumenta los riesgos respiratorios, en particular entre los adultos mayores (Canales Gutiérrez et al., 2021). Aunque los residentes demuestran una fuerte adaptación cultural y de comportamiento, como usar ropa gruesa, estas estrategias a menudo no logran mitigar las molestias durante las noches de invierno (Massler, 2004). La calidad ambiental interior es especialmente problemática en los hogares rurales de bajos ingresos, donde los materiales de construcción inadecuados, el aislamiento mínimo y el uso de combustibles de biomasa amplifican la exposición a las bajas temperaturas y la contaminación. (Subri et al., 2024). A pesar de estos riesgos, los modelos de confort térmico más utilizados, en particular el Voto Medio Predictivo (PMV, por su sigla en inglés), se desarrollaron en condiciones de laboratorio controladas en entornos urbanos templados (Fanger, 1972), lo que limita su relevancia en entornos rurales de gran altitud.

La investigación sobre el confort adaptativo ha demostrado que los ocupantes de edificios con ventilación natural aceptan un rango de temperatura más amplio, estrechamente relacionado con las condiciones exteriores y con el historial térmico reciente (De Dear y Brager, 2002; Humphreys et al., 2013). Esta divergencia respecto de los modelos de laboratorio se ha informado en otras regiones de gran altitud. Por ejemplo, se han documentado temperaturas de confort que oscilan entre 10 °C y 23 °C en la meseta tibetana (Yu et al., 2017), mientras que los estudios en los asentamientos del Himalaya informan temperaturas neutras cercanas a 10,7 °C (Rijal, 2021; Thapa, 2020). Estos contextos están moldeados por la vestimenta tradicional gruesa (hasta 2,67 clo) y por las dietas altas en calorías (Rijal, 2021; Thapa, 2020; Yu et al., 2017; Zhao et al., 2023). En conjunto, estos hallazgos respaldan el uso de modelos adaptativos, como el modelo de Confort Térmico Adaptativo (ATC, por su sigla en inglés) (Nicol et al., 2012) y el Voto Medio Predictivo Adaptativo (aPMV, por su sigla en inglés) (Yao et al., 2009), los cuales incorporan adaptación conductual y fisiológica.

Sin embargo, en los Andes, muy pocos estudios in situ han examinado las respuestas de confort ni han evaluado el desempeño de los modelos de confort existentes en condiciones de gran altitud (Molina et al., 2023; Pari-Quispe et al., 2024). Estudios recientes en el altiplano peruano ilustran una variabilidad sustancial en las temperaturas neutras, que oscilan entre 12,4 °C (Molina et al., 2023) en Imata y 21,98 °C en el lago Titicaca (Pari-Quispe et al., 2024), lo que destaca la influencia del clima local, las características de la vivienda y las prácticas culturales. Si bien los proyectos experimentales sobre calentamiento pasivo y mejoras de la envolvente son prometedores (Aza-Medina et al., 2025; Mejía-Solís et al., 2023; Wieser et al., 2021; Yang et al., 2025), el progreso está limitado por la ausencia de criterios de comodidad validados localmente. Sin estos puntos de referencia, es difícil

definir objetivos de desempeño u orientar intervenciones en viviendas rentables.

Este estudio tiene como objetivo (1) evaluar la precisión predictiva de cinco modelos de confort en Langui y (2) definir un rango de temperatura de confort localizado para respaldar las pautas de diseño de viviendas rurales de gran altitud. Para lograr esto, se realizó un estudio in situ integral utilizando una encuesta adaptada culturalmente en español y quechua, combinada con mediciones simultáneas en interiores. El análisis compara PMVP, aPMV y ATC, así como dos modelos regionales, con los Votos de Sensación Térmica (TSV, por su sigla en inglés) de los residentes, y examina las características demográficas y de la vivienda que influyen en la percepción térmica.

Es necesaria una breve descripción del contexto del estudio para contextualizar estos hallazgos. Idioma (14°25'57"S 71°16'22"W), ubicado a 3.969 msnm en la región de Cusco, presenta un clima altiplánico subtropical, con inviernos secos y veranos moderados, y experimenta oscilaciones diarias sustanciales de temperatura.

Es necesaria una breve descripción del contexto del estudio para situar estos hallazgos. La Figura 1 muestra la configuración de gran altitud de Langui y su entorno construido. El distrito (14°25'57"S 71°16'22"W; 3.969 msnm) tiene un clima subtropical de tierras altas, con inviernos secos y veranos moderados, lo que determina la exposición térmica diaria de los residentes. La economía del distrito es agraria y la mayoría de los residentes son agricultores de subsistencia de habla quechua que dependen de viviendas de bajo rendimiento térmico. La Figura 2 muestra ejemplos de las principales tipologías de viviendas, típicamente construidas con un aislamiento mínimo y poca hermeticidad, lo que a menudo se traduce en ambientes interiores fríos. Los programas recientes de vivienda social han introducido techos metálicos aislados y materiales mejorados, pero persisten los desafíos del confort térmico (Mejía-Solís et al., 2023).

MÉTODOS

Este estudio empleó un enfoque metodológico integrado que combina datos subjetivos de percepción térmica con mediciones ambientales objetivas. Se utilizó una encuesta culturalmente adaptada, administrada en español y quechua, para recopilar información sobre la sensación térmica, los comportamientos adaptativos, las rutinas diarias y las características de la vivienda. Los parámetros ambientales interiores se midieron simultáneamente con cada entrevista siguiendo las pautas del Estándar 55 de ASHRAE, mientras que una estación meteorológica registró las condiciones climáticas exteriores durante todo el período de estudio. Estos datos se utilizaron para analizar la influencia de las características demográficas y de construcción sobre el confort térmico y para evaluar el desempeño predictivo de cinco modelos de confort térmico existentes, incluidos estándares internacionales, modelos calibrados localmente y modelos adaptativos regionales.



(a)



(b)

Figura 1. Entorno de gran altitud de Langui: (a) Vista panorámica y (b) plaza del pueblo. Fuente: Elaborado por los autores.



Figura 2. Tipologías de vivienda en Langui: (a) vivienda de un piso; (b) vivienda de dos pisos; (c) y (d) unidades de vivienda social; (e) hogar multivolumen. Fuente: Elaborado por los autores.

ENCUESTA

La encuesta se basó en el instrumento del Estándar 55 de ASHRAE, pero fue adaptada culturalmente para garantizar la claridad lingüística y conceptual de los residentes de Langui. El proceso de adaptación incluyó seis asambleas comunitarias y seis talleres realizados en español y quechua, que ayudaron a identificar malentendidos relacionados con términos técnicos como humedad relativa, velocidad del aire y confort térmico.

Algunos conceptos no pudieron traducirse de manera confiable, lo que llevó a eliminar preguntas sobre la velocidad del aire interior, la percepción de la humedad relativa y la comodidad categórica (“cómodo/incómodo”). Se mantuvo la escala ASHRAE de sensación térmica de siete puntos y se registró el Voto de Sensación Térmica (TSV) utilizando sus categorías estándar.

La encuesta final recopiló información demográfica, de percepción térmica, de comportamientos adaptativos, de rutinas diarias y de características de la vivienda. Las encuestas se realizaron entre el 23 de julio y el 10 de agosto de 2023, y los entrevistadores fueron capacitados para explicar conceptos desconocidos tanto en español como en quechua, a fin de garantizar una recopilación de datos coherente.

Este estudio fue revisado y aprobado por el Comité de Ética en Investigación en Ciencias Sociales, Humanidades y Artes de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), con el número de aprobación 048-2023-CEI-CCSSHHYAA / PUCP (6 de julio de 2023). Todos los participantes dieron su consentimiento informado. Se utilizó el consentimiento verbal, documentado mediante grabaciones de audio, en lugar del consentimiento por escrito, para adaptarse a las prácticas culturales, a los diferentes niveles de alfabetización y al contexto bilingüe (español y quechua). Este procedimiento garantizó una comprensión clara y la comodidad de los participantes y fue aprobado explícitamente por el comité de ética.

MUESTRA

El conjunto de datos final consistió en 154 entrevistas válidas de un total inicial de 160. Los participantes fueron seleccionados por las autoridades locales como requisito previo para realizar el trabajo in situ en el área. Si bien esto facilitó la participación de la comunidad, es posible que la muestra resultante no represente plenamente a la población más amplia de Langui. La muestra válida estuvo conformada por 91 mujeres y 63 hombres, con edades promedio de 54,7 y 60,9 años, respectivamente (Figura 3).

La mayoría de los encuestados vivían en viviendas de adobe de un piso, con techos de metal corrugado y pisos de tierra, y los techos se encontraban únicamente en parte del parque de viviendas. El aislamiento era escaso y ninguna de las viviendas encuestadas tenía sistemas de calefacción ni de aire acondicionado. La participación en vivienda pública fue limitada (n = 20, 13 %).

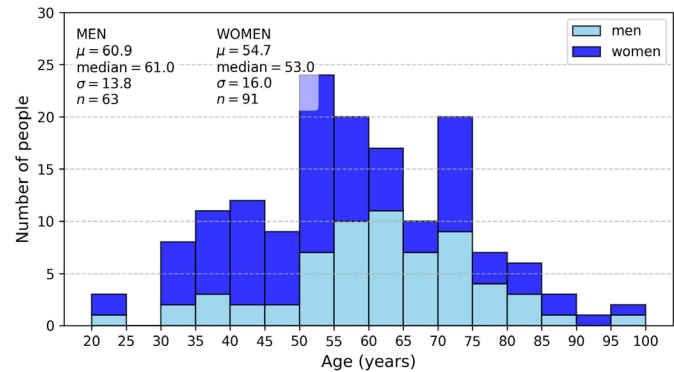


Figura 3. Distribución por edad y sexo de los entrevistados. Fuente: Elaborado por los autores.

Tabla 1. Especificaciones de los instrumentos utilizados para el monitoreo ambiental. Fuente: Elaborado por los autores.

Parámetro	Instrumento	Rango	Precisión
Temperatura del aire interior	Medidor WBGT de Estrés Térmico Extech HT200	0 - 50°C	±0.8°C
Humedad relativa del aire interior	Medidor WBGT de Estrés Térmico Extech HT200	1 - 99%	±3%
Temperatura del globo	Medidor WBGT de Estrés Térmico Extech HT200	0 - 80°C	±0.6°C
Velocidad del aire	Anemómetro de hilo caliente Testo 425	0 - 20m/s	±0,03m/s
Radiación solar	Sensor inteligente ONSET S-LIB-M003	0 - 1280 W/m ²	±10W/m ²
Temperatura del aire exterior	ONSET S-THC-M002	-40°C - 75°C	±0,20°C
Humedad relativa del aire exterior	ONSET S-THC-M002	0 - 100%	±2,5%
Velocidad del viento	ONSET S-WCF-M003	de 0 a 76 m/s	±1,1 m/s
Registrador de datos	Estación de monitoreo remoto HOBO RX3004	-	-

MEDICIONES IN SITU

Las condiciones climáticas exteriores se monitorearon durante todo el período de la encuesta mediante una estación meteorológica que registró la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad y la dirección del viento, y la radiación solar, a intervalos de 15 minutos (Tabla 1). El sensor de radiación solar presentaba lagunas de datos intermitentes (Figura 4).

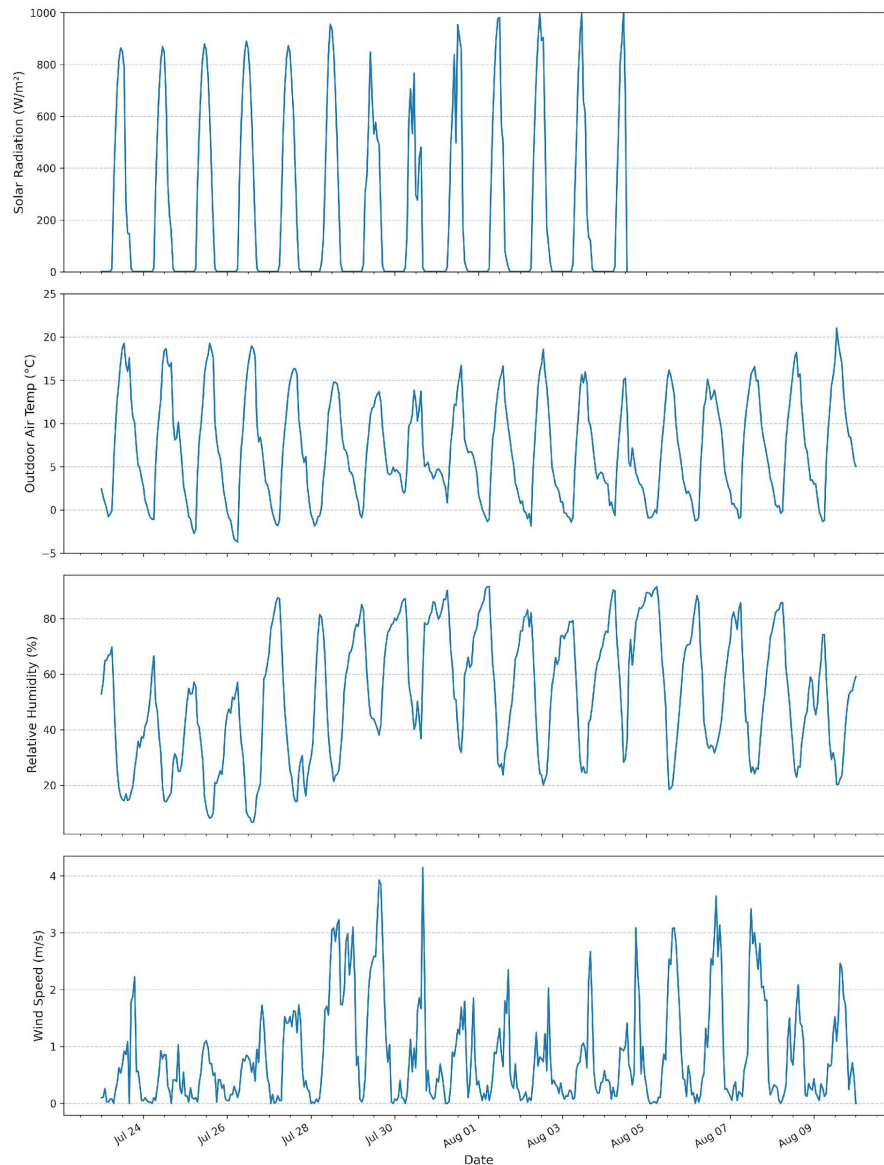


Figura 4. Datos meteorológicos horarios en Langui durante las encuestas. Fuente: Elaborado por los autores.

Las mediciones ambientales interiores se realizaron junto con cada entrevista siguiendo las pautas del Estándar 55 de ASHRAE. La temperatura del aire interior ($T_{a,i}$), la temperatura del globo ($T_{g,i}$), la humedad relativa y la velocidad del aire se registraron con instrumentos portátiles colocados aproximadamente a 1 metro por encima del piso para reflejar la postura sentada del participante. Antes de cada entrevista, los participantes permanecieron sentados durante 15 minutos para permitir que las condiciones térmicas se estabilizaran. Los valores de aislamiento de la ropa se asignaron utilizando tablas de referencia estándar, con estimaciones razonables aplicadas a prendas tradicionales no documentadas en la literatura existente.

Análisis estadístico de métricas de confort térmico y comportamientos adaptativos

El análisis estadístico fue diseñado para cuantificar la influencia de las características demográficas (sexo, edad) y de construcción en dos indicadores primarios de confort

térmico: el Voto Medio de Sensación Térmica (TSV), y la temperatura neutra media (T_n). TSV se obtuvo directamente de las respuestas de los participantes en la escala ASHRAE de 7 puntos. T_n , que representa la temperatura operativa a la que TSV es cero, se calculó utilizando el método Griffiths [19]:

$$\bar{T}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^j \left(T_{g,i} - \frac{TSV_i}{a} \right) \quad (1)$$

donde

- $T_{g,i}$: temperatura del globo para el tema.
- TSV_i : Voto de Sensación Térmica para el tema.
- a : coeficiente de regresión igual a 0,5.
- j : número de sujetos en el subgrupo.

Se eligió un valor de $a = 0,5$ debido a su uso generalizado en la investigación sobre el confort adaptativo (Humphreys et al., 2010). Aunque otros estudios han empleado valores distintos o los han calculado empíricamente, la suposición

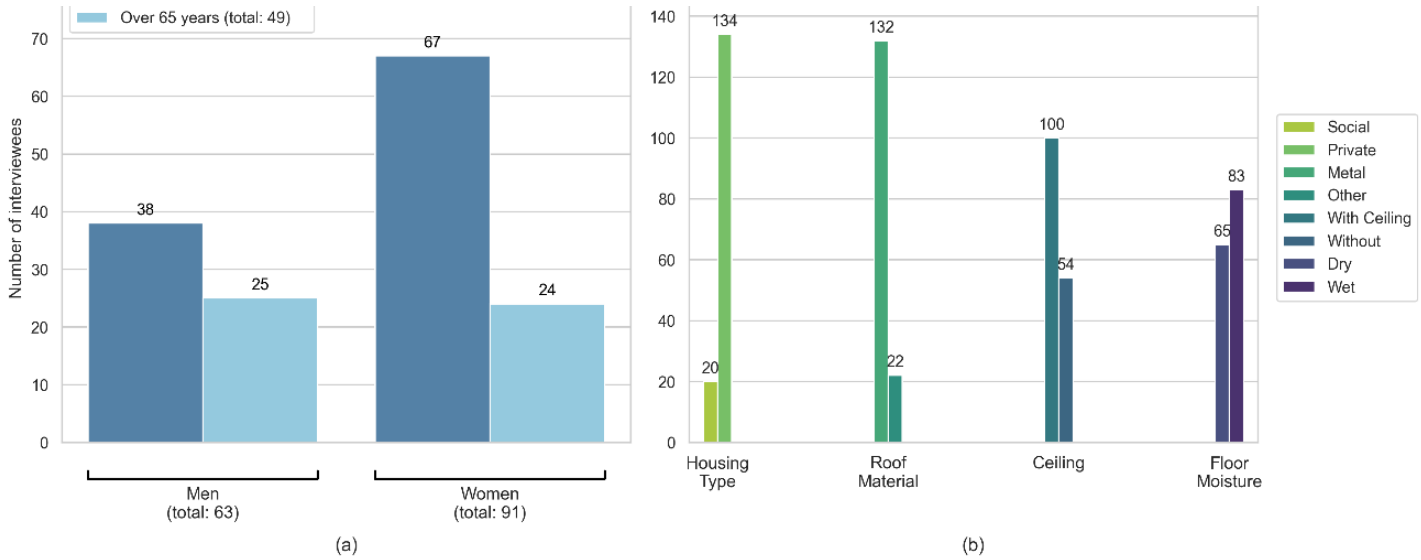


Figura 5. Distribución de los entrevistados según (a) sexo y edad, y (b) características del edificio. Fuente: Elaborado por los autores.

de que un cambio de 2 °C en la temperatura operativa equivale a una unidad en TSV proporciona una aproximación razonable para estudios in situ como este.

Los efectos demográficos se evaluaron mediante pruebas basadas en la varianza, apropiadas para tamaños de muestra desiguales (Figura 5). Las características del edificio se evaluaron mediante comparaciones predefinidas por pares (Figura 5). Se verificaron los posibles desequilibrios demográficos para evitar efectos de confusión: se utilizó una prueba t de Welch para comparar la edad media de los ocupantes y una prueba de independencia de chi cuadrado para comparar la distribución por sexos.

Los comportamientos adaptativos se resumieron de manera descriptiva para contextualizar los indicadores cuantitativos de comodidad.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DE CONFORT TÉRMICO

El objetivo principal de este análisis fue evaluar la precisión de cinco modelos de confort térmico para predecir la TSV en la población encuestada. Se incluyeron como referencia el modelo PMV, dos modelos calibrados localmente: aPMV y ATC, y dos modelos desarrollados a partir de estudios in situ en el altiplano peruano. El TSV previsto (TSV) utilizando el modelo PMV (TSV_{PMV}) se calculó para cada participante. El PMV se incluyó como punto de referencia debido a su uso generalizado en la investigación del confort térmico, a pesar de las limitaciones bien documentadas en edificios con grandes fluctuaciones de temperatura interior y sin acondicionamiento mecánico, donde los modelos adaptativos, como el ATC, generalmente proporcionan predicciones más precisas (Nicol et al., 2012).

TSV usando aPMV, que refina los cálculos de PMV incorporando un coeficiente adaptativo (λ) tomado de estudios in situ, fue:

$$\widehat{TSV}_{aPMV} = aPMV = \frac{PMV}{1 + \lambda \times PMV} \quad (2)$$

donde λ se calculó como:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n (TSV - PMV)}{n} \quad (3)$$

donde

n: número de entrevistados [-]

TSV a partir del modelo ATC calculado con nuestros datos se obtuvo:

$$\widehat{TSV}_{ATC} = a \times (T_g - T_n) \quad (4)$$

donde a y T_n se definieron en la Ec. (1).

El primer modelo de confort adaptativo, basado en encuestas realizadas en los Andes peruanos, fue desarrollado por Molina et al. (2023). Usó una escala de sensación térmica de cinco puntos donde es una función de la temperatura exterior media mensual (T_m):

$$T_{n,Molina} = 0.5T_m + 11.8 \quad (5)$$

Para definir TSV_{Molina} en la escala estándar de siete puntos, se calculó T_m usando la temperatura del aire exterior registrada en los 30 días anteriores al día de la encuesta. Este T_m , específico para los participantes, luego se usó para calcular el correspondiente $T_{n,Molina}$ para Langui ($T_{n,Molina,Langui}$). La distribución de fue de 7,3°C (CI del 95% -: 7,3 - 7,3°C;

SD= 0,1 °C). Aplicando una sensibilidad de 0,5 unidades de escala por grado Celsius, TSV_{Molina} se calculó como:

$$\widehat{TSV}_{Molina} = 0.5 \times (T_g - T_{n,Molina,Langui}) \quad (6)$$

El segundo punto de referencia regional fue el de Pari-Quispe et al. (2024). Emplearon la escala de siete puntos e informaron un para el período invernal de 21,98 °C, determinado mediante el método de Griffiths con un coeficiente de 0,50. $TSV_{Pari-Quispe}$ se definió como:

$$\widehat{TSV}_{Pari-Quispe} = 0.5 \times (T_g - 21.8) \quad (7)$$

Se calcularon las siguientes métricas para evaluar cada modelo.

- Error absoluto medio (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (8)$$

donde

N : número total de observaciones,
 Y_i : i TSV observado,
 \hat{Y}_i : i: TSV previsto.

- Error cuadrático medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (9)$$

- Precisión de clasificación:

$$Accuracy(\delta) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \mathbb{I}|y_i - \hat{y}_i| \leq \delta \quad (10)$$

donde

δ : tolerancia utilizada para determinar qué tan cercanas fueron las predicciones al TSV observado,
 \mathbb{I} : función indicadora, que es igual a 1 si la condición es verdadera y a 0 en caso contrario.

La precisión se evaluó en tres niveles de tolerancia: coincidencias exactas ($\delta=0$), predicciones dentro de $\pm 0,5$ unidades de escala ($\delta=0,5$), y aquellos dentro de $\pm 1,0$ unidades de escala ($\delta=1.0$).

- Sesgo:

$$Bias_i = \hat{y}_i - y_i \quad (11)$$

Luego, se examinó la distribución de estos valores de sesgo, calculando el sesgo mediano y el Rango intercuartílico (IQR) para evaluar la tendencia central y la propagación de los errores.

Finalmente, para comprender cómo cambia la precisión del modelo con las condiciones térmicas, los datos de la encuesta se agruparon en grupos de 2 °C en función de lo medido . Para cada grupo, el Sesgo Medio (MB), MAE y Precisión de Clasificación (a) se calcularon y representaron frente a para visualizar el rendimiento en un rango de entornos, desde los más fríos hasta los más cálidos. Para garantizar la estabilidad y la confiabilidad de este análisis agrupado, solo se incluyeron grupos con cinco o más encuestas.

RESULTADOS

El promediado de 16,8 °C (ICI de 95%: 16,3-17,2; SD = 2,9), en todas las viviendas encuestadas, con valores que oscilan entre 9,8 °C y 27,3 °C (Figura 6). coincidió de forma cercana con , mostrando una fuerte asociación lineal (= 0,96). Por el contrario, la relación entre y era débil (= 0,27), aunque permaneció generalmente más alto.

El (TSV) observado reflejó que la mayoría de los participantes (n=111, 72%) en la región de confort (ligeramente frío, neutro o ligeramente cálido), y una porción notable experimentó molestias por frío (fresco o frío; n=39, 25%) (Figura 7a). Los informes de molestias nocturnas en los tres meses anteriores fueron comunes: el 83% de los encuestados informó sentirse fríos por la noche y solo el 14% informó sentirse cómodos. La relación entre TSV y fue débil, con una regresión lineal que produjo =0,05 (Figura 7b).

Los subgrupos demográficos no revelaron diferencias estadísticamente significativas según la edad ni el sexo. Cada subgrupo agrupado alrededor de la muestra general de 18,2 °C (CI de 95%: 17,6-18,7; SD: 3,2) (Figura 8). Las pruebas estadísticas no indicaron diferencias significativas entre los subgrupos (prueba de Levene: p = 0,026; ANOVA de Welch: F (7, 137,1) = 0,11; p = 0,998). El TSV fue similarmente consistente en todos los subgrupos. Los valores permanecen cercanos a -0,7, que es la media general de la muestra (Figura 9), sin que se detecten diferencias significativas (prueba de Levene: p = 0,640; ANOVA: F (7, 139,6) = 0,15; p = 0,993).

Las diferencias en en las cuatro comparaciones relacionadas con el edificio (vivienda social versus privada, material del techo, presencia del cielo y humedad del piso) fueron generalmente pequeñas (Figura 10). Se observó un efecto significativo únicamente entre la vivienda social y la privada (p = 0,001), sin influencia confusa del sexo ni de la edad. Las comparaciones restantes no mostraron diferencias estadísticamente significativas en . Sin embargo, se identificó una diferencia significativa en la edad media de los participantes entre los grupos tanto para el "Material del techo" (p = 0,042) como para la "Presencia del cielo" (p = 0,024). El TSV no difirió significativamente en ninguna de las características del edificio evaluadas (Figura 11).

Los participantes informaron una variedad de comportamientos adaptativos para mitigar las molestias causadas por el frío. La muestra exhibió altos niveles de aislamiento de la ropa (=

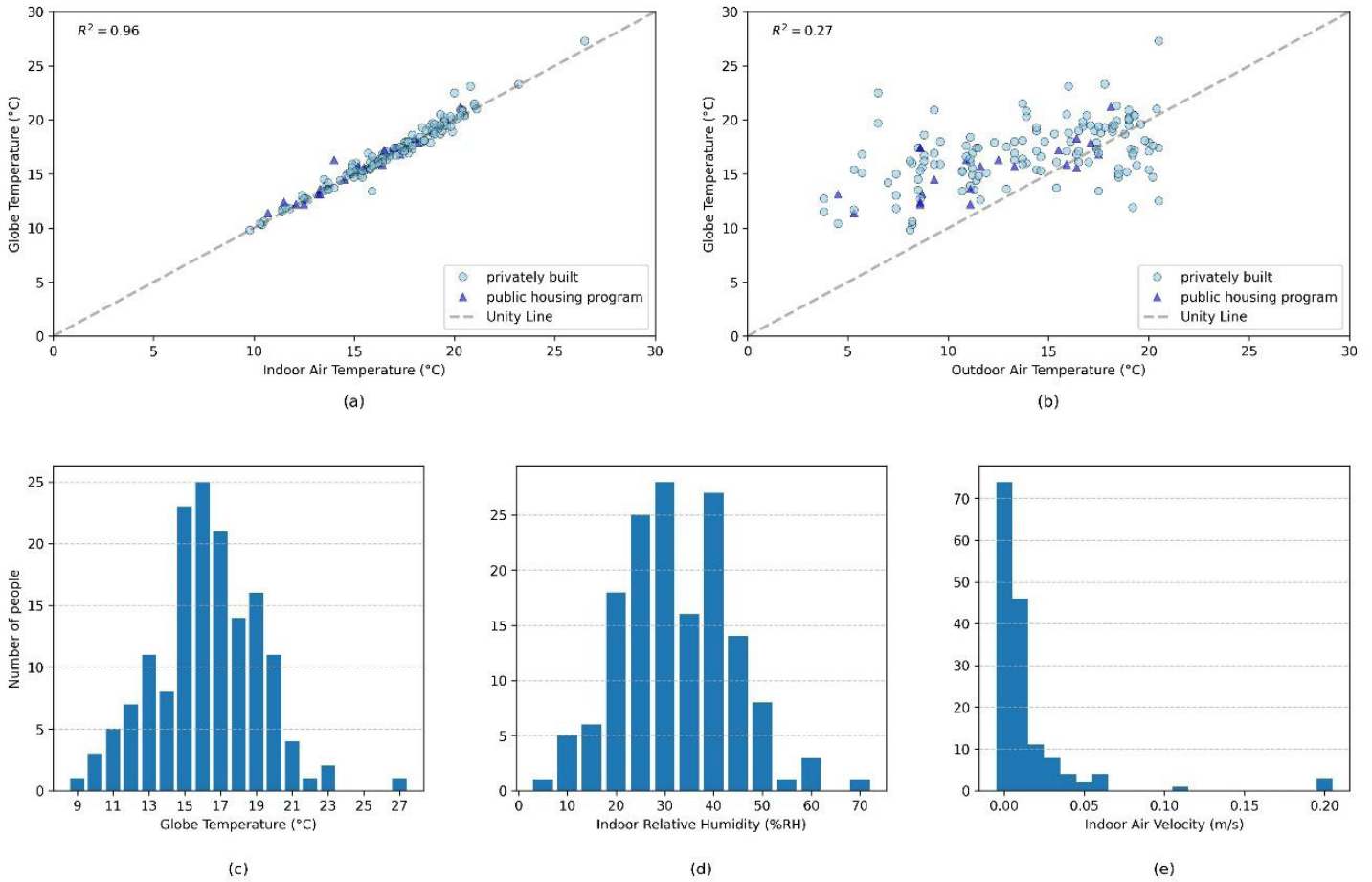


Figura 6. Datos ambientales durante las encuestas: relación entre (a) y (b) y distribuciones de (c), (d) humedad relativa interior y (e) velocidad del aire interior. Fuente: Elaborado por los autores.

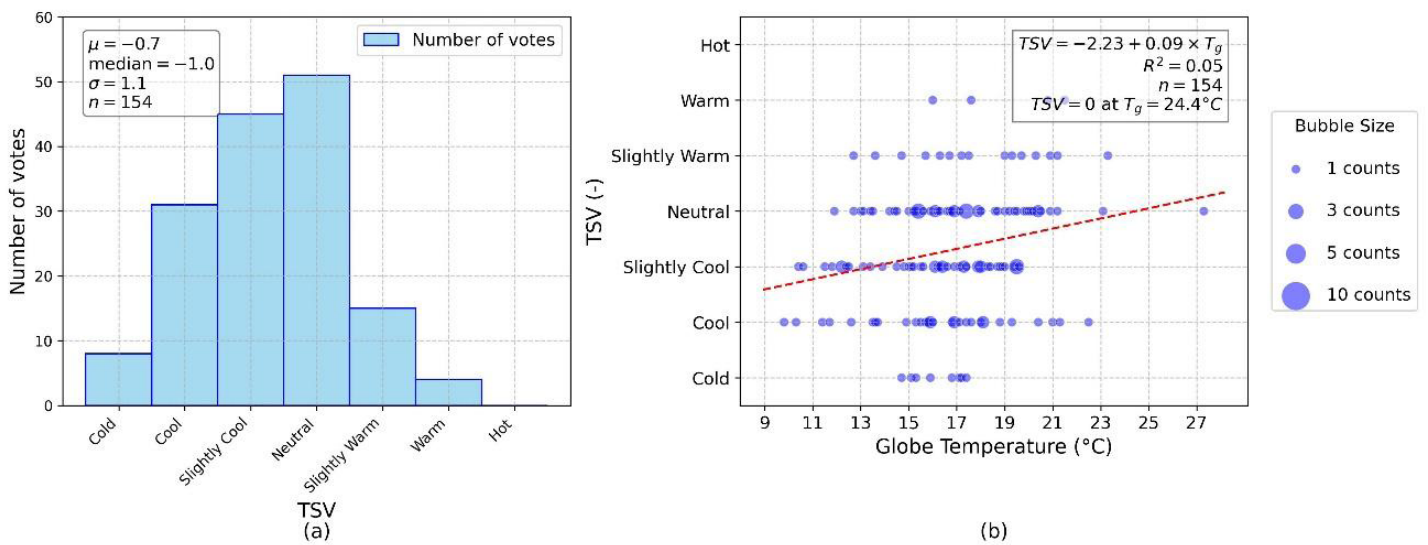


Figura 7. (a) Distribución de TSV, y (b) relación entre TSV y T_g . Fuente: Elaborado por los autores.

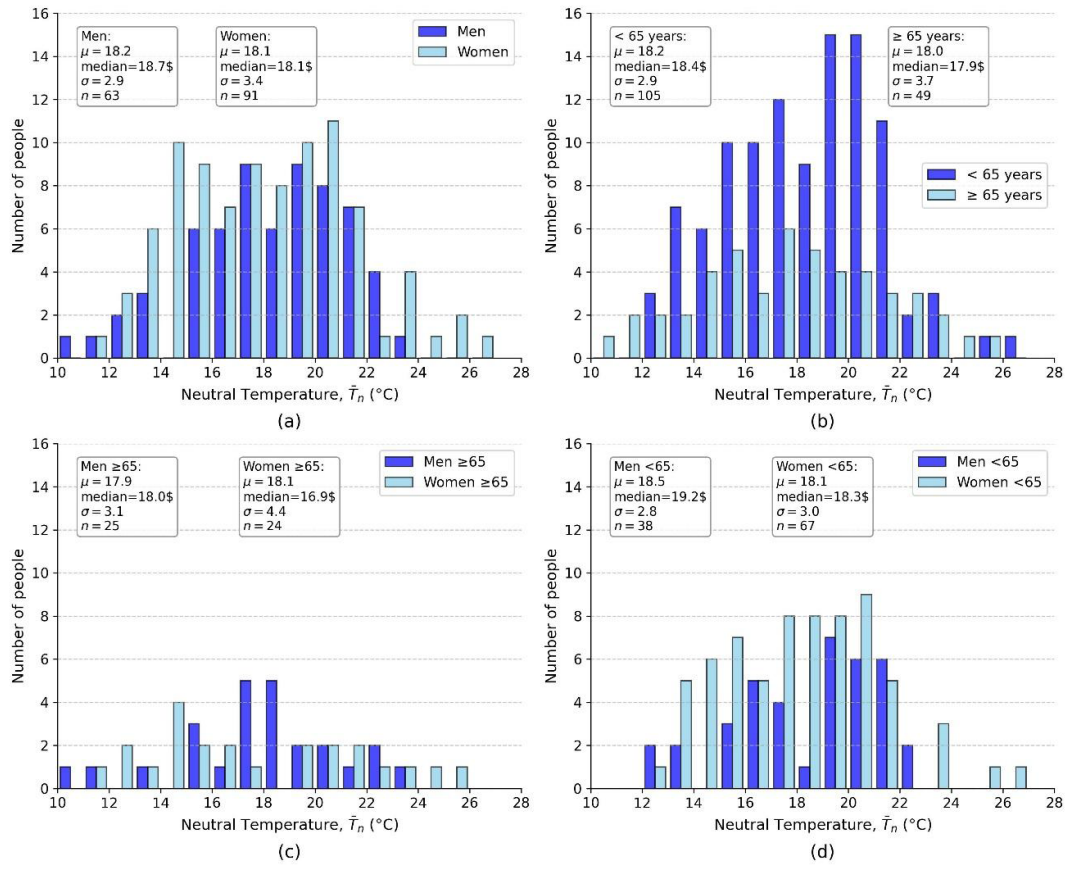


Figura 8. distribución T_n por subgrupos demográficos. Fuente: Elaborado por los autores.

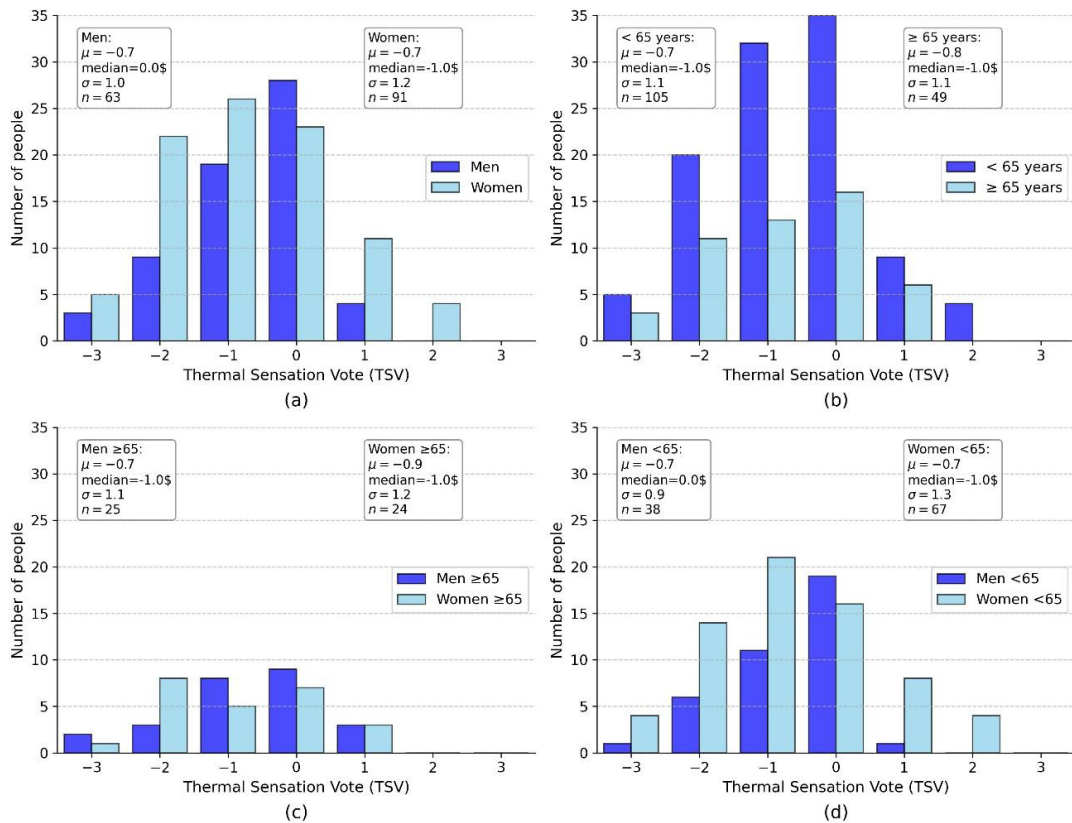


Figura 9. Distribución del TSV por subgrupos demográficos. Fuente: Elaborado por los autores.

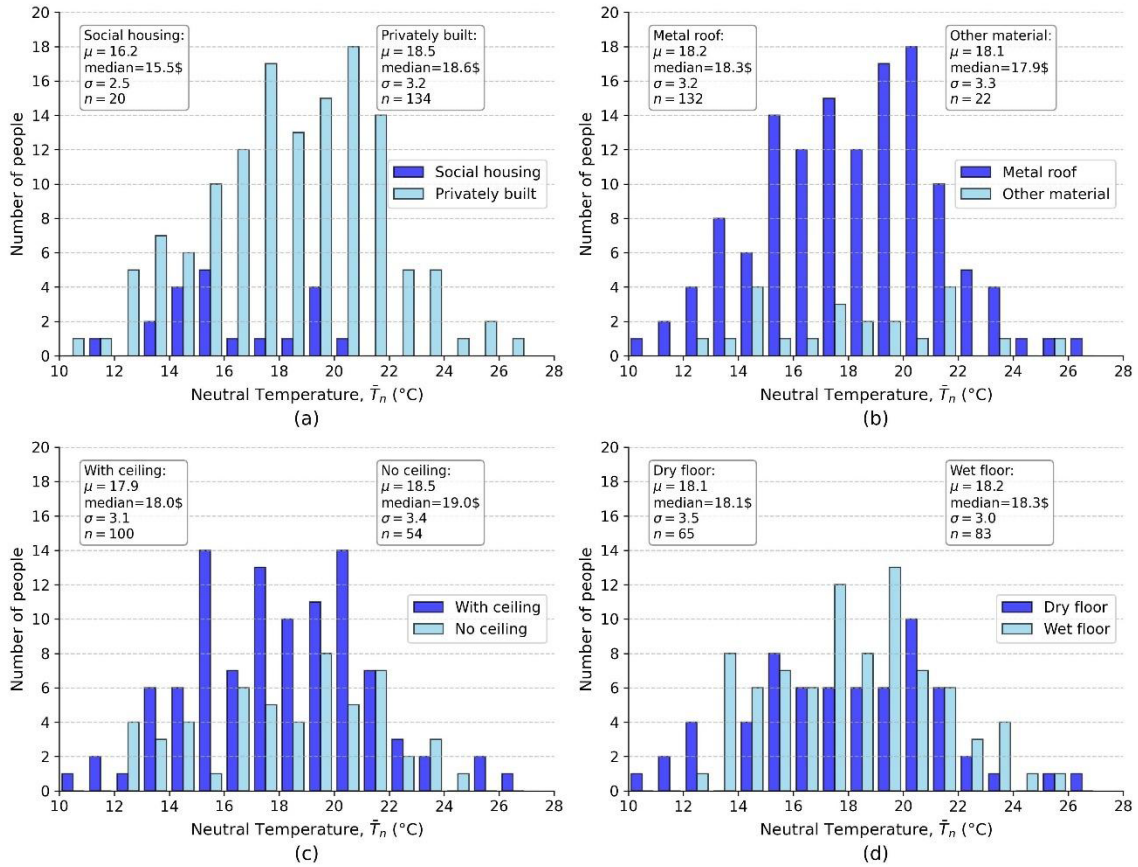


Figura 10. Distribución T_n a través de subgrupos característicos de edificios. Fuente: Elaborado por los autores.

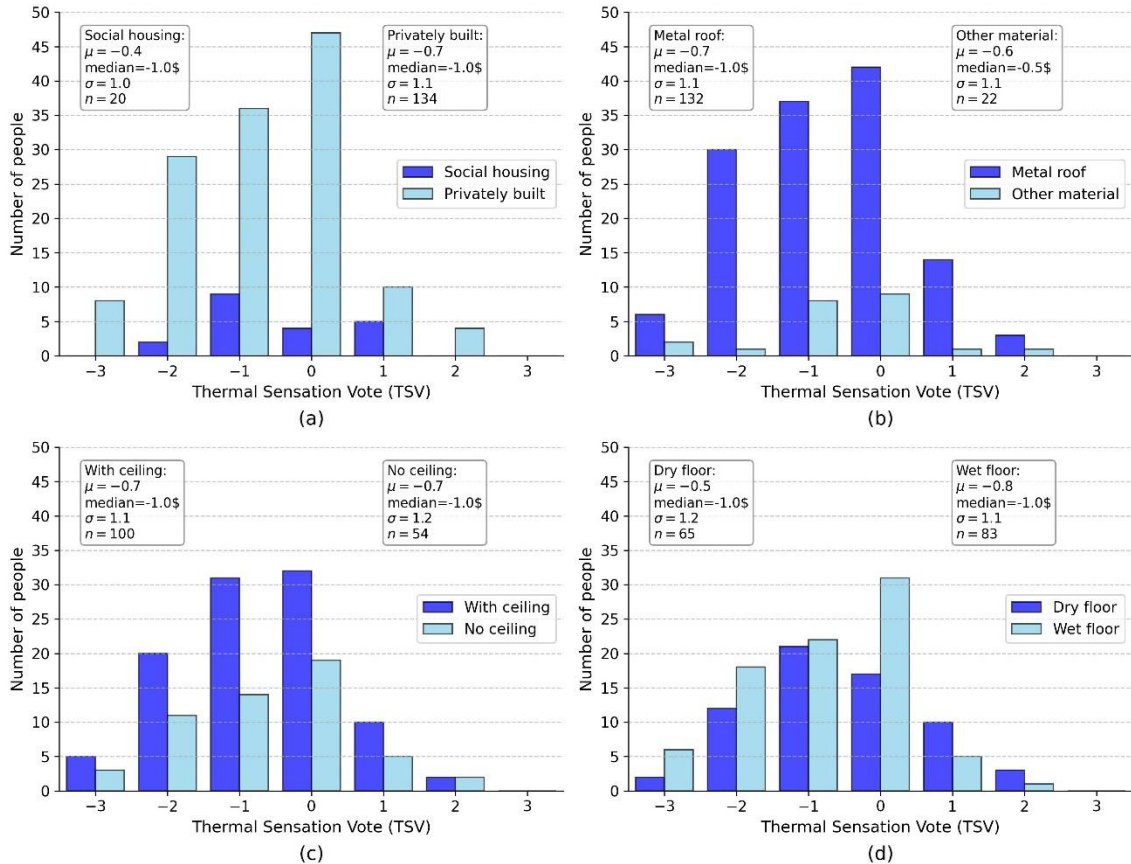


Figura 11. Distribución del TSV en subgrupos característicos de edificios. Fuente: Elaborado por los autores.

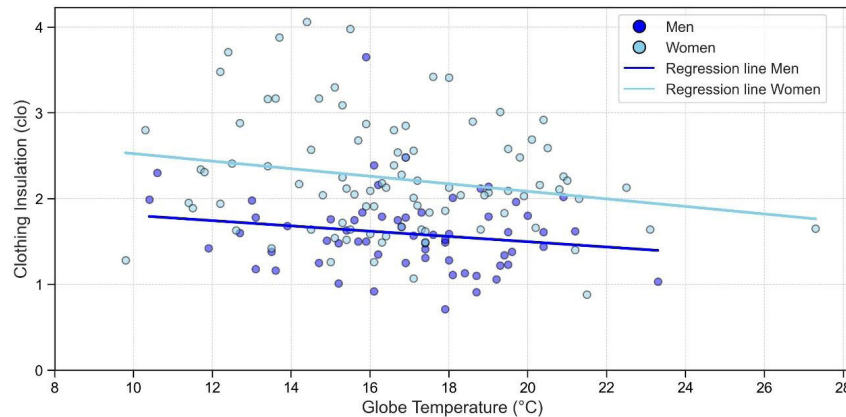


Figura 12. Relación entre Icl,Tg , y sexo. Fuente: Elaborado por los autores.

Tabla 2. Métricas de desempeño para los cinco modelos de confort térmico. Fuente: Elaborado por los autores.

Modelos de referencia	MAE	RMSE	Sesgo Medio	IQR	Precisión (Exacta)	Precisión (±0,5)	Precisión (±1,0)
Modelo PMV	1,06	1,26	-0,85	1,26	23,08%	23,08%	48,72%
Modelo Molina	1,61	1,95	1,14	2,40	18,18%	18,18%	35,06%
Modelo Pari-Quispe	2,01	2,43	-1,78	2,39	14,94%	16,23%	32,47%
Modelos desarrollados localmente							
Modelo aPMV	1,02	1,31	0,26	1,68	29,87%	29,87%	58,44%
Modelo adaptativo	1,32	1,61	0,03	2,39	19,48%	20,78%	44,16%

1,97 clo; CI de 95%: 1,86-2,08; SD = 0,67), y una correlación negativa entre I_{cl} y T_{g} (Figura 12). Las mujeres informaron niveles de aislamiento ligeramente más altos que los hombres. Otras estrategias comunes para combatir el frío incluyeron usar ropa o mantas adicionales (94% de los participantes), consumir bebidas o alimentos calientes (48%) y usar estufas de cocina para calentarse (13%).

Un análisis comparativo de los modelos de confort térmico reveló que el modelo aPMV, desarrollado a partir de los datos de la encuesta local, obtuvo un sesgo de $-0,26$ y demostró el mejor rendimiento predictivo general (Tabla 2). Logró el MAE más bajo (1,02) y la precisión práctica más alta, con un 58,4% de sus predicciones dentro de $\pm 1,0$ unidades de escala del TSV observado. La distribución de su sesgo de predicción se centró en torno a cero, con un ligero sesgo de mediana positivo de 0,26 (Figura 13b).

Notablemente, el modelo PMV estándar tuvo el IQR más pequeño = 1,26 y un MAE similar (1,06) (Tabla 2). Sin embargo, se subestimó el TSV de manera consistente, con un sesgo medio de $-0,85$ (Figura 13a). Por el contrario, el ATC derivado localmente, que fue el más imparcial de todos los modelos (sesgo medio = 0,03), aunque tuvo una distribución de errores más amplia (RIC = 2,39). Ambos modelos de referencia regionales presentaron un

desempeño deficiente. Tanto el modelo de Molina como el de Pari-Quispe presentaron altas tasas de error y los mayores sesgos sistemáticos, aunque en direcciones opuestas (sesgo medio de $+1,14$ y $-1,78$, respectivamente) (Figuras 13d y 13e). Estas desviaciones sistemáticas indican la limitada transferibilidad de los modelos regionales a las condiciones observadas en Langui.

El modelo aPMV mantuvo un MAE relativamente estable y la mayor precisión general en todo el rango de $14-20^{\circ}\text{C}$ (Figura 14a). El modelo PMV estándar también mostró un error estable, pero presentó un sesgo negativo consistente, lo que predijo sensaciones más frías que las observadas (Figura 14b). Por el contrario, los otros modelos mostraron fuertes sesgos dependientes de la temperatura (Figuras 14c, 14d y 14e). En función de su desempeño predictivo superior (Tabla 2), se utilizó el modelo aPMV para establecer un rango de temperatura de confort localizado. El 90% del rango ocupante-satisfacción, que corresponde a la concentración prevista de votos entre $-0,5$ y $+0,5$, se calculó entre 14°C y 25°C . Este rango de confort es válido en virtud de las condiciones promedio observadas durante el estudio: de 1,97 clo, una tasa metabólica de 1,0 cumplido, una media radiante de la temperatura de $16,8^{\circ}\text{C}$ una velocidad del aire de $0,01\text{ m/s}$ y una humedad relativa de 35%.

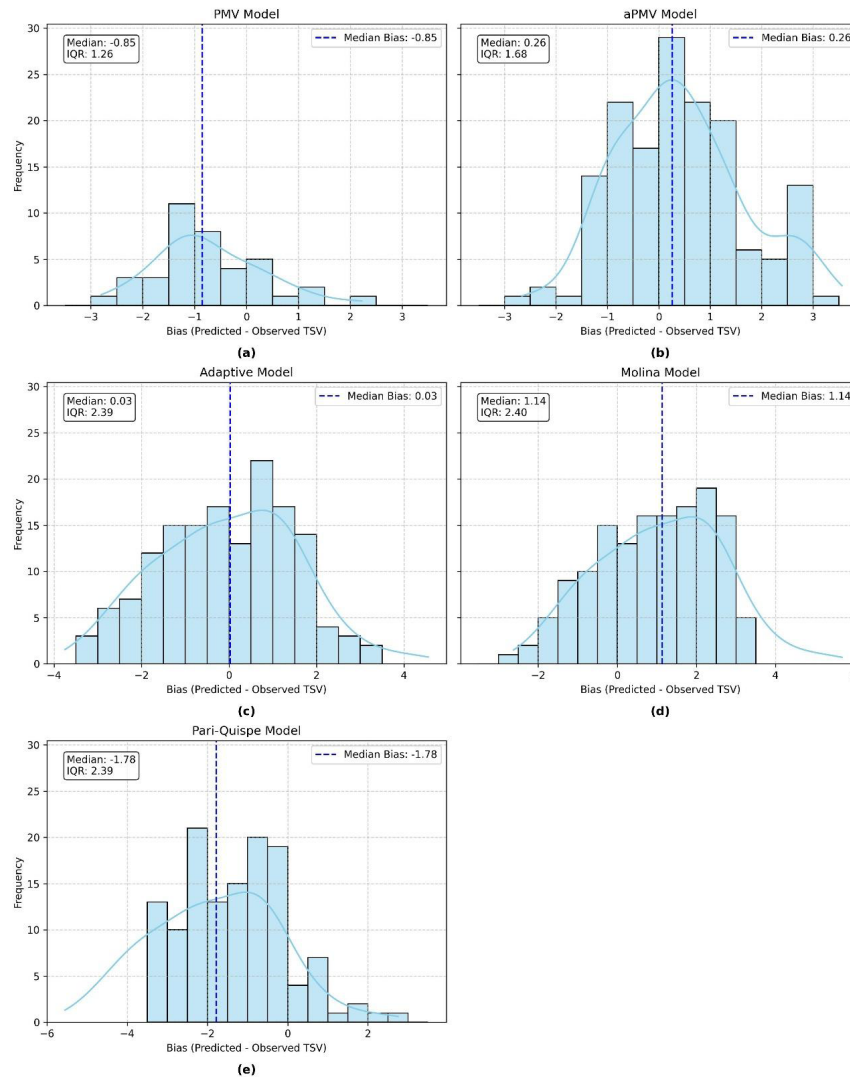


Figura 13. Distribución del sesgo de predicción (TSV Predicho-Observado) para el (a) modelo PMV, (b) modelo aPMV, (c) modelo adaptativo, (d) modelo Molina y (e) modelo Pari-Quispe. Fuente: Elaborado por los autores.

DISCUSIÓN

El principal hallazgo de este estudio es que el modelo aPMV, con un coeficiente adaptativo localmente derivado ($\lambda = -0,26$), resultó ser el predictor más preciso de la sensación térmica para los residentes en Langui. Utilizando este modelo, se estableció un rango de temperatura de confort localizado de entre 14 y 25 °C, y el λ , calculado usando el método de Griffiths fue de 18,2 °C. Esta preferencia no mostró diferencias significativas entre la edad o el sexo; sin embargo, fue significativamente menor entre los de vivienda social (: 16,2 °C) en comparación con las de viviendas de construcción privada (: 18.5 °C). Estos resultados reflejan mecanismos de adaptación de conducta coherentes con la teoría de confort adaptativo, donde la ropa (:1,97 clo), las rutinas y las expectativas dan forma a la percepción térmica en viviendas con ventilación natural.

Este estudio tiene varias limitaciones. Las comparaciones entre algunos subgrupos relacionados con el edificio se vieron afectadas por el desequilibrio de edad, aunque

no se encontró que la edad influyera en la sensación térmica o en la muestra. Sin embargo, los resultados de estas comparaciones deben interpretarse con cautela. El muestreo también fue influido por la participación de las autoridades locales, que pueden haber influido en la composición demográfica de los participantes, y por la escasa representación de los residentes de viviendas sociales. A pesar de los considerables esfuerzos realizados para adaptar el instrumento de la encuesta, algunos malentendidos sutiles de la escala de sensación térmica pueden haber persistido. Además, la preferencia y la aceptabilidad de los elementos de la encuesta original de ASHRAE no pueden mantenerse debido a los desafíos de la traducción, por lo que el análisis se basa exclusivamente en la TSV. Aun así, el tamaño final de la muestra y el método analítico fueron adecuados para los objetivos del estudio. A pesar de estas limitaciones, este estudio proporciona una de las pocas evaluaciones sistemáticas de los modelos de confort térmico en las tierras altas del Perú, apoyada en una recolección de datos adaptada culturalmente y en pruebas comparativas de los modelos.

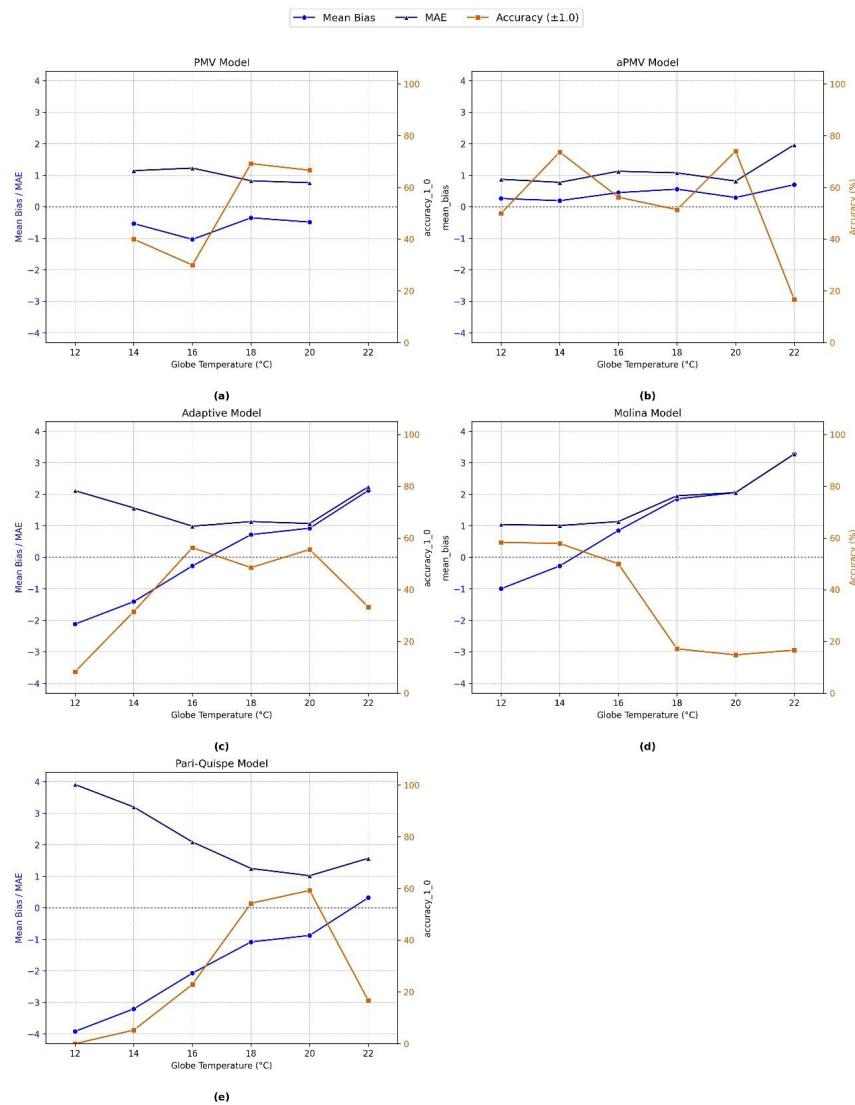


Figura 14. Modelo de métricas de desempeño como una función de . Cada subgráfico muestra la media de sesgo, el error absoluto medio (MAE) y la exactitud de la clasificación ($\pm 1,0$) para el modelo (a) PMV; (b) el modelo aPMV; (c) el modelo adaptativo; (d) el modelo de Molina; y (e) el modelo Pari-Quispe, calculado en grupos de temperatura de 2 °C.

El rendimiento del modelo aPMV se alinea con los resultados de regiones de gran altitud similares, lo que sugiere que este enfoque comprende los comportamientos adaptativos con mayor eficacia que otros modelos bajo estas condiciones ambientales. El coeficiente adaptativo calculado ($\lambda = -0,26$) es notablemente consistente con $\lambda = -0,34$ reportado para los edificios residenciales en la meseta del Tíbet, una región con condiciones análogas, como las grandes fluctuaciones diarias de temperatura y la falta de calefacción centralizada (Yu et al., 2017). Mientras que el modelo ATC estándar presentó un rendimiento más bajo en el análisis predictivo, su utilidad general para la determinación de temperaturas de confort en edificios con ventilación natural y con alta adaptabilidad de los ocupantes queda bien documentada en una amplia gama de estudios (Nicol et al., 2012).

Dado que λ del modelo aPMV se calibró con el mismo conjunto de datos, su desempeño predictivo puede ser ligeramente optimista. Esto también se aplica al modelo ATC, que se basa en las correlaciones entre TSV y . Sin embargo, solo el aPMV superó al PMV, aunque ambos se

derivaron del conjunto de datos. El modelo ATC, aunque es casi imparcial (mediana de sesgo = 0,03), mostró una mayor dispersión, lo que reduce su rendimiento en el MAE, el RMSE y en las métricas de precisión. El PMV, en cambio, mostró un MAE y un RMSE menores, ya que su subestimación sistemática generó errores bien agrupados. Estos resultados no contradicen estudios previos que reportan correlaciones ATC–TSV más fuertes que las de PMV–TSV; por el contrario, destacan la importancia de complementar el análisis de correlación con múltiples métricas de rendimiento al comparar los modelos de confort.

T_n observado en Langui (18,2 °C) cae entre los valores reportados en dos estudios peruanos recientes en un contexto similar de gran altitud (12,4 °C en (Molina et al., 2023) y 21,98 °C en (Pari-Quispe et al., 2024)). La temperatura más baja en (Molina et al., 2023) se tomó de un estudio centrado en residentes jóvenes, que utilizó una escala de sensación térmica de cinco puntos, mientras que la temperatura más alta en (Pari-Quispe et al., 2024) se refleja en una encuesta específica de invierno en casas vernáculas

de totora. Estas diferencias resaltan la necesidad de contar con métodos estandarizados a nivel nacional. El desarrollo de una base de datos de confort térmico a nivel nacional permitiría comparaciones consistentes, apoyaría la calibración de los modelos adaptativos y proporcionaría evidencia más sólida para la elaboración de directrices.

De acuerdo con la investigación en otras regiones de gran altitud, los hallazgos confirman que las temperaturas de confort en Langui son más bajas que las pronosticadas según estándares internacionales, como ASHRAE 55. Estudios en Nepal (Shahi et al., 2021; Rijal et al., 2010) informan de manera similar sobre temperaturas de confort en invierno entre 13 °C y 24 °C, lo que refleja la adaptación a ambientes interiores fríos. Los altos valores de aislamiento de la ropa y la dependencia de las estrategias de comportamiento reflejan los mecanismos centrales de la teoría del confort adaptativo, según la cual los ocupantes amplían su rango de temperatura aceptable mediante la exposición sostenida y la adaptación (Rijal et al., 2010; Yu et al., 2017). La ausencia de diferencias demográficas en la sensación térmica fue inesperada y distinta de la observada en otros estudios in situ (Thapa, 2020; Yuan et al., 2022). Esta ausencia puede reflejar la influencia homogeneizadora de altos niveles de aislamiento, lo que puede reducir las distinciones fisiológicas típicamente observadas entre los grupos de edad y sexo.

Diferencias en entre residentes de viviendas sociales y privadas sugieren que las características de la vivienda pueden influir en la percepción térmica, aunque este hallazgo es difícil de interpretar. El medido en viviendas sociales durante la encuesta se encontraban dentro del mismo rango que las de viviendas de construcción privada, lo que indica que las más bajas no pueden atribuirse a diferencias en las condiciones térmicas en el momento de la medición. Aunque un sesgo de informe relacionado con la gratitud por recibir vivienda subsidiada podría influir en la comodidad autoinformada, los datos no permiten verificar este u otros mecanismos interpretativos. Se examinaron y descartaron posibles factores de confusión demográfica. Se necesitan investigaciones futuras para determinar si las condiciones de exposición a largo plazo o los factores contextuales ayudan a explicar estas diferencias.

Dado su desempeño predictivo superior en nuestro análisis comparativo, el aPMV se presenta como un índice adecuado para evaluar las condiciones térmicas interiores en viviendas rurales de gran altitud y para guiar la evaluación de las intervenciones de construcción. El rango de confort de 14-25 °C, calculado en nuestro estudio, proporciona uno de los primeros puntos de referencia empíricamente fundamentados para edificios rurales de gran altitud en Perú y puede usarse para evaluar si las viviendas actuales satisfacen las necesidades de confort de los residentes. El hecho de que el 83% de los participantes informó de molestias por frío nocturno subraya la necesidad de priorizar la mejora de las condiciones térmicas interiores como un problema de salud pública. En este contexto, el umbral inferior de 14 °C ofrece una referencia práctica para respaldar diseños de edificios o estrategias de modernización en programas de vivienda, así como para guiar a los residentes que desean mejorar sus propios hogares y abordar la experiencia predominante de incomodidad por el frío nocturno.

Según los hallazgos del estudio, surgen varias direcciones para futuras investigaciones. Se necesita más trabajo para identificar las características de diseño de las viviendas sociales que pueden contribuir a mejorar el confort térmico y comprender cómo evolucionan las preferencias de confort con el tiempo en tales viviendas. Ampliar la representación demográfica ayudaría a aclarar las necesidades térmicas de los niños y otros grupos vulnerables. Finalmente, se requiere investigación metodológica adicional para refinar las escalas de sensación térmica culturalmente apropiadas para poblaciones de gran altitud. El fortalecimiento de estas áreas de investigación contribuirá al desarrollo de soluciones de vivienda que mejoren la comodidad y los resultados de salud en los Andes.

CONCLUSIÓN

Este estudio evaluó el desempeño de cinco modelos de confort térmico en la comunidad andina de gran altitud de Langui. El modelo aPMV, calibrado con un coeficiente adaptativo local ($\lambda = -0,26$), mostró la mayor concordancia con la sensación térmica informada y soportó un rango de temperatura de confort de 14-25 °C. A pesar de la fuerte adaptación conductual, el ambiente interior frío nocturno generalizado indica que las viviendas actuales no satisfacen las necesidades térmicas básicas.

El estudio proporciona una de las primeras evaluaciones contextualizadas de la aplicabilidad del modelo de confort en el altiplano peruano y ofrece indicadores que pueden respaldar la evaluación futura de la vivienda andina. Si bien las limitaciones incluyen el muestreo no aleatorio y la escasa representación de la vivienda social, los resultados proporcionan una base sólida para futuros trabajos. Las investigaciones futuras deberían examinar el desempeño a largo plazo en viviendas sociales, ampliar la representación demográfica y refinar los instrumentos de encuesta culturalmente adaptados para fortalecer las evaluaciones de confort en contextos de gran altitud.

CONTRIBUCIÓN DEL AUTOR CRediT

Conceptualización, E. M.; Curación De Datos, E. M.; Análisis Formal, E. M.; Adquisición De Financiación, E. M., J. E. S. N, V. M. R. A, M. W.; Investigación, E. M., J. H. R., J. E. S. N, V. M. R. A, B. A. L. C., R. S. A. Q, M. A, S. O, L. P. Y.; Metodología E. M., J. H. R., M. W.; Gestión de Proyectos E. M., J. E. S. N, V. M. R. A., M. W.; Recursos, E. M. J. E. S. N., V. M. R. A., B. A. L. C. S. O.; Software, E. M; Supervisión, M. W.; Validación, E. M, J. H. R., M. W.; Visualización, E. M.; Escritura - borrador original, E. M; Escritura - revisión y edición, E. M. & M. W.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo financiero de ProCiencia, unidad ejecutora del Concytec (Consejo Nacional de Ciencia,

Tecnología e Innovación del Perú), en el marco de la convocatoria Proyecto de Investigación Aplicada 2022-02, bajo el contrato PE501079639-2022. Enrique Mejía-Solis agradece el apoyo del Programa de Becas de Doctorado FONDECYT/CONCYTEC “Generación Científica – Becas Internacionales” (Premio No. 303-2014).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aza-Medina, L. C., Ccama Condori, H. A., Pari-Quispe, D. K., Torres-Benavides, A. H., & Humalla-Quispe, J. A. (2025). Paneles termoaislantes basados en Stipa lchu, celulosa y yeso para revestimiento de viviendas Altoandinas. *ESTOA. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo*, 14(28), 11–24. <https://doi.org/10.18537/est.v014.n028.a01>

Canales Gutiérrez, Á., Belizario Quispe, G., Calatayud Mendoza, A. P., Chui Betancur, H. N., & Huaquisto Ramos, E. (2021). Confort térmico y el riesgo de infecciones respiratorias en los adultos mayores en la sierra rural del Perú. *Revista Española de Geriatria y Gerontología*, 56(1), 24–28. <https://doi.org/10.1016/j.regg.2020.07.007>

De Dear, R. J., & Brager, G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34(6), 549–561. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00005-1)

Fanger, P. O. (1972). *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill.

Humphreys, M. A., Rijal, H. B., & Nicol, J. F. (9-11 April 2010). *Examining and developing the adaptive relation between climate and thermal comfort indoors*. Proceedings of Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort, Cumberland Lodge, Windsor, UK, Network for Comfort and Energy Use in Buildings, London.

Humphreys, M. A., Rijal, H. B., & Nicol, J. F. (2013). Updating the adaptive relation between climate and comfort indoors; new insights and an extended database. *Building and Environment*, 63, 40–55. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.01.024>

Massler, B. (2004). *Innovative strategies for reducing poverty in the Southern highlands of Peru*. World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/752071468776397897/Innovative-strategies-for-reducing-poverty-in-the-Southern-highlands-of-Peru>

Mejía-Solis, E., Arias, J., & Palm, B. (2023). Simple solutions for improving thermal comfort in huts in the highlands of Peru. *Heliyon*, 9(10), e19709. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19709>

Molina, J. R., Lefebvre, G., & Gómez, M. M. (2023). Study of the thermal comfort and the energy required to achieve it for housing modules in the environment of a high Andean rural area in Peru. *Energy and Buildings*, 281, 112757. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112757>

Nicol, F., Humphreys, M. A., & Roaf, S. (2012). *Adaptive thermal comfort: Principles and practice*. Routledge.

Pari-Quispe, D. K., Cronemberger-Ribeiro Silva, J., Huaquisto-Cáceres, S., Ccama-Condori, H. A., & Aza-Medina, L. C. (2024). Percepción térmica de usuarios en la vivienda vernácula de la comunidad Uro del lago Titicaca en Perú. *Hábitat Sustentable*, 14(1), 22–33. <https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.01.02>

Rijal, H. B. (2021). Thermal adaptation of buildings and people for energy saving in extreme cold climate of Nepal. *Energy and Buildings*, 230, 110551. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110551>

Rijal, H. B., Yoshida, H., & Umemiya, N. (2010). Seasonal and regional differences in neutral temperatures in Nepalese traditional vernacular houses. *Building and Environment*, 45(12), 2743–2753. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.06.002>

Shahi, D. K., Rijal, H. B., Kayo, G., & Shukuya, M. (2021). Study on wintry comfort temperature and thermal improvement of houses in cold, temperate, and subtropical regions of Nepal. *Building and Environment*, 191, 107569. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107569>

Subri, M. S. M., Arifin, K., Sohaimin, M. F. A. M., & Abas, A. (2024). The parameter of the Sick Building Syndrome: A systematic literature review. *Heliyon*, 10(12), e32431. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32431>

Thapa, S. (2020). Thermal comfort in high altitude Himalayan residential houses in Darjeeling, India – An adaptive approach. *Indoor and Built Environment*, 29(1), 84–100. <https://doi.org/10.1177/1420326X19853877>

Wieser, M., Rodríguez-Larriain, S., & Onnis, S. (2021). Estrategias bioclimáticas para clima frío tropical de altura. Validación de prototipo de vivienda. Puno, Perú. *ESTOA. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo*, 10(19), 9–19. <https://doi.org/10.18537/est.v010.n019.a01>

Yang, Q., Xu, F., Lu, W., Yang, Z., Bai, Y., & Wen, B. (2025). Green renovation and multi-objective optimization of Tibetan courtyard dwellings. *Building and Environment*, 279, 113071. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113071>

Yao, R., Li, B., & Liu, J. (2009). A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV). *Building and Environment*, 44(10), 2089–2096. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.014>

Yu, W., Li, B., Yao, R., Wang, D., & Li, K. (2017). A study of thermal comfort in residential buildings on the Tibetan Plateau, China. *Building and Environment*, 119, 71–86. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.04.009>

Yuan, J., Cong, Y., Yao, S., Dai, C., & Li, Y. (2022). Research on the thermal comfort of the elderly in rural areas of cold climate, China. *Advances in Building Energy Research*, 16(5), 612–642. <https://doi.org/10.1080/17512549.2022.2067229>

Zhao, D., Liu, Y., Song, C., Fu, Z., Zhang, C., Zhao, J., & Li, J. (2023). Survey on the dressing behavior and thermal comfort of plateau Tibetan people. *Building and Environment*, 246, 110981. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110981>