

DESARROLLO DE UN MODELO DE EVALUACIÓN DE PARÁMETROS AMBIENTALES PARA LOGRAR EL CONFORT TÉRMICO EN VIVIENDAS DE KALLAPUMA

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR EVALUATING ENVIRONMENTAL PARAMETERS TO ACHIEVE THERMAL COMFORT IN KALLAPUMA HOUSING

María Girón-Pizarro^{1*}, Carlos Polo-Bravo², Mónica Gómez-León²

¹Escuela de Posgrado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú

²Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú

³Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

Recibido (Received): 10 / 03 / 2024 Aceptado (Accepted): 01 / 12 / 2024

RESUMEN

La investigación se centra en el estudio del confort térmico de los habitantes del Centro Poblado Menor de Kallapuma, ubicado a 4 258 metros sobre el nivel del mar en el distrito de Tarata, provincia y región de Tacna. Para evaluar los parámetros ambientales, se aplicaron encuestas de satisfacción considerando la vestimenta, alimentación, actividad física y la comodidad térmica, para medir la temperatura, humedad relativa, percepciones de confort como la sensación térmica, información personal y la ropa utilizada por los usuarios, denominado voto de sensación térmica (VST) se utilizó el dispositivo TSVR (*Thermal Sensation Vote Recorder*). Las mediciones se realizaron durante los meses de mayo, junio y julio de 2022; para el efecto se analizó la aceptabilidad real de las condiciones térmicas por parte de los usuarios. Luego se identificó la temperatura de neutralidad y los rangos de confort térmico para la población del Centro Poblado Menor de Kallapuma, considerando las normas ASHRAE 55 e ISO 7730, comparándolos con modelos desarrollados por autores como Fanger, Humphreys y Givoni. Conocer las condiciones definidas de confort térmico y el tipo de población favorecerá el diseño de viviendas en zonas altoandinas. Expresar las condiciones relacionadas a la temperatura, humedad relativa y percepciones de confort térmico facilita la aplicación de estrategias pasivas de acondicionamiento ambiental.

Palabras Clave: Parámetros Ambientales, Confort Térmico, Zona Altoandina, Temperatura de Neutralidad.

ABSTRACT

The research focuses on the study of thermal comfort among the inhabitants of the Minor Population Center of Kallapuma, located at 4,258 meters above sea level in the district of Tarata, province and region of Tacna. To evaluate environmental parameters, satisfaction surveys were conducted considering clothing, diet, physical activity, and thermal comfort. These surveys measured temperature, relative humidity, comfort perceptions such as thermal sensation, personal information, and clothing used by users. The Thermal Sensation Vote (TSV) was recorded using the TSVR (*Thermal Sensation Vote Recorder*) device. Measurements were carried out during May, June, and July of 2022. The actual acceptability of thermal conditions by users was analyzed. Subsequently, the neutral temperature and thermal comfort ranges for the population of Kallapuma were identified, referencing ASHRAE 55 and ISO 7730 standards and comparing them with models developed by authors such as Fanger, Humphreys, and Givoni. Understanding the defined conditions of thermal comfort and the type of population will aid in designing housing in high Andean areas. Expressing conditions related to temperature, relative humidity, and perceptions of thermal comfort facilitates the application of passive environmental conditioning strategies.

Keywords: Environmental Parameters, Thermal Comfort, High Andean Zone, Neutral Temperature.

1. INTRODUCCIÓN

El confort térmico es un aspecto clave para determinar si un ambiente es adecuado térmicamente. Se entiende como el estado físico y

psíquico satisfactorio de las personas en relación con el ambiente térmico [1].

Existen dos enfoques principales para evaluar el confort térmico: el enfoque cuantitativo y el enfoque

¹ * Autor de correspondencia:
E-mail: marilugp6@gmail.com

adaptativo [2]. El enfoque cuantitativo se basa en la transferencia de calor entre el ambiente y el cuerpo, relacionando estos fenómenos con las sensaciones térmicas. Este enfoque requiere que los sujetos de estudio se encuentren en un ambiente con condiciones térmicas casi constantes, subestimando la capacidad de adaptación climática y los cambios que las personas pueden hacer para mejorar su sensación de bienestar térmico.

Por otro lado, el enfoque adaptativo de Nicol y Humphreys [20] se centra en las características térmicas del ambiente, la transferencia de calor al cuerpo humano, la subjetividad del comportamiento de las personas, y la interacción psicológica y fisiológica, incorporando los efectos de aclimatación y las decisiones de las personas para alcanzar el confort térmico.

El estudio presenta información recopilada a través de dispositivos de bajo costo [3] que permitieron medir parámetros ambientales como temperatura y humedad relativa, así como percepciones de confort térmico, actividad, vestimenta y preferencia térmica. Esto permitió estimar la temperatura de confort o neutralidad para el centro poblado de Kallapuma, ubicado en la provincia de Tarata en la región Tacna, y definir los rangos de confort térmico adaptativo [4].

Según el enfoque adaptativo, los rangos de confort varían dependiendo de las características específicas del lugar. Por lo tanto, es importante estimar los índices de confort térmico en zonas altoandinas para comprender las necesidades de confort de esas regiones y desarrollar soluciones de acondicionamiento térmico apropiadas para mejorar el bienestar de sus habitantes.

Este artículo desarrolla la misma metodología elaborada previamente por J.R. Molina, (2022), en otra zona altoandina de nuestro país [3].

2. ANTECEDENTES

En los últimos años, el impacto de las bajas temperaturas, especialmente las heladas, se ha venido acrecentando en Perú [5]. Así se constata en el Plan Multisectorial ante Heladas y Friajes publicado por INDECI [6].

De acuerdo a los "Escenarios de Riesgo por Heladas y Friaje", a nivel nacional hay 811 593 personas y 392 459 viviendas expuestas a alta susceptibilidad a heladas, mientras que en Tacna son 1 219 personas y 998 viviendas [7]. Esto se agrava por

la carencia de servicios básicos, dispersión de asentamientos rurales y deficientes vías de comunicación, haciéndolos vulnerables, especialmente niños y ancianos, con altos índices de mortalidad.

Sumado a ello, la carencia de servicios básicos, dispersión de asentamientos rurales y deficientes vías de comunicación, hacen que la población sea vulnerable especialmente los niños y ancianos, produciéndose altos índices de decesos por motivos de salud [8].

Algunas de las causas también son la mala alimentación, vestimenta inadecuada y escaso conocimiento de la población sobre técnicas constructivas. Es evidente que el empleo de materiales constructivos como planchas de zinc, metal en puertas y ventanas, acompañado del defectuoso sellado de las mismas, permiten el paso del frío al interior, afectando la habitabilidad.

El Programa Nacional de Vivienda Rural (PNVR) enfrenta deficiencias en su implementación para mejorar el confort térmico y la habitabilidad de las viviendas rurales. Una de las principales carencias es la falta de adaptación a los contextos locales, ya que no siempre se toma en cuenta las particularidades culturales y climáticas de las comunidades rurales, lo que puede llevar a soluciones poco efectivas para el confort térmico [9].

Por ello, el objetivo de la investigación es conocer los rangos de confort en el centro poblado de Kallapuma [10] e identificar estrategias de calefacción pasiva [12], técnicas constructivas y uso eficiente de energías renovables, que permitan evaluar el impacto en el confort térmico en regiones con condiciones climáticas similares.

3. METODOLOGÍA

La temperatura neutra (T_n) y los rangos de confort térmico se determinaron mediante la recolección de datos de temperatura interior (T_i), humedad relativa (HR), VST e información personal e indumentaria a través de encuestas [11], y el uso de dispositivos de bajo costo [3] en las viviendas del centro poblado de Kallapuma.

Se analizaron los datos recolectados, empleando correlaciones lineales, para determinar la relación entre las variables térmicas y la sensación térmica de los ocupantes.

A partir de las correlaciones lineales entre la temperatura interior y el VST, se calculó la (T_n) donde se considera igual a el VST. Para el total de datos, T_n es igual a 10,74 °C.

Para la definición de los rangos de confort se identificaron 2 zonas; la zona reducida (ZR) que fue determinada por las temperaturas mínimas y máximas: mientras que la zona extensa (ZE) fue determinada con las temperaturas mínimas y máximas extensas. Para ello se tuvo en cuenta el análisis de datos climáticos históricos y mediciones específicas en el área de estudio. Se utilizaron registros meteorológicos para identificar los rangos de temperatura que afectan a la comunidad, considerando factores como la altitud y las características geográficas. Además, se realizaron encuestas y entrevistas a expertos para validar los datos y comprender mejor las condiciones locales.

También se analizaron los datos separados por nivel de actividad (pasiva y moderada), obteniendo rangos de confort específicos para cada caso.

Los resultados se compararon con otros modelos de confort térmico adaptativo como los de

Humphreys, Griffiths, Auliciems, Nicol y Roaf, y ASHRAE, encontrando diferencias que resaltan la necesidad de desarrollar modelos de confort térmico adaptativo específicos para las condiciones climáticas de las zonas altoandinas del Perú.

3.1 LUGAR DE ESTUDIO

Kallapuma es un centro poblado menor ubicado al sur del Perú, en la comunidad campesina Maure, distrito de Tarata, provincia de Tarata, región Tacna. Se encuentra a una latitud sur de 17°19'1,3" y longitud oeste de 69°43'51,6", a una altitud de 4 258 m s.n.m.

La localidad carece de servicios básicos como agua, desagüe, electrificación e internet. El acceso se realiza por vía terrestre a través de la ruta TA-107, distando 169 km (3 horas de viaje) desde la ciudad de Tacna.

Entre la infraestructura existente en Kallapuma se encuentran una plaza principal, la institución educativa Escuela 43010 Horacio Zeballos Gámez, una plataforma de servicios tambo y un puesto de salud [13].



Fig. 1. Vista por satélite del centro poblado Kallapuma.



Fig. 2. Vista de la plaza principal del centro poblado Kallapuma.

Las viviendas de Kallapuma son construcciones rústicas que predominantemente utilizan adobe en paredes, planchas de zinc en cubiertas a dos aguas, pisos de tierra y puertas y ventanas metálicas.

Según la clasificación climática de Warren Thornthwaite [14], Kallapuma tiene un clima semiseco con invierno seco, donde la temperatura máxima se encuentra entre 11 °C y 15 °C, y la temperatura mínima entre -11 °C y -7 °C. La precipitación anual es de aproximadamente 500 mm a 700 mm [15].

Para el año 2021, los valores promedios de temperatura y humedad relativa fueron de 4,36 °C y 56,26 %, respectivamente. En registros históricos se alcanzan temperaturas de hasta -20 °C, principalmente en época de heladas entre junio y agosto. Las bajas temperaturas ocurren principalmente por las noches. La oscilación térmica diaria promedio anual es de 30,65 °C.

Las precipitaciones son frecuentes principalmente entre diciembre y marzo, mientras que en la época de heladas son escasas. La velocidad promedio del viento fue de 3,11 m/s.

3.2 DISPOSITIVO DE REGISTRO DE DATOS (TSVR)

Para el trabajo de campo, se implementó el dispositivo TSVR, compuesto por sensores de temperatura, humedad relativa, botones para seleccionar al usuario y botones para elegir las sensaciones térmicas de los pobladores. Se distribuyeron 07 dispositivos a pobladores de Kallapuma para medir parámetros meteorológicos y la sensación de confort térmico. Para ello se capacitó a la población en el uso de dispositivos mediante talleres y sesiones informativas.

De la población que utilizó los dispositivos, un mayor porcentaje tiene entre 11 y 20 años de edad. Del total de datos, el 41 % son mujeres y el 59 % son hombres. La edad promedio de las personas que utilizaron los dispositivos es de 33 años.

La calibración de los equipos TSVR se realizó con el dispositivo de registro Data Logger para Termocuplas HOBO® UX120 cuatro-canales. Este proceso se llevó a cabo al interior de la habitación del tambo en el tambo del centro poblado de Kallapuma, antes de entregarlos a los pobladores de Kallapuma.

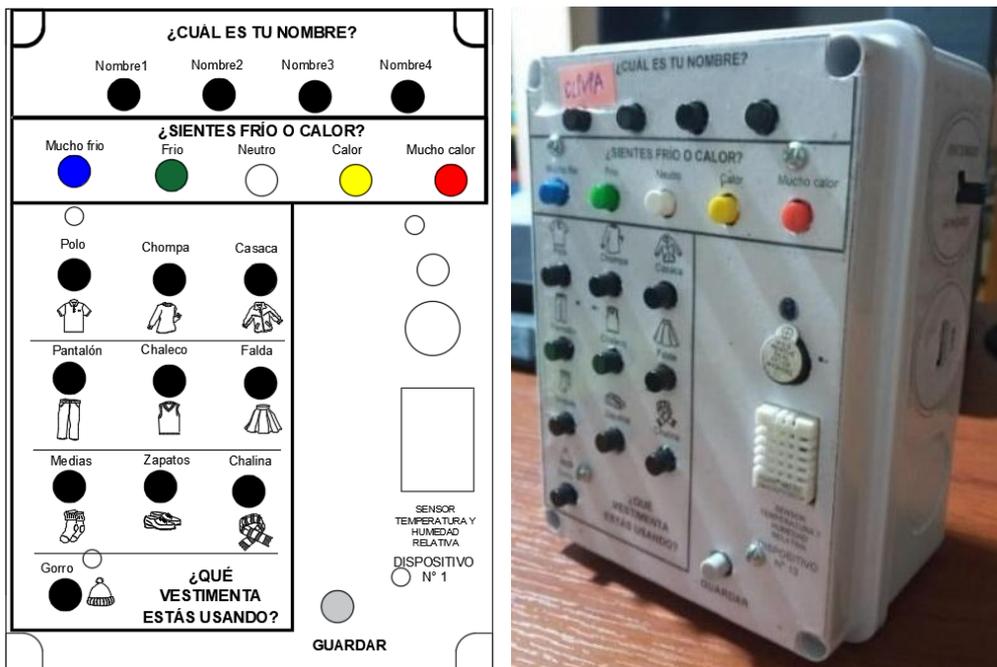


Fig. 3. Esquema del dispositivo TSVR.

3.3 ENCUESTAS Y PROCESO DE EVALUACIÓN

Se elaboró una encuesta dividida en tres secciones para recolectar información relevante para el estudio como la información personal, información sobre vestimenta y actividad física e información sobre la sensación térmica de los encuestados respecto al ambiente.

Se utilizó una estación meteorológica DAVIS VANTAGE PRO 2 PLUS, ubicada en el tambo Kallapuma, para registrar parámetros físicos como temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento al momento de realizar las encuestas in situ. Estas mediciones consideradas exteriores, se realizaron en el ambiente circundante al poblado.

Las encuestas se llevaron a cabo en mayo de 2022 en diferentes ubicaciones de Kallapuma como aulas del centro educativo, tanto en nivel secundario como primario, durante horas académicas, el Tambo, una vivienda y el puesto de vigilancia.

Se encuestaron a un total de 62 personas en estas locaciones. De las cuales 31 son alumnos, 23 son docentes, personal administrativo y padres de familia de la IE. Horacio Zeballos, 2 son trabajadores del tambo, 3 policías del puesto de vigilancia y 1 familia compuesta por madre, tía e hijo.

3.4 ANÁLISIS DE DATOS OBTENIDOS

Respecto al análisis del VST, en las encuestas realizadas, el VST predominante fue el de "Neutro" (N) con 54 %, seguido de "Frío" (F) con 39 %, "Muy frío" (MF) con 7 % y "Calor" (C) y "Mucho calor" (MC) con 0 % para los ambientes interiores y exteriores.

En los datos obtenidos de los dispositivos, el VST predominante fue "Frío" (F) con 34 %, seguido de "Neutro" (N) con 31 %, "Muy Frío" (MF) con 26 %, "Calor" (C) con 4 % y "Mucho Calor" (MC) con 4 %. La mayor cantidad de datos, el 84 %, se registró en el interior de las viviendas, seguido de un 15 % en las aulas y 1 % en el tambo y puesto de vigilancia.

Respecto a la preferencia térmica, a través de las encuestas presenciales, un mayor porcentaje de encuestados, el 79 %, indicó preferir ambientes más cálidos, el 15 % prefirió sin cambios y el 6 % ambientes más fríos.

Análisis de la temperatura. En el análisis de la temperatura, se consideró la temperatura interior (T_i) y exterior (T_e), clasificando la información según el tipo de actividad [16]. Para establecer la temperatura

neutral (T_n) y los rangos de bienestar, se analizó una base de 365 observaciones, calculando la temperatura media (T_i) y la desviación estándar (σ) para determinar los estratos de sensación térmica (VST=MF, F, N, C, MC), donde 303 observaciones corresponden a los TSVR y 62 observaciones son de las encuestas.

La zona reducida se refiere a un rango de temperatura que se calcula utilizando la temperatura mínima (T_i) ajustada por una desviación estándar (σ), es decir, ($T_i \pm \sigma$). Esto permite identificar un intervalo más estrecho donde se espera que se encuentren las temperaturas más comunes o representativas.

Por otro lado, la zona extensa se refiere a un rango más amplio, calculado como ($T_i \pm 2\sigma$). Este intervalo incluye temperaturas que son menos frecuentes, pero que aún pueden ocurrir, proporcionando una visión más amplia de las variaciones térmicas en el entorno.

Ambas zonas son útiles para evaluar el bienestar térmico, ya que permiten entender no solo las condiciones promedio, sino también las fluctuaciones que pueden afectar el confort de los habitantes del poblado altoandino. La figura 4 muestra la regresión lineal [17] entre el VST y la temperatura interior.

Respecto a la influencia del género, la T_n fue de 10,62 °C para hombres y 10,86 °C para mujeres. El rango de la ZE y ZR fue menor para mujeres (16,69 °C ZR y 8,35 °C ZE) que para hombres (19,63 °C ZR y 9,81 °C ZE), indicando que los hombres son más tolerantes a temperaturas más bajas y las mujeres a temperaturas más altas. En la zona extendida (ZE), los valores de ZE fueron menores para las mujeres en comparación con los hombres. Para las mujeres, el rango fue de 2,52°C (mínima) a 19,21°C (máxima), mientras que para los hombres fue de 0,80°C (mínima) a 20,43°C (máxima). Esto indica que las mujeres presentan mayor tolerancia a temperaturas más altas, mientras que los hombres son más tolerantes a temperaturas más bajas.

Los datos por tipo de actividad se clasificaron según la norma ISO 7730 [1], considerando actividad pasiva (< 1,2 met) y actividad moderada (> 1,3 met y ≤ 2,6 met) [11].

La figura 4, mostrada a continuación presenta la regresión lineal entre el voto de sensación térmica y las temperaturas: mínima extensa (línea gris), mínima reducida (línea roja), temperatura promedio (línea azul), máxima reducida (línea verde) y máxima extensa (línea morada). Las líneas no son paralelas, y

también se incluyen las regresiones lineales correspondientes.

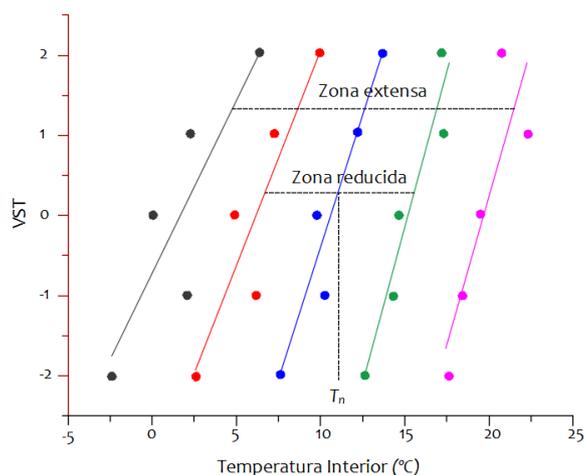


Fig. 4. Valores promedio de la temperatura interior del total de datos.

TABLA I

Rangos de temperatura interior [en °C] con el total de datos de las encuestas y una clasificación según tipo de actividad

TEMPERATURA	TOTAL	ACTIVIDAD PASIVA (°C)	ACTIVIDAD MODERADA (°C)
Mínima ZE T_{min} , ZE	1,67	1,18	0,13
Mínima ZR T_{min} , ZR	6,21	5,72	4,67
Neutral T_n	10,74	10,25	9,20
Máxima ZR T_{max} , ZR	15,28	14,79	13,74
Máxima ZE T_{max} , ZE	19,82	19,33	18,28

El proceso de cálculo de la temperatura neutral (T_n) y los valores máximos y mínimos de la Zona Reducida (ZR) y Zona Extendida (ZE) es similar al realizado para el total de datos [3].

La T_n se ve afectada por la temperatura exterior (T_e). Para el total de datos, se analizó la relación entre la T_e mensual y la temperatura interior (T_i). A partir de esta correlación lineal, se identificaron la ZR y la ZE, utilizando una desviación estándar (σ) de 4,88 °C.

La ecuación $T_n = 0,46 T_e + 7,00$ representa la correlación lineal entre los valores neutrales de T_i [2]. Con esta ecuación y la misma desviación estándar de

4,88 °C, se determinaron los rangos de temperatura de 9,76 °C para la ZR y 19,52 °C para la ZE.

Los resultados muestran que la preferencia térmica de los pobladores está influenciada por factores tanto interiores como exteriores, y que los valores de temperatura media están fuertemente vinculados a los valores de T_n . Se observa que los encuestados tienen preferencia por un rango más amplio de temperaturas.

Análisis de humedad. Para el análisis de la humedad [18], se realizó un análisis similar para los parámetros de humedad relativa interior (HR_i) de los ambientes evaluados.

TABLA II
Rangos de humedad relativa interior [en %] según el tipo de actividad

HUMEDAD RELATIVA	TOTAL	ACTIVIDAD PASIVA	ACTIVIDAD MODERADA
Mínima ZE HR_{min}, ZE	15,31 %	18,32 %	19,24 %
Mínima ZR HR_{min}, ZR	30,51 %	33,09 %	34,51 %
Neutral HR_n	45,72 %	47,87 %	49,79 %
Máxima ZR HR_{max}, ZR	60,92 %	62,64 %	65,07 %
Máxima ZE HR_{max}, ZE	76,12 %	77,41 %	80,34 %

Relación de mezcla. Se refiere a la humedad específica, que se utiliza para evaluar el bienestar térmico en función de la cantidad de vapor de agua presente en el aire. Este enfoque permite entender cómo la humedad influye en la percepción del confort térmico en el contexto específico del poblado altoandino. El procedimiento para estimar la relación de mezcla es análogo al análisis de humedad y temperatura. Para el total de datos, se estima una relación de mezcla neutra (w_n) de 5,98 g / kg (g de agua / kg de aire), con un rango de la ZE de 5,81 g / kg y un rango de la ZR de 2,91 g / kg.

Análisis de actividad. El nivel de actividad se describe mediante la producción metabólica (M), cuya unidad es el *met* (1 *met* = 58,2 W/m²). Se establecieron dos clases de nivel de actividad: actividad pasiva (< 1,2 *met*) y actividad moderada (> 1,2 *met* y ≤ 2,4 *met*), estimadas según la norma ISO 7730. El valor de M se calculó como un promedio ponderado de las actividades realizadas respecto al tiempo. Al contrastar el nivel de vestimenta (I_{cl}) y actividad (M) según el VST, no se observa una tendencia predominante, lo que indica que los pobladores de Kallapuma no varían su vestimenta al realizar actividades moderadas o elevadas.

Análisis de vestimenta. El nivel de vestimenta (I_{cl}) se estima utilizando las tablas de la norma ISO 7730[1]. La unidad del nivel de vestimenta es 1 *clo*, equivalente a un aislamiento de 0,155 m²·K/W [19]. El promedio del nivel de vestimenta para el total de datos es de 1,51 *clo*.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se presentan las propuestas para estimar el confort térmico en Kallapuma y la comparación con datos experimentales de temperatura y humedad relativa. Se proponen áreas de confort térmico trazadas sobre la carta psicrométrica para una altitud de 4 258 msnm, basadas en los rangos de temperatura interior (T_i), humedad relativa interior (HR_i) y relación de mezcla (w_i) determinados.

Se consideran los casos estudiados para el "total de datos" y según el tipo de actividad realizada: "actividad pasiva" y "actividad moderada". Para cada caso, se calcularon la temperatura neutra (T_n), la humedad relativa neutra (HR_n) y la relación de mezcla neutra (w_n), así como los rangos de las zonas de confort ZR y ZE.

Las áreas de confort propuestas se trazaron sobre la carta psicrométrica considerando los límites de temperatura, humedad relativa y relación de mezcla para cada zona. Se definieron cuatro zonas de confort.

Finalmente, los resultados obtenidos se compararon con modelos existentes de confort térmico adaptativo, como los de Humphreys, Griffiths, Auliciems, Nicol y Roaf, y ASHRAE, encontrando similitudes y diferencias en los rangos de confort propuestos para las condiciones específicas de Kallapuma.

4.1 ÁREAS PROPUESTAS DE CONFORT TÉRMICO

En este estudio se establecen cuatro zonas de confort térmico delimitadas por los valores máximos y mínimos de la ZR y la ZE para los parámetros de temperatura interior (T_i), humedad relativa interior (HR_i) y relación de mezcla interior (w_i) [3].

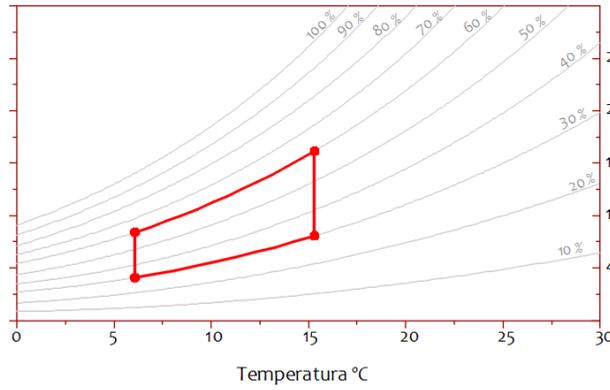
La zona 1 (Z1) tiene como fronteras los valores mínimos y máximos de la ZR tanto de temperatura como de humedad relativa: $T_{min}, ZR, T_{max}, ZR, HR_{min}, ZR$ y HR_{max}, ZR .

La zona 2 (Z2) tiene como fronteras los valores mínimos y máximos de la ZE de temperatura y humedad relativa.

La zona 3 (Z3) tiene como fronteras los valores mínimo y máximo de la ZR de temperatura y los valores mínimo y máximo de la ZE de humedad relativa.

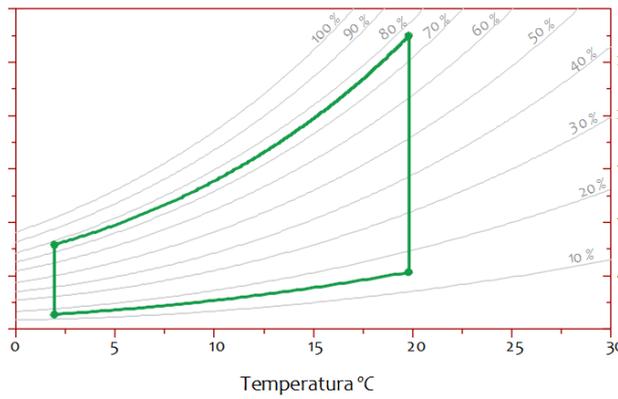
La zona 4 (Z4) tiene como fronteras los valores mínimo y máximo de la ZR de temperatura ($T_{min, ZR}$ y

$T_{max, ZR}$) y los valores mínimo y máximo de la ZE de relación de mezcla ($w_{min, ZE}$ y $w_{max, ZE}$).



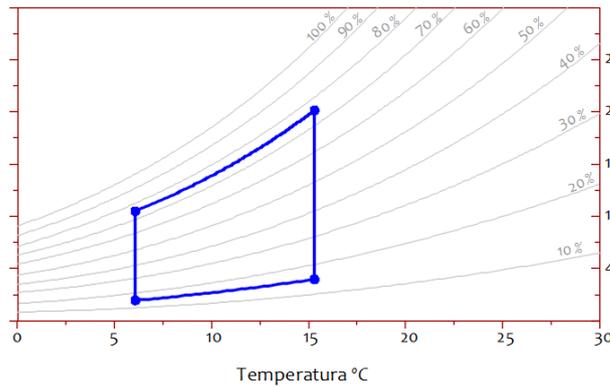
$T_{min ZR}$ 6,21 °C
 $T_{max ZR}$ 15,28 °C
 $HR_{min ZR}$ 30,51 %
 $HR_{max ZR}$ 60,92 %
Zona 1
 $6,21 °C \leq T \leq 15,28 °C$
 $30,51 \% \leq HR \leq 60,92 \%$

Fig. 5. Zona de confort identificada Z1.



$T_{min ZE}$ 1,67 °C
 $T_{max ZE}$ 19,83 °C
 $HR_{min ZE}$ 15,31 %
 $HR_{max ZE}$ 76,12 %
Zona 2
 $1,67 °C \leq T \leq 19,83 °C$
 $15,31 \% \leq HR \leq 76,12 \%$

Fig. 6. Zona de confort identificada Z2.



$T_{min ZR}$ 6,21 °C
 $T_{max ZR}$ 15,28 °C
 $HR_{min ZE}$ 15,31 %
 $HR_{max ZE}$ 76,12 %
Zona 3
 $6,21 °C \leq T \leq 15,28 °C$
 $15,31 \% \leq HR \leq 76,12 \%$

Fig. 7. Zona de confort identificada Z3.

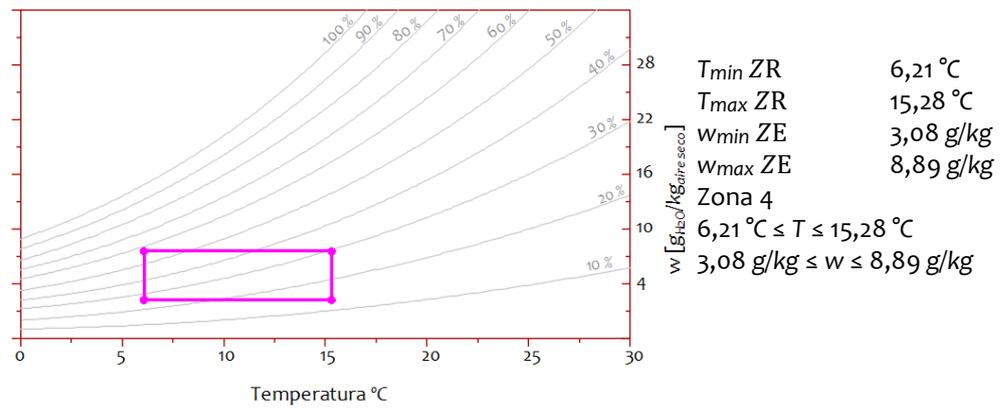


Fig. 8. Zona de confort identificada Z4.

Por tipo de actividad, se establecieron dos categorías de nivel de actividad para los habitantes de Kallapuma, la actividad pasiva menor o igual a 1,2 met y la actividad moderada, mayor a 1,2 met y menor o igual a 2,4 met.

Los resultados muestran que los rangos de confort térmico para la actividad moderada son más

amplios en comparación a los rangos obtenidos para la actividad pasiva. Esto se debe probablemente a que la actividad física genera una mayor producción de calor metabólico, ampliando el rango de temperaturas que los individuos pueden considerar confortables.

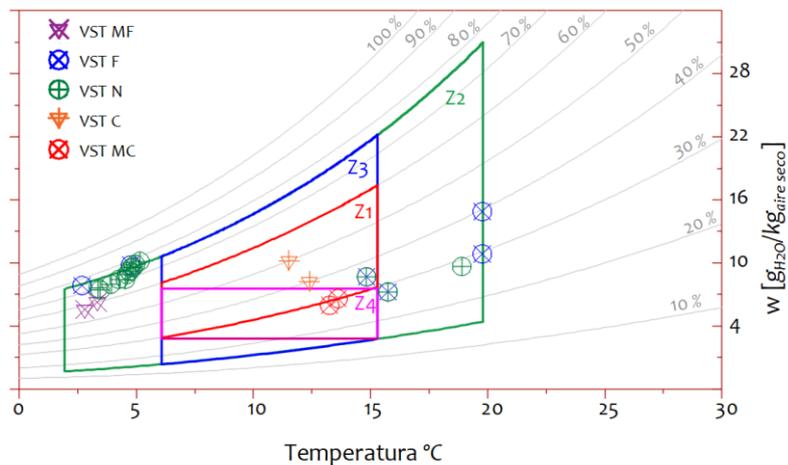


Fig. 9. Cantidad de respuestas dentro de las 4 zonas de confort propuestas en Kallapuma según el VST para la actividad pasiva.

En el caso de la actividad pasiva, se observa que hay un mayor número de respuestas para el voto de sensación térmica (VST) igual a "Neutro" (N), con 17 datos. La zona 2 (Z2) tiene un mayor número de respuestas en comparación a las otras zonas, debido especialmente a que posee un rango más amplio de temperatura.

También se presentan las otras respuestas del VST (Muy Frío, Frío, Calor y Mucho Calor) junto a las zonas propuestas. Muchas de estas respuestas se ubican dentro de las zonas de confort, sobre todo para el VST=N con más datos dentro de la Z2 y Z3.

Se introduce el parámetro del nivel de vestimenta (I_{cl}) para analizar si las respuestas del VST se vieron

afectadas por la ropa que vestían las personas durante la evaluación. La Z2 es la que mayor cantidad de datos posee y comprende el rango de $1,2\text{ clo} < I_{cl} \leq 1,5\text{ clo}$.

En el caso de la actividad moderada, se observa que hay un mayor número de respuestas para VST=F (13 datos) y la Z2 tiene un mayor número de respuestas en comparación a las otras zonas, nuevamente debido a su rango más amplio de temperatura. Se presentan las otras respuestas del VST junto a las zonas propuestas, y muchas se ubican dentro de las zonas de confort, sobre todo para VST=N con más datos en la Z2.

Se introduce también el parámetro del nivel de vestimenta (I_{cl}), y la Z2 es la que mayor cantidad de datos posee, comprendiendo el rango de $1,5\text{ clo} < I_{cl} \leq 2,0\text{ clo}$.

En ambos casos, tanto para actividad pasiva como moderada, la Z2 tiene el mayor porcentaje de datos experimentales al tener rangos más amplios de temperatura y humedad relativa, seguida de la Z3, la Z1 y en menor medida la Z4. Se cuenta con mayor información registrada para respuestas de VST=F y N, y menor número de datos para VST=MC, C y MF.

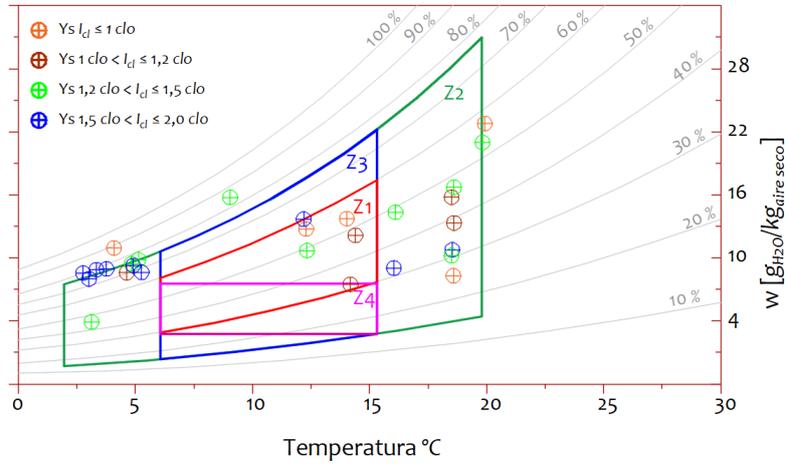


Fig. 10. Análisis de las respuestas del VST obtenidas dentro de las zonas propuestas y según el valor de I_{cl} para la actividad pasiva.

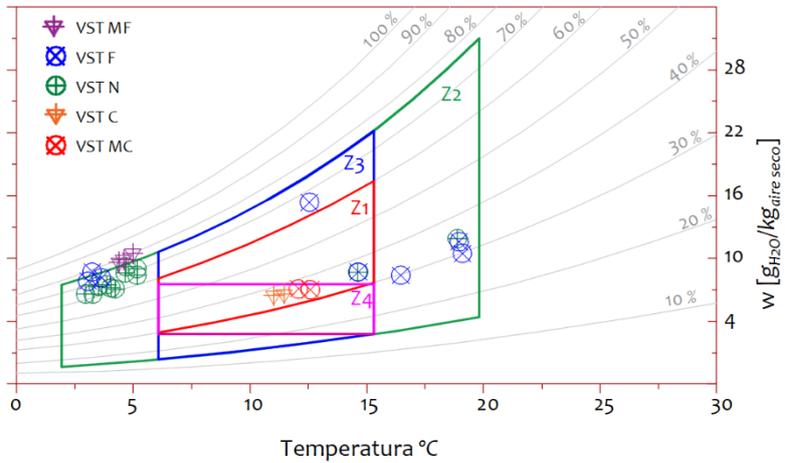


Fig. 11. Cantidad de respuestas dentro de las 4 zonas de confort propuestas en Kallapuma según el VST para la actividad moderada.

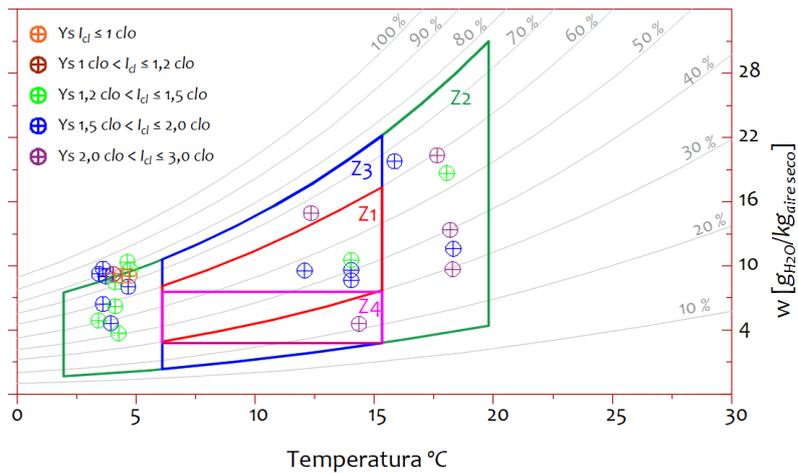


Fig. 12. Análisis de las respuestas del VST obtenidas dentro de las zonas propuestas y según el valor de I_{cl} para la actividad moderada.

4.2 COMPARACIÓN CON MODELOS EXISTENTES

Entre los modelos de temperatura adaptativa existentes, las temperaturas neutras (T_n) para personas con trabajo sedentario en su entorno habitual, usando ropa de su elección, se desarrollaron para rangos de T_n entre 17 °C y 30 °C.

Al comparar las propuestas de T_n hechas en este estudio para Kallapuma con otros modelos, se observa que:

Las propuestas de Humphreys [20] y Griffiths [21] son más cercanas a la propuesta "total de datos" en Kallapuma. Se podría interpretar que el modelo de Humphreys [20] podría usarse para valores bajos de T_n (menores a 17 °C), aunque sin considerar una clasificación por nivel de actividad.

Las propuestas de ASHRAE [22], Auliciems, Nicol y Roaf no representan adecuadamente la temperatura de neutralidad en Kallapuma, ya que obtendrían valores de T_n más altos en comparación a los determinados en este trabajo.

Para los pobladores de Kallapuma, la temperatura estaría sobrevalorada si se calcula T_n en base a esos modelos generales, ya que ellos están aclimatados a temperaturas más bajas.

En la tesis de Jessica Molina titulada "Análisis y evaluación del bienestar térmico en el entorno de un poblado altoandino", realizada en Imata (4 500 msnm al sur del Perú) [23], se definen por primera vez rangos de bienestar térmico aceptables para una zona altoandina, proponiendo 4 zonas de confort en función de los parámetros de temperatura, humedad relativa y relación de mezcla.

En rangos de temperatura, en la Zona 1, la tesis de Molina presenta un rango de temperatura ligeramente más alto, lo que sugiere condiciones más cálidas para el confort óptimo en el entorno altoandino. En la Zona 2, el rango de temperatura en la tesis de Molina es más restringido esto indica una mayor variabilidad en las condiciones aceptables en Kallapuma. De acuerdo a la humedad relativa, la Zona 1, es bastante similar, mostrando una coincidencia en las condiciones óptimas. En la Zona 2, la tesis de Molina tiene un rango más específico para la humedad, lo que podría indicar una mayor sensibilidad al confort térmico. En la relación de mezcla, ambos estudios presentan rangos similares; sin embargo, el rango en la tesis de Molina es más

amplio. Esto sugiere que hay una mayor variabilidad permitida en el entorno altoandino.

La comparación entre ambos estudios revela diferencias significativas en los rangos establecidos para cada zona de confort térmico. Estas variaciones pueden ser atribuibles a factores climáticos locales y características específicas del entorno estudiado. La tesis de Molina tiende a establecer rangos más amplios y cálidos para las zonas óptimas y aceptables. Además, resalta la importancia de considerar múltiples parámetros (temperatura, humedad y relación de mezcla) para obtener una evaluación más completa del confort térmico en diferentes contextos geográficos y climáticos.

En resumen, los modelos de confort térmico adaptativo desarrollados en otras regiones no se ajustan adecuadamente a las condiciones climáticas y de aclimatación de las poblaciones altoandinas del Perú, siendo necesario desarrollar modelos específicos para estas zonas, como el propuesto en la tesis de Molina en Imata.

CONCLUSIONES

En la medición de parámetros cuantitativos, se analizaron la temperatura interior (T_i), exterior (T_e), humedad relativa (HR_i) y relación de mezcla (w_i), considerando el total de datos, por género y por tipo de actividad. Se estableció la temperatura neutral (T_n) [24] y los rangos admisibles de confort, utilizando la desviación estándar como medida de dispersión de las respuestas del voto de sensación térmica (VST).

Para los pobladores realizando actividad pasiva (menor a 1,2 met), la temperatura de confort óptima al interior de los ambientes evaluados es de 10,25 °C. Para personas realizando actividad moderada (mayor a 1,3 met y menor e igual que 2,6 met), la temperatura interior óptima de confort es de 9,20 °C.

Sin considerar el tipo de actividad, la temperatura neutral obtenida fue de 10,74 °C. Al incluir el género, se identificó que los hombres son ligeramente más tolerantes al frío que las mujeres, con una T_n de 10,62 °C para los hombres y 10,86 °C para las mujeres.

En la medición de parámetros cualitativos mediante el análisis del VST, el voto predominante de los datos de los dispositivos fue el de "Frío" (F) con 34%, seguido de "Neutro" (N) con 31%, "Muy Frío" (MF) con 26%, "Calor" (C) con 4% y "Mucho Calor" (MC) con 4%.

El voto predominante en las encuestas fue el de "Neutro" (N) con 54%, seguido de "Frío" (F) con 39%, "Muy Frío" (MF) con 7%, "Calor" (C) y "Mucho Calor" (MC) con 0% para los ambientes interiores y exteriores.

En relación con el voto de preferencia térmica, realizado mediante encuesta, un mayor porcentaje de encuestados indicó una preferencia térmica de más caliente (MC+). El 79 % de personas prefieren ambientes más calientes, el 15 % consideraron ambientes sin cambios y el 6 % ambientes más fríos, lo que sugiere que los pobladores de Kallapuma se encuentran satisfechos con las condiciones interiores de los recintos donde se hallaban, pero desean ambientes más cálidos.

La temperatura interior de confort es condicionada por la temperatura exterior. La correlación lineal entre T_i y T_e , expresada en la ecuación $T_n = 0,46 T_e + 7,00$, no permitió evaluar la neutralidad térmica debido a la amplia dispersión de datos. Debido a la limitante de datos por tipo de actividad, no se pudo hallar las ecuaciones para actividad pasiva y moderada.

Referente al nivel de vestimenta (I_{cl}), el promedio de todos los datos sin considerar el tipo de actividad fue de 1,51 I_{cl} , lo que indica que la ropa empleada por los encuestados es no tradicional y con escasas modificaciones durante todo el año. Realizar una actividad pasiva a moderada no es un factor para el cambio de vestimenta. Además, se indica que la población encuestada mayormente fue escolar, los cuales emplean un uniforme escolar donde, a pesar de las bajas temperaturas, no utilizaban prendas extras.

Se logró establecer los parámetros de confort y se identificaron zonas de confort que permitirán evaluar el confort térmico de los pobladores de Kallapuma. Estos diagramas fueron elaborados sobre las gráficas psicrométricas para una altitud de 4 258 msnm.

Se identificó la temperatura neutral donde las temperaturas mínima y máxima determinaron la ZR; mientras las temperaturas mínima extensa y máxima extensa determinaron la ZE. Para ello, se propusieron 4 zonas de comodidad térmica trazadas sobre la carta psicrométrica en base a los rangos de T_i , HR_i y w_i determinados para el total de datos y el tipo de actividad pasiva y moderada. Estos límites identificados servirán para marcar zonas de confort en el diagrama psicrométrico.

Las cuatro zonas varían con relación al tipo de actividad de los pobladores de Kallapuma. La zona 2 es la que abarca mayor cantidad de datos, teniendo un mayor rango de temperatura y humedad. Muchas de las respuestas para los datos del VST de frío y calor se ubicaron dentro de las 4 zonas, lo que indica que los pobladores de Kallapuma pueden distinguir 3 estados de sensación térmica: mucho frío, neutro y mucho calor. Estas respuestas también están relacionadas con el valor de I_{cl} , pero por la falta de información no existe un patrón definido.

Con los registros de T_e y HR_e , se confirma que no existen meses cálidos, y en invierno el clima es frío con temperaturas bajas, coincidiendo con la época de las heladas entre junio y agosto. Los meses menos fríos corresponden a los meses de octubre a marzo, mientras que los meses lluviosos son de diciembre a marzo. Existen relaciones significativas entre estos meses y las condiciones de temperatura y humedad exterior; durante los meses lluviosos, la humedad tiende a aumentar, lo que puede influir en la percepción del confort térmico. En contraste, los meses menos fríos presentan temperaturas más agradables, pero también pueden estar asociados con un aumento en la actividad de heladas en las noches. Por lo tanto, incluso en meses que son más cálidos, las noches pueden ser lo suficientemente frías como para generar heladas, lo que representa un riesgo para la población.

Esta investigación, en concordancia con la tesis de Molina [3], es la primera en estudiar los rangos de confort en zonas altoandinas, siendo un precedente para futuras investigaciones en zonas altoandinas del Perú. De esta manera el trabajo busca comprobar y validar su aplicación en otro contexto altoandino.

Identificar la temperatura neutral y los rangos de confort en Kallapuma permitirá hacer mediciones experimentales, análisis energético y aplicar soluciones bioclimáticas al interior de las viviendas y demás edificaciones, permitiendo acudir a estrategias pasivas, estrategias de calentamiento solar activo o calefacción convencional para lograr condiciones óptimas de confort térmico al interior de las edificaciones en regiones con condiciones climáticas similares.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con la financiación del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (CONCYTEC), por medio del contrato 04-2018-FONDECYT-BM-IADT-MU: "Desarrollo de sistemas de calefacción solar para zonas altoandinas como una

opción energética sostenible para mejorar la calidad de vida de los pobladores”.

M.L.G.P - agradece al CONCYTEC por la financiación otorgada.

REFERENCIAS

[1] ISO 7730:2005. *Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2005.

[2] G. Azpeitia et al., “El confort térmico, dos enfoques teóricos enfrentados”, *Palapa*, vol.02, no. 01, pp. 45-57, 2007. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/948/94820107.pdf>

[3] J.R. Molina, “Análisis y evaluación del bienestar térmico en el entorno de un poblado altoandino”, Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería Mecánica, Lima, Perú, 2022. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/20.500.14076/26771>

[4] A. Auliciems y S. Szokolay, *Thermal comfort*. Queensland, Australia: Passive and Low Energy Architecture International and Department of Architecture, University of Queensland, 2007. [En línea]. Disponible: <https://www.plea-arch.org/wp-content/uploads/PLEA-NOTE-3-THERMAL-COMFORT.pdf>

[5] C. Dávila y E. Menacho, “Influencia de el Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en la ocurrencia de heladas en el altiplano peruano,” *Anales Científicos*, vol.79, no.01, pp. 70-80, 2018, doi: 10.21704/ac.v79i1.1142

[6] Presidencia del Consejo de Ministros, “Plan Multisectorial ante Heladas y Frijaje,” 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.gob.pe/institucion/pcm/informes-publicaciones/276694-plan-multisectorial-ante-heladas-y-frijaje-2017>

[7] Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, “Escenarios de riesgo por heladas y friajes en el marco del Plan Multisectorial Multianual 2019-2021,” 2018. [En línea]. Disponible: <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/7102>

[8] Organización Mundial de la Salud, “Directrices de la OMS sobre la vivienda y salud,” 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.who.int/es/publications/i/item/WHO-CED-PHE-18.10>

[9] C.H. Chávez Salazar y E. Zea Rayme, “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 licenciatura, Escuela de Posgrado - Gobierno y Políticas Públicas, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2023. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/26301>

[10] C. A. León, “Criterios de confort ambiental y su incidencia en la optimización del espacio público recreativo de la urbanización California, distrito Víctor Larco, Trujillo,” Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Cesar Vallejo, Lima, Perú, 2018. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/11780>

[11] ASHRAE, 2013 *ASHRAE Handbook Fundamentals*. Atlanta, GA: Handbook Editor, 2013.

[12] M. Beltrán et al., “Analysis of the bioclimatic strategies used by Frank Lloyd Wright in the Jacobs I house,” *Informes de la construcción*, vol. 69, no. 547, pp. e213, Oct. 2017, doi: 10.3989/ic.16.156

[13] Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social, “Tambo Kallapuma”, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.pais.gob.pe/tambook/principal/tambos/19802>

[14] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, “Climas del Perú: Mapa de Clasificación Climática,” Ago. 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.gob.pe/institucion/senamhi/informes-publicaciones/2158106-climas-del-peru-mapa-de-clasificacion-climatica>

[15] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, “Atlas de heladas del Perú,” 2010. [En línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/359>

[16] J. Cervantes, *Arquitectura y Confort Térmico: Teoría, Cálculo y Ejercicios*. México City: Plaza y Valdés, 2012.

[17] D. Cardona et al., “Inferencia estadística-Módulo de regresión lineal simple,” *Documentos de Investigación*, no. 147, pp. 5-52, oct. 2013, doi: 10.48713/10336_10447

[18] P. Sánchez, “Comparativa de análisis climático para estrategias de diseño mediante simuladores y carta psicrométrica de Givoni,” *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 10, no. Especial 2, pp. 148-154, 2022, doi: 10.29057/icbi.v10iEspecial2.8692

[19] M. Campano, “Confort térmico y eficiencia energética en espacios con alta carga interna climatizados. Aplicación a espacios docentes no universitarios en Andalucía,” Tesis de Doctorado, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2015. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/11441/30632>

[20] M. Humphreys y J. Fergus, “Outdoor Temperature and Indoor Thermal Comfort: Raising the Precision of the Relationship for the 1998 ASHRAE Database of Field Studies,” *ASHRAE Transactions*, vol. 206, pp. 485-492, 2000. [En línea]. Disponible: https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_12979.pdf

[21] W. Sobczyk y E. Sobczyk, “Thermal comfort in a passive solar building,” *Earth and Environmental Science*, vol. 214, ene., 2019, doi: 10.1088/1755-1315/214/1/012069

[22] R. de Dear y G. Shiller, “Developing an adaptive model of thermal comfort and preference,” *ASHRAE Transactions*, vol. 104, no. 1, ene., 1998. [En línea]. Disponible: <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>

[23] J. Molina et al., “A low-cost measurement device for recording perceptions of thermal comfort,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1433, no. 01, pp. 012006, may., 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1433/1/012006

[24] J.C. Rincón et al., “Modelos matemáticos para estimar el confort térmico adaptativo en espacios interiores,” *Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán*, vol. 24, no.01, feb.2020. [En línea]. Disponible: <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/186>



Los artículos publicados por la TECNIA se distribuyen bajo la licencia de uso Creative Commons (CC BY 4.0). Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo tecnia@uni.edu.pe