

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Escuela de Posgrado

**MAESTRÍA EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN GESTIÓN
AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE**

**EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO EN UNA
HABITACIÓN CON SISTEMA DE CALEFACCIÓN
SOLAR ACTIVO EN LA ZONA ALTOANDINA
DE TACNA - 2024**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. JOHN ALFREDO CHUQUIMIA LÓPEZ

Para optar el Grado Académico de:

**MAESTRO EN CIENCIAS (*MAGISTER SCIENTIAE*) CON
MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO
SOSTENIBLE**

TACNA – PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Escuela De Posgrado

MAESTRÍA EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE

EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO EN UNA HABITACIÓN CON SISTEMA DE CALEFACCIÓN SOLAR ACTIVO EN LA ZONA ALTOANDINA DE TACNA - 2024

Tesis sustentada y aprobada el 11 de diciembre del 2025; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE


:
Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez

SECRETARIO


:
Dr. Gregorio Pedro Tejada Monroy

MIEMBRO


:
Dr. Carlos Armando Polo Bravo

ASESOR


:
Dr. Carlos Armando Polo Bravo

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **Dr. Carlos Armando Polo Bravo**, en mi condición de asesor acreditada con Resolución de Escuela de Posgrado N° 14676-2024-ESPG/UNJBG 25 de octubre de 2024, del trabajo de tesis titulado: "EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO EN UNA HABITACIÓN CON SISTEMA DE CALEFACCIÓN SOLAR ACTIVO EN LA ZONA ALTOANDINA DE TACNA - 2024", presentado por **John Alfredo Chuquimia López**, para optar el Grado Académico de **Maestro en Ciencias (Magister Scientiae) con Mención en Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible**

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 1 %.

Por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis y está de acuerdo al nivel PERMITIDO, para continuar con los trámites correspondientes.

Se emite el presente certificado a solicitud del interesado con fines de continuar con los tramites respectivos para la obtención del Grado Académico de **Maestro en Ciencias (Magister Scientiae) con Mención en Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible**.

Tacna, 30 de diciembre 2025

FIRMA ASESOR
Nombre y apellidos

.....
Carlos Armando Polo Bravo
DNI: 00476069



FIRMA TESISTA
Nombre y apellidos

.....
John Alfredo Chuquimia López
DNI: 46911787



DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación con todo mi cariño:

A mis padres Justina y Gumercindo

A mis hermanas Lidia, Yovana y Susy

A mi hermano Lucio

A mi sobrina Gianella

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor Dr. Carlos Polo Bravo, por su amplio apoyo, orientación y motivación para la elaboración de la presente tesis de maestría, resaltando su gestión del transporte hacia Kallapuma, un apoyo logístico sin el cual esta investigación no hubiera sido posible.

A mi Co-asesora. Dra. Mónica Gómez León de la Universidad Nacional de Ingeniería quien me ha brindado las facilidades para estudiar el Sistema de Calefacción Solar Activo (SCSA), el cual formó parte de uno de sus proyectos de investigación. Agradezco también su apoyo para el empleo de las herramientas necesarias para su evaluación.

A mis amigos Edgar Coaquira y Freddy Estalla, especialistas en sistemas solares, por acompañarme y asistirme en cada etapa de la evaluación del SCSA.

A mis amigos de la maestría que me acompañaron en los diferentes viajes hasta el centro poblado de Maure - Kallapuma.

Al Sr. Edwin, gestor del Tambo Kallapuma, y al Sr. Tomas, por su amable disposición al facilitarme el acceso a las habitaciones para la realización de este estudio.

A toda la comunidad del Centro Poblado Maure - Kallapuma por permitirme realizar mis trabajos de investigación en la zona.

Al proyecto 04-2018-FONDECYT-BM-IADT-MU de la Universidad Nacional de Ingeniería.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	14
ABSTRACT.....	15
INTRODUCCIÓN	16
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	19
1.1 Identificación del problema	19
1.2 Formulación del problema.....	20
1.2.1 El problema principal	20
1.2.2 Problemas específicos	20
1.3 Justificación e importancia de la investigación	20
1.3.1 Justificación social	20
1.3.2 Justificación económica	21
1.3.3 Justificación técnica-ambiental	21
1.3.4 Justificación académica.....	21
1.3.5 Importancia de la investigación.....	22
1.4 Objetivos.....	22
1.4.1 Objetivo general	22
1.4.2 Objetivos específicos.....	22
1.5 Hipótesis	22
1.5.1 Hipótesis general	22
1.5.2 Hipótesis específicas	23
1.6 Variables.....	23
1.6.1 Identificación de las variables	23
1.6.2 Definición conceptual de las variables.....	23
1.6.3 Definición operacional de las variables.....	24
1.6.4 Operacionalización de las variables	25
1.7 Limitaciones de la investigación	25
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	26
2.1 Antecedentes del estudio	26

2.1.1	Antecedentes internacionales	26
2.1.2	Antecedentes nacionales.....	27
2.1.3	Antecedentes regional o local.....	31
2.2	Bases teóricas.....	32
2.2.1	Energía solar.....	32
2.2.2	Sistema de calefacción solar.....	32
2.2.3	Confort térmico	33
2.2.4	Temperatura ambiente.....	33
2.3	Definición de términos	33
2.3.1	Calefacción solar	33
2.3.2	Altoandino	34
2.3.3	Temperatura.....	34
2.3.4	Temperatura ambiente.....	34
2.3.5	Temperatura neutra.....	34
2.3.6	Confort térmico	34
2.3.7	Inercia térmica.....	34
2.3.8	Envolvente.....	34
2.3.9	Random Forest	35
2.4	Marco Filosófico.....	35
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.....		36
3.1	Tipo, nivel y diseño de la investigación	36
3.1.1	Tipo de investigación	36
3.1.2	Nivel de investigación.....	36
3.1.3	Diseño	36
3.2	Población y muestra de estudio	36
3.2.1	Población de estudio.....	36
3.2.2	Muestra de estudio	37
3.3	Acciones y actividades para la ejecución del proyecto	37
3.4	Materiales e instrumentos	38
3.5	Centro Poblado Altoandino de Kallapuma	39
3.6	Tambo Kallapuma	41
3.7	Dormitorio de damas y varones del Tambo Kallapuma	41

3.8	Recolección de parámetros meteorológicos	43
3.9	Recolección de datos de temperatura	43
3.10	Cálculo de la temperatura de confort térmico.....	45
CAPÍTULO IV: RESULTADOS		46
4.1	Sistema de calefacción solar activo	46
4.1.1	Componentes del Sistema de Calefacción solar Activo.....	46
4.1.2	Circuitos del Sistema de Calefacción Solar Activo.....	50
4.1.3	Configuración del Funcionamiento del Sistema de Calefacción Solar Activo	51
4.2	Condiciones climáticas de Kallapuma.....	52
4.2.1	Temperatura Ambiente:.....	52
4.2.2	Irradiancia solar global horizontal.....	55
4.2.3	Humedad relativa	56
4.2.4	Velocidad y dirección del viento.....	57
4.3	Temperatura interior	59
4.3.1	Temperatura del aire en el interior de las habitaciones.....	59
4.3.2	Parámetros meteorológicos y su influencia en la temperatura interior de las habitaciones.....	65
4.4	Temperatura de la envolvente.....	68
4.4.1	Temperaturas superficiales de las paredes	68
4.4.2	Temperaturas superficiales de los pisos	70
4.4.3	Temperaturas superficiales de los techos interiores.....	71
4.4.4	Temperaturas superficiales de las ventanas.....	72
4.5	Confort térmico.....	73
4.5.1	Cálculo del confort térmico	73
4.5.2	Confort térmico durante el primer periodo.....	74
4.5.3	Confort térmico habitacional durante el segundo periodo	81
4.5.4	Confort térmico habitacional durante el tercer periodo	85
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN		93
5.1	Análisis del comportamiento térmico en los tres periodos de evaluación.....	93
5.1.1	Primer periodo (Sin calefacción: julio y agosto de 2024)	93
5.1.2	Segundo periodo (SCSA encendido, sin termostato: diciembre de 2024)....	94

5.1.3 Tercer periodo (SCSA encendido, con termostato: marzo y abril de 2025)	94
5.2 Comparación con estrategias pasivas en zonas altoandinas	95
5.3 Influencia de variables climáticas y justificación del sistema activo	96
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES.....	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXOS	108

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Materiales constructivos del Tambo Kallapuma</i>	43
Tabla 2 <i>Muestras de Estudio y sus Unidades</i>	43
Tabla 3 <i>Puntos de recolección de datos de temperatura y su etiquetado</i>	44
Tabla 4 <i>Temperaturas promedio, máximos y mínimos</i>	54
Tabla 5 <i>Tabla de estadísticas descriptivas de las variables</i>	63
Tabla 6 <i>Tabla estadística de la regresión lineal</i>	64
Tabla 7 <i>Tabla de parámetros de la regresión lineal</i>	64
Tabla 8 <i>Tabla de ANOVA</i>	65
Tabla 9 <i>Resultados del modelo Random Forest</i>	66
Tabla 10 <i>Valores promedio, máximos y mínimos de la pared divisoria</i>	69
Tabla 11 <i>Valores promedio, máximos y mínimos de las paredes expuestas al ambiente</i>	69
Tabla 12 <i>Valores promedio, máximos y mínimos de los pisos</i>	70
Tabla 13 <i>Valores promedio, máximos y mínimos de los techos interiores</i>	71
Tabla 14 <i>Valores promedio, máximos y mínimos de las ventanas</i>	72
Tabla 15 <i>Valores de la temperatura neutra mensual para Kallapuma</i>	73
Tabla 16 <i>Zonas de confort térmico para cada periodo de evaluación</i>	74
Tabla 17 <i>Valores promedio, máximos y mínimos de la temperatura interior en los dormitorios para el mes de julio - 2024</i>	76
Tabla 18 <i>Valores promedio, máximos y mínimos de la temperatura interior en los dormitorios para el mes de agosto - 2024</i>	79
Tabla 19 <i>Valores promedio, máximos y mínimos de la temperatura interior en los dormitorios para el mes de diciembre - 2024</i>	83
Tabla 20 <i>Valores promedio, máximos y mínimos de la temperatura interior en los dormitorios para el mes de marzo - 2025</i>	87
Tabla 21 <i>Valores promedio, máximos y mínimos de la temperatura interior en los dormitorios para el mes de abril - 2025</i>	90

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Estación meteorológica Davis Ventage Pro2.....	38
Figura 2 (a) Datalogger Hobo de 4 canales. (b) Sensor de temperatura TMC20-HD Hobo	39
Figura 3 Centro Poblado de Kallapuma.....	40
Figura 4 Tambo Kallapuma	41
Figura 5 Plano del dormitorio de damas y varones del Tambo Kallapuma	42
Figura 6 Ubicación de los sensores de temperatura dentro de los dormitorios.....	45
Figura 7 (a) Colectores de placa plana, (b) dimensiones de cada colector	46
Figura 8 (a) Termotanque de 750 litros de capacidad, (b) dimensiones del termotanque	47
Figura 9 (a) Estación de trabajo, (b) esquema de la estación de trabajo	48
Figura 10 (a) Radiador instalado en el dormitorio de damas, (b) esquema del radiador	48
Figura 11 (a) Controlador de las bombas de circulación, (b) Esquema de control.....	49
Figura 12 (a) Sistema fotovoltaico (SFV) para alimenta el SCSA, (b) Esquema del SFV	49
Figura 13 Esquema del sistema de calefacción solar activo (SCSA)	50
Figura 14 Registros de la temperatura ambiente de Kallapuma	53
Figura 15 Temperaturas extremas y promedios para Kallapuma	54
Figura 16 Irradiancia solar global horizontal en W/m^2	55
Figura 17 Energía solar mensual acumulada en kW/m^2	56
Figura 18 Humedad relativa para Kallapuma.....	57
Figura 19 (a) Rosa de los vientos diurno y (b) nocturno, para Kallapuma.....	58
Figura 20 Temperaturas interiores en el dormitorio de damas (rojo) y varones (azul). 60	
Figura 21 Comportamiento térmico de la temperatura interior a lo largo de las 24 horas	61
Figura 22 Comportamiento térmico de la temperatura interior durante el día y la noche	62

Figura 23 (a) Regresión lineal entre las temperaturas internas del dormitorio de damas y el dormitorio de varones, (b) Histograma de residuos, (c) Dispersión de residuos.....	63
Figura 24 Validación del modelo de Random Forest, (a) comparación entre valores reales y predichos, (b) distribución de residuos y (c) análisis de homocedasticidad	66
Figura 25 Importancia de las variables meteorológicas	67
Figura 26 Temperaturas superficiales de las paredes interiores	68
Figura 27 Temperaturas superficiales de los pisos	70
Figura 28 Temperaturas superficiales de los techos interiores	71
Figura 29 Temperaturas superficiales interiores de las ventanas	72
Figura 30 Temperaturas internas de los dormitorios para el mes de julio - 2024.....	75
Figura 31 Diagrama de cajas para la temperatura interior en los dormitorios para julio - 2024.....	76
Figura 32 Mapa de calor de los dormitorios para el mes de julio - 2024.....	77
Figura 33 Temperaturas internas de los dormitorios para el mes de agosto - 2024.....	78
Figura 34 Diagrama de cajas para la temperatura interior en los dormitorios para agosto - 2024	79
Figura 35 Mapa de calor de los dormitorios para el mes de agosto - 2024.....	80
Figura 36 Temperaturas internas y superficiales de la pared compartida entre los dormitorios	81
Figura 37 Temperaturas internas de los dormitorios para el mes de diciembre - 2024	82
Figura 38 Diagrama de cajas para la temperatura interior en los dormitorios, diciembre - 2024.....	83
Figura 39 Mapa de calor de los dormitorios para el mes de diciembre - 2024	84
Figura 40 Temperaturas internas y superficiales de la pared compartida entre los dormitorios	85
Figura 41 Temperaturas internas de los dormitorios para el mes de marzo - 2025	86
Figura 42 Diagrama de cajas para la temperatura interior en los dormitorios para marzo - 2025	87
Figura 43 Mapa de calor de los dormitorios para el mes de marzo - 2025	88
Figura 44 Temperaturas internas de los dormitorios para el mes de abril - 2025.....	89

Figura 45 <i>Diagrama de cajas para la temperatura interior en los dormitorios para abril - 2025</i>	90
Figura 46 <i>Mapa de calor de los dormitorios para el mes de abril - 2025</i>	91
Figura 47 <i>Temperaturas internas y superficiales de la pared compartida entre los dormitorios</i>	92
Figura 48 <i>Vista lateral del tambo Kallapuma sin caseta del SCSA</i>	109
Figura 49 <i>Vista lateral del tambo Kallapuma con caseta del SCSA</i>	109
Figura 50 <i>Vista interior del dormitorio de damas del Tambo Kallapuma</i>	110
Figura 51 <i>Vista del radiador instalado en el dormitorio de damas del Tambo Kallapuma</i>	110
Figura 52 <i>Vista interior del dormitorio de varones del Tambo Kallapuma</i>	111
Figura 53 <i>Colectores solares (derecha de la imagen) instalado en el tambo Kallapuma</i>	112
Figura 54 <i>Colectores de placa plana del SCSA</i>	112
Figura 55 <i>Termotanque, estación de trabajo y vaso de expansión</i>	113
Figura 56 <i>Circuito del radiador, conexiones hacia el dormitorio de damas</i>	113
Figura 57 <i>Estación meteorológica Davis instalado en Kallapuma</i>	114

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo general evaluar el confort térmico habitacional bajo la influencia de un sistema de calefacción solar activo (SCSA) en el centro poblado altoandino de Kallapuma a 4266 m.s.n.m, una región caracterizada por condiciones climáticas extremas y heladas persistentes, ya que el 72,3 % de los días evaluados presentaron temperaturas ambientales por debajo de cero. Se realizó un monitoreo continuo desde abril de 2024 hasta mayo de 2025, de los parámetros meteorológicos clave (Temperatura ambiente, irradiancia solar global horizontal, humedad relativa, dirección y velocidad del viento), temperaturas superficiales de las envolventes y la temperatura del aire en su interior de dos dormitorios en el Tambo Kallapuma, utilizando el dormitorio de varones como referencia térmica (control).

La evaluación del confort térmico habitacional se realizó en tres periodos, cada una bajo distintas configuraciones operativas de SCSA instalado en el dormitorio de damas. En el primer periodo (julio y agosto del 2024) el SCSA estuvo completamente apagado; los resultados confirmaron un severo desconfort por frío, registrando 0,0 % del tiempo en la zona de temperaturas conocido como zona confort térmico. En el segundo periodo de evaluación (diciembre de 2024) con el SCSA funcionando, pero sin termostato, condujo a un sobrecalentamiento con temperaturas máximas de 28,1 °C, generando desconfort por exceso de calor. Finalmente, en el tercer periodo de evaluación (marzo y abril de 2025, con la implementación de un termostato de regulación de temperatura en el SCSA, se logró una mejora significativa, manteniendo la temperatura interna dentro de la zona de confort térmico hasta en el 83,89 % del tiempo, validando que un sistema de calefacción solar activo es capaz de proporcionar energía suficiente para mantener la habitación con temperaturas de confort, aunque es importante la implementación de un sistema de control de temperatura (termostato) para evitar problemas de sobrecalentamiento. El análisis de influencia, realizado mediante un modelo de Random Forest, identificó la temperatura ambiente (T_o) como factor más influyente en la temperatura interior de las habitaciones con un 0,489 de importancia.

Palabras clave: Sistema de calefacción solar activo, confort térmico, altoandino, temperatura interna habitacional, temperatura neutra, temperatura ambiente.

ABSTRACT

The main objective of this research was to evaluate the residential thermal comfort under the influence of an Active Solar Heating System (ASHS) in the high Andean village of Kallapuma, located at 4266 meters above sea level (m.a.s.l.). This region is characterized by extreme climatic conditions and persistent frosts, with 72,3 % of the evaluated days presenting outdoor temperatures below zero. Continuous monitoring was conducted from April 2024 to May 2025 on key meteorological parameters (outdoor temperature, global horizontal solar irradiance, relative humidity, wind direction and speed), surface temperatures of the building envelope, and the internal air temperature of two bedrooms in the Tambo Kallapuma. The male bedroom was used as a thermal reference (control).

The evaluation of residential thermal comfort was carried out in three periods, each under different operational configuration of the ASHS installed in the female bedroom. In the first period (July and August 2024), the ASHS was completely off; the results confirmed severe cold discomfort, with 0,0 % of the time spent within the thermal comfort zone temperature range. The second evaluation period (December 2024), with the ASHS operating but without a thermostat, led to overheating with maximum temperatures of 28,1 °C, causing discomfort due to excessive heat. Finally, the third evaluation period (March and April 2025), with the implementation of a temperature-regulating thermostat in the ASHS, achieved a significant improvement, maintaining the internal temperature within the thermal comfort zone for up to 83,89 % of the time. This validates that an active solar heating system can provide sufficient energy to maintain comfortable room temperatures, although the implementation of a temperature control system (thermostat) is important to prevent overheating issues. The influence analysis, performed using a Random Forest model, identified the outdoor temperature (T_o) as the most influential factor on the rooms' internal temperature, with an importance score of 0,489.

Keywords: Active solar heating system, thermal comfort, high Andean, residential internal temperature, neutral temperature, outdoor temperature.

INTRODUCCIÓN

Las zonas altoandinas del Perú, caracterizadas por altitudes superiores a 3500 metros sobre el nivel del mar, albergan aproximadamente 3,5 millones de habitantes que enfrentan condiciones climáticas extremas durante gran parte del año (INEI, 2017). En estas regiones, las temperaturas nocturnas descienden frecuentemente por debajo de 0 °C, generando el fenómeno conocido como la helada que afecta significativamente la salud, bienestar y desarrollo socioeconómico de las comunidades rurales altoandinas. Estudios epidemiológicos han demostrado que la exposición prolongada a bajas temperaturas incrementa la incidencia de infecciones respiratorias agudas, especialmente en los menores de edad y adultos mayores, constituyendo un problema de salud pública de considerable magnitud (Molina et al., 2023).

El confort térmico en edificaciones representa un factor determinante para la habitabilidad y calidad de vida humana, particularmente en condiciones climáticas adversas características de las zonas altoandinas. Se define el confort térmico como la condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico circundante (ISO 7730, Olesen & Parsons, 2002), siendo influenciado por variables ambientales como la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura radiante media (Ponce Gonzales et al., 2021). En zonas altoandinas, la evaluación del confort térmico requiere enfoques adaptativos que consideran las particularidades fisiológicas y culturales de las poblaciones locales, diferenciándose significativamente de los modelos desarrollados para climas templados.

Los sistemas de calefacción solar activo han emergido como una alternativa tecnológicamente viable y ambientalmente sostenible para mejorar las condiciones térmicas en viviendas ubicadas en regiones con alta irradiancia solar y temperaturas extremas. Molina et al. (2019) demostraron que estos sistemas pueden incrementar la temperatura interior de una vivienda en más de 12 °C respecto a la temperatura exterior durante las horas críticas de frío extremo en localidades altoandinas, la tecnología solar térmica aprovecha la abundante radiación solar disponible en zonas altoandinas (Polo Bravo, 2013), donde los valores de irradiancia solar pueden superar los 1100 W/m² en días despejados, proporcionando un recurso energético significativo para aplicaciones de

calefacción (Espinoza Montes, 2013). La implementación de sistemas de calefacción solar en comunidades altoandinas del Perú ha sido objeto de múltiples investigaciones durante la última década (Jiménez et al 2017, Martínez García et al., 2023; Wieser et al., 2023, Cornejo Quispe. 2025). Jiménez et al. (2017) evaluaron sistemas pasivos de calefacción solar en comunidades de cusco, reportando mejoras del 40 – 50 % en condiciones de confort térmico. Simultáneamente, estudios realizados en Arequipa han demostrado la efectividad de diferentes configuraciones de sistemas solares para calefacción de espacios, aunque con limitaciones relacionadas con el control térmico y la regulación automática de temperatura (Molina et al., 2019b).

La integración de sistemas de control termostático en tecnologías de calefacción solar representa un avance significativo para optimizar el confort térmico y evitar fluctuaciones extremas de temperatura. La literatura internacional indica que los sistemas de calefacción solar con control automático pueden lograr ahorros energéticos significativos de hasta un 87,5 % (Thangam et al., 2022). En el contexto nacional, sin embargo, la investigación sobre sistemas de calefacción solar activo con control termostático en zonas altoandinas ha sido limitada, constituyendo una brecha de conocimiento que requiere investigación experimental rigurosa.

El desarrollo de modelos de confort térmico adaptativo específicos para poblados altoandinos ha sido un área ampliamente investigada por Molina et al., (2023), quienes desarrollaron un modelo adaptativo de confort térmico para condiciones de gran altitud, basado en estudio experimentales realizados en Imata, Arequipa a 4500 msnm. Este modelo permite hacer cálculos de las temperaturas de confort de manera directa solo conociendo las temperaturas ambiente promedio mensual.

La aplicación de técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning) para el análisis de variables que influyen en el confort térmico ha ganado relevancia en la investigación científica. Estudios recientes han utilizado algoritmos Random Forest para identificar y cuantificar la importancia relativa de parámetros meteorológicos en el comportamiento térmico de edificaciones (Chaudhuri et al., 2017, Guo et al., 2024). Esta metodología permite capturar relaciones no lineales complejas entre variables ambientales y condiciones térmicas en el interior de viviendas.

La zona altoandina de Tacna, ubicada a más de 4000 msnm, presenta características climáticas similares a otras regiones altoandinas del Perú, con temperaturas extremas, alta irradiancia solar y bajas temperaturas nocturnas. El centro poblado de Kallapuma, situado a 4266 msnm, constituye un caso de estudio representativo de las condiciones socioeconómicas y climáticas que caracterizan las zonas altoandinas rurales del país, donde la ausencia de servicios básicos y sistemas de calefacción convencionales intensifica las dificultades asociadas con el clima extremo.

La presente investigación se desarrolla en el contexto de la necesidad urgente de implementar soluciones tecnológicas sostenibles que mejoren las condiciones de habitabilidad en zonas altoandinas del Perú; los resultados de esta investigación contribuyen al conocimiento científico sobre sistemas de calefacción solar activo, su impacto en el confort térmico habitacional y proporcionan evidencia experimental para fundamentar políticas públicas orientadas a mejorar la calidad de vida de poblaciones vulnerables en zonas altoandinas.

En el capítulo I, se identifica y formula el problema de investigación, se detalla su justificación social, económica, técnica-ambiental y académica, así como su importancia; se establecen los objetivos generales y específicos, se plantea la hipótesis general de que el sistema de calefacción solar activo mejora el confort térmico en la habitación del Tambo Kallapuma, junto con las hipótesis específicas, se definen las variables y sus operacionalización, y se mencionan las limitaciones del estudio. En el capítulo II, se desarrollan los antecedentes internacionales, nacionales y locales, las bases teóricas sobre energía solar, calefacción solar y confort térmico, la definición de términos clave y el marco filosófico. El capítulo III aborda la metodología, describiendo el tipo, nivel y diseño de investigación, la población y muestra, los materiales e instrumentos utilizados, la ubicación del centro poblado de Kallapuma y las técnicas para la recolección de datos meteorológicos y de temperatura para el cálculo del confort térmico. En el capítulo IV, se presentan los resultados obtenidos, incluyendo la descripción del sistema de calefacción instalado, las condiciones climáticas de la zona, el análisis de las temperaturas interiores y de la envolvente de la habitación, y la evaluación del confort térmico en los distintos periodos de estudio. Finalmente, en el capítulo V, se discuten los resultados obtenidos, y se culmina con las conclusiones de la investigación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Identificación del problema

La identificación y descripción del problema en la tesis titulada "Evaluación del confort térmico en una habitación con sistema de calefacción solar activo en la zona altoandina de Tacna – 2024" se centra en la necesidad de mejorar las condiciones de confort térmico en las viviendas de la región altoandina, donde las temperaturas extremas y la falta de sistemas de calefacción adecuados afectan la calidad de vida de sus habitantes. En este contexto, el confort térmico se define como el estado mental que expresa la satisfacción con el entorno, involucrando parámetros sociales, psicológicos y físicos (Ledesma Hidalgo & Rivera Lara, 2018). La región altoandina de Tacna, caracterizada por su clima frío y seco, presenta desafíos significativos para el diseño de viviendas que aseguren un ambiente confortable durante los meses más fríos del año (Pari Quispe et al., 2021).

La implementación de sistemas de calefacción solar activo representa una solución potencial para mitigar el impacto de las condiciones climáticas adversas. Sin embargo, la efectividad de estos sistemas depende en gran medida de su integración con estrategias de diseño bioclimático que consideren la orientación, la forma de la vivienda y el uso de materiales locales que mejoren el aislamiento térmico (Carrión Atiaja et al. 2023). En este sentido, se ha evidenciado que el uso de materiales autóctonos, como la totora, puede incrementar significativamente el confort térmico en viviendas sociales en climas similares (Pari Quispe et al., 2021). Además, la investigación sugiere que la falta de un diseño adecuado y la implementación de estrategias pasivas limitan la capacidad de las viviendas para mantener condiciones térmicas óptimas (Betman et al., 2022).

El cambio climático y sus efectos en la temperatura ambiental han intensificado la necesidad de adoptar enfoques sostenibles en la construcción y rehabilitación de viviendas en la zona altoandina (Rojas et al., 2022). La literatura indica que el confort térmico no solo afecta la habitabilidad de los espacios, sino que también tiene implicaciones en la salud y el bienestar de los ocupantes, lo que subraya la importancia de abordar este problema desde una perspectiva integral que incluya tanto el diseño

arquitectónico como la selección de tecnologías de calefacción adecuadas (Gonzales González, 2021; Escobar Carreño et. A., 2023). Por lo tanto, la presente investigación busca evaluar el desempeño de un sistema de calefacción solar activo en el contexto específico de Tacna, con el objetivo de proponer soluciones que mejoren el confort térmico y, en consecuencia, la calidad de vida de sus habitantes.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 El problema principal

¿Cómo impacta el sistema de calefacción solar activo en el confort térmico de una habitación en la zona altoandina de Tacna - 2024?

1.2.2 Problemas específicos

1. ¿Qué variables ambientales influyen en el confort térmico de una habitación en la zona altoandina de Tacna?
2. ¿Cómo se comporta la temperatura interior de una habitación con y sin el sistema de calefacción solar activo en la zona altoandina de Tacna?
3. ¿Cómo varía el confort térmico entre una habitación con sistema de calefacción solar activo y otra sin este sistema en la zona altoandina de Tacna?

1.3 Justificación e importancia de la investigación

1.3.1 Justificación social

El confort térmico es un factor crucial para la salud y el bienestar de las personas. En la zona altoandina de Tacna, donde las temperaturas pueden descender drásticamente, la falta de sistemas de calefacción adecuados puede llevar a problemas de salud, especialmente en poblaciones vulnerables como niños y ancianos (Rojas et al., 2022). La implementación de sistemas de calefacción solar activo no solo mejoraría las condiciones de vida, sino que también contribuiría a la reducción de enfermedades relacionadas con el frío, promoviendo así una mejor calidad de vida (Ledesma Hidalgo & Rivera Lara, 2018). Además, el acceso a un ambiente térmicamente confortable puede influir positivamente en la productividad y el rendimiento académico de los estudiantes en entornos educativos (Ledesma Hidalgo & Rivera Lara, 2018).

1.3.2 Justificación económica

La inversión en sistemas de calefacción solar activo puede resultar en ahorros significativos a largo plazo. Estos sistemas, al utilizar una fuente de energía renovable, pueden reducir la dependencia de combustibles fósiles y, por ende, los costos asociados a la calefacción convencional (Cerrón Contreras, 2024). La literatura sugiere que la implementación de tecnologías sostenibles no solo es económicamente viable, sino que también puede generar empleos en la instalación y mantenimiento de estos sistemas, contribuyendo al desarrollo económico local (Calderón Uribe, 2019). Además, la mejora del confort térmico en las viviendas puede incrementar el valor de las propiedades, lo que representa un beneficio económico adicional para los propietarios (Toala-Zambrano et al., 2021).

1.3.3 Justificación técnica-ambiental

Desde una perspectiva técnica, la investigación aborda la necesidad de integrar soluciones sostenibles en el diseño arquitectónico de viviendas en climas fríos. La calefacción solar activa representa una alternativa eficiente que puede ser adaptada a las características específicas de la región altoandina, minimizando el impacto ambiental (Giraldo & Arango, 2020). La adopción de estas tecnologías no solo contribuye a la mitigación del cambio climático al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también promueve un uso más responsable de los recursos naturales disponibles (Betman et al., 2022). La investigación también puede servir como modelo para otras regiones con condiciones climáticas similares, fomentando la replicabilidad de soluciones sostenibles (López Cañedo et al., 2021).

1.3.4 Justificación académica

Este estudio tiene un valor académico significativo, ya que contribuye al cuerpo de conocimiento existente sobre confort térmico y sostenibilidad en la arquitectura. A través de la evaluación de un sistema de calefacción solar activo, se generarán datos empíricos que pueden ser utilizados en futuras investigaciones y proyectos académicos (Laura Castillo et al., 2018). Además, la investigación puede servir como base para el desarrollo de nuevas metodologías en el diseño de viviendas que prioricen el confort térmico y la eficiencia energética (Castilla et al., 2022). La incorporación de estos temas en el currículo académico puede preparar a futuros arquitectos e ingenieros para enfrentar los

desafíos del cambio climático y la necesidad de construir de manera sostenible (Mascaró Palliser et al., 2016) especialmente en poblados altoandinos donde las condiciones climáticas son críticas para el bienestar.

1.3.5 Importancia de la investigación

La presente investigación es de gran importancia para mejorar la calidad de vida, proteger el medio ambiente y fomentar la sostenibilidad en la zona altoandina de Tacna. Al abordar el confort térmico mediante tecnologías sostenibles, no solo se busca beneficiar a los habitantes, sino también contribuir a la preservación ambiental. Este estudio puede generar conocimiento científico valioso para la implementación de sistemas de calefacción solar activo en otras regiones frías del país, estableciendo un precedente para futuras investigaciones y prácticas en construcción sostenible que integren tanto el bienestar humano como la salud del planeta.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el impacto de un sistema de calefacción solar activo en el confort térmico de una habitación ubicada en la zona altoandina de Tacna - 2024.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Identificar las variables ambientales que influyen en el confort térmico de una habitación en la zona altoandina de Tacna.
2. Medir y comparar la temperatura interior de una habitación con y sin el sistema de calefacción solar activo en la zona altoandina de Tacna.
3. Comparar el confort térmico entre una habitación con sistema de calefacción solar activo y otra sin el sistema de calefacción en la zona altoandina de Tacna.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

El sistema de calefacción solar activo mejora el confort térmico de una habitación en la zona altoandina de Tacna - 2024.

1.5.2 Hipótesis específicas

1. Las variables ambientales que influyen significativamente en el confort térmico de una habitación en la zona altoandina de Tacna son la temperatura exterior, la humedad relativa, y la irradiancia solar.
2. La temperatura interior de una habitación en la zona altoandina de Tacna será mayor con el sistema de calefacción solar activo que sin él.
3. La habitación con sistema de calefacción solar activo tendrá un confort térmico significativamente mayor en comparación con una habitación sin este sistema en la zona altoandina de Tacna.

1.6 Variables

1.6.1 Identificación de las variables

VI: Variable Independiente

Sistema de calefacción solar activo

VD: Variable dependiente

Confort térmico

1.6.2 Definición conceptual de las variables

1.6.2.1 Definición conceptual de la variable independiente

La variable independiente "Sistema de calefacción solar activo" se puede definir conceptualmente como un conjunto de tecnologías que utilizan la energía solar para proporcionar calefacción a espacios cerrados, mediante la captación, conversión y distribución del calor solar. Este sistema se basa en la instalación de colectores solares que absorben la radiación solar y la convierten en energía térmica, la cual es luego transferida a un medio de calefacción, como agua o aire, para su uso en la climatización de ambientes. La eficiencia de estos sistemas depende de diversos factores, incluyendo la ubicación geográfica, la orientación de los colectores y las condiciones climáticas locales (Tavares Silva & Guimarães Sousa, 2020).

1.6.2.2 Definición conceptual de la variable dependiente

La variable dependiente "confort térmico" se define conceptualmente como el estado en el cual un individuo se siente satisfecho con las condiciones térmicas de su entorno. Según la ISO 7730 (2005) y la ASHRAE (Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado), el confort térmico se describe como "la condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico", donde la insatisfacción genera sensaciones de frío o calor. Este concepto involucra una interacción compleja entre factores físicos, como la temperatura, la humedad, la velocidad del viento y la temperatura radiante, además de aspectos psicológicos y sociales que influyen en la percepción individual del confort (Soto-Estrada et al., 2019; Ledesma Hidalgo & Rivera Lara, 2018). Así, el confort térmico no es solo una cuestión de mediciones objetivas, sino también de la percepción subjetiva del entorno por parte del individuo.

1.6.3 Definición operacional de las variables

1.6.3.1 Definición operacional de la variable independiente

En términos operacionales, el "Sistema de calefacción solar activo" se define como un sistema que incluye componentes específicos como colectores solares, un sistema de almacenamiento de calor y un mecanismo de distribución del calor (por ejemplo, radiadores o suelo radiante). Este sistema opera de manera activa, utilizando bombas y controles automatizados para maximizar la captación y el uso de la energía solar, ajustando la temperatura interna de acuerdo a las condiciones externas y a las necesidades de confort térmico de los ocupantes (Erazo-Velasco et al., 2023; Alpaca Rendón, 2022). La implementación de este sistema en la zona altoandina de Tacna, donde las condiciones climáticas pueden ser extremas, permite optimizar el uso de recursos energéticos renovables, contribuyendo a un ambiente más confortable y sostenible (Rodríguez-Muñoz et al., 2018).

1.6.3.2 Definición operacional de la variable dependiente

Desde una perspectiva operacional, el "Confort térmico" se mide a través de diversos parámetros que evalúan la satisfacción térmica de los ocupantes en un espacio determinado. Estos parámetros son la temperatura del aire en el interior de una habitación, la temperatura del aire en el exterior, la humedad relativa y la velocidad del viento (Lalvay Mejía & Romo Zamudio, 2023; López Cañedo et al., 2021).

1.6.4 Operacionalización de las variables

Variable	Dimensión	Indicador
VI: Sistema de calefacción solar activo	Tipo de sistema	Tipo de colector solar (plano, de tubos de vacío)
		Área del colector solar
VD: Confort térmico	Temperatura habitacional	Capacidad del tanque de almacenamiento
		Tipo de fluido caloportador (agua, aire, glicol)
	Temperatura neutra	Temperatura promedio de la habitación
		Rango de temperatura durante el día
		Temperatura ambiente promedio mensual

1.7 Limitaciones de la investigación

La presente investigación se encuentra limitada en su continuidad temporal, ya que los periodos de evaluación no fueron consecutivos en el tiempo. Esta discontinuidad se debió principalmente a la dificultad de acceso a la zona de estudio por ausencia de transporte regular. No obstante, los resultados obtenidos mantienen una significativa validez, dado que el fenómeno central a abordar, las bajas temperaturas extremas, están presente en la zona de manera prácticamente ininterrumpida a lo largo del año.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del estudio

2.1.1 Antecedentes internacionales

Chen et al. (2023) en su estudio “Co-optimization of passive building and active solar heating system based on the objective of minimum carbon emissions” presenta un modelo de simulación colaborativa que integra tecnologías solares pasivas y sistemas de calefacción activa en edificaciones residenciales, con el objetivo de minimizar las emisiones de carbono. Se analizan datos regionales de Tíbet y se optimizan parámetros como la profundidad del espacio solar, los parámetros de la envolvente del edificio y la capacidad del equipo en el sistema activo. Los resultados muestran que la optimización de los sistemas de calefacción solar activa y pasiva puede reducir las emisiones de carbono en un rango de 26,5 % a 50,3 % en comparación con sistemas convencionales de edificación pasiva y calderas. Se concluye que la colaboración entre tecnologías solares pasivas y activas puede ser clave para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de carbono en el sector de la construcción. Este artículo contribuye en diseño de la investigación de mi estudio.

El estudio realizado por Zhai et al. (2023) titulado “Indoor thermal comfort comparison between passive solar house with active solar heating and without active solar heating in Tibetan” examina el rendimiento técnico y económico del sistema de calefacción de invierno de una bomba de calor de fuente de aire asistida por calentador de agua de tubo evacuado solar. Se evalúan tanto los aspectos técnicos como económicos de este sistema híbrido de calefacción, considerando su eficiencia energética y costos asociados. El estudio comparativo entre una casa solar pasiva con la instalación de un sistema de calefacción solar activa y una casa solar pasiva sin renovación arrojó resultados significativos. Durante los 179 días de operación experimental, la casa logró mantener una temperatura interior superior a 14 °C durante 81 días, con un ahorro de 7104 CNY (yuanes) en costos de calefacción. El sistema de calefacción solar activa proporcionó 113,1 kWh, 46,4 kWh y 26,3 kWh de calor a la habitación en días soleados,

nublados y nevados, respectivamente. Además, se observó una distribución de temperatura más uniforme, una mejor humedad relativa y una menor velocidad del viento en la casa experimental en comparación con la casa de control. Estos hallazgos respaldan la conclusión de que la adición de equipos de calefacción activa a una casa solar pasiva puede mejorar significativamente el ambiente térmico interior, la comodidad térmica y lograr ahorros energéticos notables, con un período de recuperación dinámica del sistema de 2,57 años. Este artículo contribuye en la formulación del problema y el diseño de la investigación de mi estudio.

Zheng et al. (2024) En el trabajo de investigación “Performance of the air source heat pump assisted solar heating system combined with PCM floor” se ha investigado la utilización de la calefacción solar debido a su efecto en la disminución del consumo de energía y las emisiones de CO₂. Este estudio se centra en el rendimiento de un sistema de calefacción solar asistido por bomba de calor de aire con suelo de material de cambio de fase (PCM). Los sistemas de calefacción solar con suelo de PCM y suelo radiante convencional se simulan mediante TRNSYS considerando cada uno de los componentes (colector solar, bomba de calor de aire, tanque de almacenamiento de calor, bomba de circulación, etc.). Se selecciona un edificio residencial en Tianjin como caso de simulación para evaluar el consumo de energía, la capacidad de calefacción y el efecto económico. En comparación con un edificio sin suelo de PCM, el consumo de energía del sistema de calefacción solar durante la temporada de calefacción disminuye un 35,7 % y la reducción anual de emisiones de CO₂ aumenta de 1535 kg a 2762 kg. La fracción solar del sistema aumenta del 34,3 % al 60,2 %. El COP (Coeficiente de rendimiento) del sistema de calefacción solar aumenta de 3,49 a 5,43 debido a la reducción del consumo de energía. Además, el suelo de PCM contribuye a un beneficio económico con un ahorro de costos operativos del 28,5 %.

2.1.2 Antecedentes nacionales

El estudio realizado por Molina et al. (2023) titulado “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” investiga el confort térmico de los habitantes jóvenes de Imata, un pueblo rural ubicado a 4500 m de altitud en Perú. Se recopilaron datos a través de encuestas presenciales y dispositivos diseñados para el estudio, centrándose en la

temperatura y humedad relativa en interiores y exteriores. Se construyeron dos módulos de vivienda experimental y se determinaron los requisitos energéticos para alcanzar el confort térmico. Los resultados mostraron que la temperatura media exterior era de 3.7 °C, con mínimas y máximas mensuales de 1,0 °C y 5,3 °C respectivamente. Se utilizó un dispositivo de bajo costo para registrar las sensaciones térmicas de los habitantes, con la cual se encontró que los habitantes de Imata tendían a aumentar el aislamiento térmico usando mantas para mitigar el frío nocturno, ya que las estrategias de calefacción solar pasiva no eran suficientes. Se determinó que se necesitan estrategias adicionales de calefacción, como sistemas solares activos o calefacción eléctrica, para lograr temperaturas interiores confortables. Este artículo contribuye en la formulación del problema y el diseño de la investigación de mi estudio.

Molina Fuertes et al. (2020) en su estudio “Systematic evaluation of the thermal performance of an experimental module of high andean housing to achieve thermal comfort with solar” evaluó experimentalmente el desempeño térmico de un Módulo Experimental de Vivienda en la región Alto Andina a través de doce configuraciones operativas diferentes, incluyendo el uso de sistemas de calefacción solar activos y estrategias pasivas de enfriamiento y calentamiento. Se realizaron mediciones de temperatura y humedad para analizar el confort térmico, con un enfoque en aumentar la temperatura interior en comparación con el exterior. Se emplearon simulaciones dinámicas con el software EnergyPlus, validando los resultados con mediciones reales. Se propuso una doble pared de adobe con fibra de vidrio para incrementar la temperatura interior en 3 °C. Los resultados mostraron un buen acuerdo entre la simulación y los datos experimentales, con un error cuadrático medio del 15-16 %. Se resaltó la importancia del control de infiltraciones para lograr mejoras en el confort térmico. En conclusión, el estudio demostró la eficacia de las simulaciones con EnergyPlus para evaluar y mejorar el desempeño térmico de viviendas en zonas Alto Andinas, ofreciendo soluciones constructivas específicas y resaltando la relevancia del manejo adecuado de los elementos de la vivienda para alcanzar confort térmico. Este artículo contribuye en la formulación del problema y el diseño de la investigación de mi estudio.

Madrigal Cardiel et al. (2023) en su estudio “Diseño y simulación de un sistema de calefacción solar para incrementar la temperatura en una habitación de 100 m³” presenta

el diseño y simulación de un sistema térmico basado en agua para aumentar la temperatura en una habitación de 100 m³. Se utilizó SolidWorks Flow Simulation para analizar la temperatura, considerando la conducción, convección y radiación. Los resultados muestran un incremento de 5 °C en la temperatura del sistema en una hora, pasando de 15 °C a 20 °C. Se destaca que este aumento no fue tan significativo debido al pequeño volumen de los radiadores en comparación con el total del sistema. Se sugiere la adición de más radiadores o la reducción del volumen del sistema para lograr una temperatura ideal. Además, se recomienda el uso de ventiladores silenciosos para aumentar la radiación y la incorporación de aislantes térmicos para reducir la pérdida de calor. Este estudio contribuye en el diseño de la investigación de mi estudio.

Ticona y García (2022) en su estudio "Casa caliente: Diseño de un módulo de vivienda rural bioclimatizado para mejorar el confort térmico en la zona altoandina, Puno - 2021" demuestra que el Módulo de Vivienda Rural Bioclimatizado, diseñado con adobe de la zona y estrategia solar pasiva, logra mejorar significativamente el confort térmico en la zona altoandina de Puno. Los resultados muestran una mejora del 37 % en la temperatura interna respecto a la exterior y del 27 % en comparación con una casa típica de adobe de la región, alcanzando una humedad relativa del 56 %, dentro de los estándares de confort establecidos. Estas conclusiones respaldan la eficacia de este enfoque arquitectónico para proporcionar condiciones habitacionales óptimas en entornos de alta altitud, y sugieren que este tipo de diseño podría ser una alternativa viable y sostenible para mejorar la calidad de vida de las comunidades en zonas altoandinas. Este estudio contribuye en el diseño de la investigación de mi estudio.

El estudio realizado por Mercado Calapuja & Machaca Cutipa (2017) y titulada "Sistema de calefacción solar térmico controlado para mantener el confort térmico en un ambiente de la FIQ" evaluó un sistema de calefacción solar térmico controlado en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano lográndose implementar con éxito las termas solares, alcanzando una temperatura de 80 °C en el agua tras 8 horas de calentamiento, acumulando 135 221,569 KJ de energía calorífica con un flujo de absorción de 4,693 KJ/s y un flujo másico de 19,348 g/s. Estos resultados demostraron una eficiente captación de energía solar y el mantenimiento del confort térmico en el ambiente de estudio. Las recomendaciones finales enfatizaron la

importancia de realizar mediciones precisas, mantener el recinto adecuadamente aislado y continuar investigando sobre la aplicación generalizada de la energía solar. Este estudio validó la viabilidad y eficacia del sistema de calefacción solar térmico controlado para lograr el confort térmico de manera sostenible y eficiente en la Facultad de Ingeniería Química.

Ponce et al. (2021), en su trabajo titulada “Evaluación térmica de modificaciones en las envolventes de módulos experimentales ubicados en el centro poblado de Imata (4519 msnm), Arequipa”, analizaron el aporte térmico y energético de las modificaciones realizadas en dos módulos experimentales de vivienda (M1 y M2) en Imata, Arequipa, a 4519 m.s.n.m. El trabajo estableció una temperatura media exterior de 0,61 °C. El módulo M1, en su estado inicial, registro una temperatura media diaria del aire interior de 3,1 °C. Tras las modificaciones de la envolvente (aislamiento, claraboyas y falso techo), la temperatura media interior de M1 (sin invernadero) alcanzó los 10 °C, un incremento promedio de 6,9 °C, mientras que M2 (con invernadero adosado) alcanzó 14,6 °C. Se cuantificó que el invernadero proporcionó un incremento promedio de 5,17 °C más que M1. Para mantener una temperatura de confort térmico constante de 15 °C (según modelo adaptativo), se estimó que la configuración óptima (M2 con puerta y ventana al invernadero abiertas de 8:00 a 17:00 horas) requería una demanda térmica de 10,29 kWh/día, representando un ahorro energético de 3,94 kWh/día en comparación con M1 en la misma configuración.

Ratache Rojas et al. (2021), en su estudio “Simulación del consumo energético para la calefacción de un módulo de vivienda experimental ubicado a 4500 msnm”, simularon la demanda energética de un módulo experimental de vivienda MEV en Imata, Arequipa a 4500 m.s.n.m. una zona con temperatura ambiente mínima registrada de -14,4 °C en 2019. El estudio se centró en la energía necesaria para mantener una temperatura neutra que varía entre 12 °C en julio y 15 °C en diciembre. La simulación, previamente validada, predijo una demanda energética anual de 3,54 MWh. La demanda energética diaria promedio mensual alcanzó un máximo de 11 kWh en julio (el mes más frío) y un mínimo de 8,7 kWh en diciembre. Los resultados indican la necesidad de priorizar la reducción de pérdidas de calor para mitigar el alto requerimiento energético para alcanzar el confort térmico.

2.1.3 Antecedentes regional o local

Girón (2023) en su estudio “Desarrollo de un modelo de evaluación de parámetros ambientales para lograr el confort térmico al interior de las viviendas en el centro poblado menor de Kallapuma, provincia de Tarata, región Tacna” realizado en el centro poblado menor de Kallapuma, se identificó que la temperatura de neutralidad y el rango de confort térmico para la población de Kallapuma se encuentra por debajo de los valores establecidos en normas internacionales como ASHRAE 55 e ISO 7730. Esto se logró mediante la implementación de un modelo de evaluación de parámetros ambientales que permitió recopilar datos relevantes sobre temperatura interior, humedad relativa, sensación térmica y vestimenta en diversas edificaciones de Kallapuma, a una altitud de 4258 m.s.n.m. Las conclusiones resaltan la importancia de conocer las condiciones específicas de confort térmico y el tipo de población en zonas altoandinas como Kallapuma para favorecer el diseño de inmuebles y la aplicación de estrategias pasivas de acondicionamiento ambiental. Se reconoce la necesidad de ampliar el número de viviendas estudiadas, encuestas realizadas y tiempo de experimentación para obtener resultados más sólidos y confiables.

Polo Bravo (2013) en su estudio titulado “Potencial energético solar y su impacto ambiental en la Región Tacna” ha determinado que la energía solar global incidente anual promedio sobre superficie horizontal en la Región de Tacna es de $(6,04 \pm 0,36)$ kWh/m²·día, equivalente a 0,510 litros de petróleo por metro cuadrado y día. Este valor supera en un 13,46 % el promedio mundial, presenta una variación interanual del 5,8 % y confirma que la región es idónea para cualquier aplicación solar, especialmente en la denominada "franja solar". Asimismo, el trabajo concluye que las zonas andinas poseen un mayor potencial que la costa, registrándose la mayor radiación incidente durante el verano. Asimismo, el estudio evaluó los impactos ambientales de las fuentes energéticas actuales de la región, como las centrales hidroeléctricas de Aricota y el sistema interconectado a combustibles fósiles. Estos impactos fueron calificados como altamente negativos (-), mientras que los de la energía solar resultaron altamente positivos (+). Su adopción ahorraría grandes cantidades de combustibles fósiles y evitaría la emisión de miles de toneladas de CO₂, SO₂ y NxO, facilitando así la planificación de un desarrollo sostenible.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Energía solar

La energía solar se refiere a la radiación solar que puede ser utilizada como una fuente de energía renovable para diversas aplicaciones, incluyendo la generación de electricidad y el calentamiento de fluidos para usos térmicos. La energía solar es considerada una fuente de energía verde, abundante y no agotable que está recibiendo cada vez más atención de la comunidad de investigación debido a su potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover el desarrollo sostenible (Hasanuzzaman, 2022). La energía solar térmica es una tecnología que aprovecha la radiación solar para generar calor. Este calor puede utilizarse para calentar agua en sistemas de calefacción doméstica, para la climatización de edificios. La energía solar térmica se basa en el principio de captar la radiación solar con colectores solares, que convierten la energía solar en calor que puede ser almacenado o utilizado de inmediato. Es una forma limpia y renovable de aprovechar la energía del Sol para cubrir diversas necesidades energéticas (Martínez, 2012).

2.2.2 Sistema de calefacción solar

Un sistema de calefacción solar (SCS) es un sistema que utiliza la energía solar para proporcionar calor a un espacio habitable (calentar aire) o para calentar agua. Estos sistemas incluyen colectores solares para capturar la energía solar, sistemas de almacenamiento de energía térmica y componentes de distribución de calor, como intercambiadores de calor y radiadores (Duffie & Beckman, 2013). Estos sistemas representan una alternativa sostenible que convierte la radiación solar en calor útil, contribuyendo significativamente a la reducción de emisiones de carbono y al uso eficiente de recursos energéticos renovables (Wang et al. 2019). Los SCS se clasifican en dos categorías principales, Sistemas de calefacción solar pasivos y Sistemas de calefacción solar activos.

Sistemas de calefacción solar pasivos (SCSP): Este tipo de sistemas aprovechan directamente la radiación solar mediante elementos arquitectónicos integrados como muros Trombe, ventanas con orientación estratégica y doble vidrio, claraboyas, invernaderos adosados, entre otros. Los SCSP operan sin equipos mecánicos de

circulación forzada, funcionando solo mediante principios físicos como la convección y radiación térmica (Cillari et al., 2021).

Sistemas de calefacción solar activo (SCSA): Este tipo de sistemas incorporan componentes mecánicos para optimizar la captación, transporte y distribución del calor solar. Incluyen colectores solares, bombas de circulación, ventiladores, sistemas de almacenamiento térmico, intercambiadores de calor y unidades de control automatizado. (Kalogirou, 2009). Los SCSA tiene una eficiencia entre el 47 % y 65 % según la configuración del colector (Yu et al., 2022).

2.2.3 Confort térmico

El confort térmico, según la norma ISO 7730 (2005), se define como la sensación de comodidad que experimenta una persona cuando el ambiente que la rodea está en equilibrio con su propio cuerpo. Para que se cumpla, se deben considerar factores como la temperatura, humedad, velocidad del aire, temperatura radiante, nivel de actividad y la ropa.

2.2.4 Temperatura ambiente

La temperatura ambiente se refiere a la temperatura del entorno circundante en el que se encuentra un sistema o dispositivo. En el contexto de los sistemas de energía solar térmica, la temperatura ambiente es un factor importante a considerar, ya que puede afectar el rendimiento y la eficiencia de los componentes que convierten la radiación solar en energía térmica. La temperatura ambiente puede influir en la transferencia de calor, la viscosidad de los fluidos y otros parámetros que impactan en el funcionamiento de los sistemas de energía solar (Manrique, 2019).

2.3 Definición de términos

2.3.1 Sistema de calefacción solar activo (SCSA)

Tecnología que utiliza equipos mecánicos (bombas de circulación, radiadores, controles electrónicos) para forzar la circulación del fluido caloportador a través de colectores solares, optimizando la captación, almacenamiento y distribución de energía térmica solar (Duffie & Beckman, 2013; Wang et al., 2019).

2.3.2 Altoandino

Regiones montañosas altas de la cordillera de los Andes en Sudamérica. Se caracteriza por su gran altitud (generalmente por encima de los 2500 metros sobre el nivel del mar), clima frío y ecosistemas únicos (Breack \$ Mendiola, 2000).

2.3.3 Temperatura

La temperatura es una magnitud física que mide la energía cinética interna de un cuerpo, objeto o del medio ambiente en general (Manrique, 2019).

2.3.4 Temperatura ambiente

Se refiere a la temperatura del entorno circundante en el que se encuentra un sistema o dispositivo (Hasanuzzaman, 2022).

2.3.5 Temperatura neutra

Temperatura interior promedio en la cual los ocupantes de un espacio no experimentan sensación de frío ni calor, determinada a través de estudios de campo y modelos adaptativos que consideran las condiciones climáticas exteriores y la adaptación de los usuarios (Humphreys & Nicol, 2002).

2.3.6 Confort térmico

Esa condición de mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico (ISO 7730, 2005).

2.3.7 Inercia térmica

Propiedad de los materiales constructivos que describe su capacidad para almacenar energía térmica y liberarla gradualmente, proporcionando estabilidad térmica y amortiguando las fluctuaciones de temperatura exterior en los espacios interiores (Giovani, 1998).

2.3.8 Envolverte

Sistema constructivo compuesto por todos los elementos que separan los espacios interiores acondicionados del ambiente exterior, incluyendo paredes, techos, pisos, ventanas y puertas, que controlan la transferencia de calor entre el interior y exterior (Lstiburek, 2006).

2.3.9 Random Forest

Algoritmo de aprendizaje automático supervisado basado en ensamble que utiliza múltiples árboles de decisión entrenados mediante técnicas de bagging y selección aleatoria de características, proporcionando alta precisión predictiva y robustez ante sobreajuste (Breiman, 2021).

2.4 Marco Filosófico

En cuanto al marco filosófico, el confort térmico se entiende no solo como una cuestión física, sino también como una experiencia subjetiva que involucra factores psicológicos y sociales. Según la definición de la Sociedad de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE), el confort térmico es el estado mental que expresa satisfacción con el entorno térmico, lo que implica que su evaluación debe considerar la interacción entre variables físicas, fisiológicas y psicológicas (Soto-Estrada et al., 2019). Esta perspectiva se alinea con enfoques adaptativos que sugieren que las personas ajustan su percepción del confort en función de su entorno y sus experiencias previas (Sánchez et al., 2016).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo, nivel y diseño de la investigación

3.1.1 Tipo de investigación

Investigación de enfoque Cuantitativo. Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018) la investigación cuantitativa se refiere a un enfoque de investigación que se caracteriza por la recolección y el análisis de datos numéricos y su posterior interpretación utilizando métodos estadísticos. Este tipo de investigación busca medir variables, establecer relaciones entre estas variables y generalizar los resultados a una población más amplia. La investigación cuantitativa se basa en la objetividad, la replicabilidad y la generalización de los resultados.

3.1.2 Nivel de investigación

Investigación de nivel Aplicativo. De acuerdo con lo establecido por Hernández et al. (2014) el nivel de investigación aplicada se refiere a un tipo de investigación que se centra en la evaluación y aplicación de conocimientos para resolver problemas prácticos o generar avances tecnológicos. Este nivel de investigación es adecuado para investigaciones que tienen como objetivo derivar acciones concretas o desarrollar productos tecnológicos.

3.1.3 Diseño

Experimental debido a que se medirá la variable independiente. El diseño experimental se refiere a un conjunto de procedimientos utilizados en la investigación experimental para manipular una o más variables independientes y medir su efecto sobre una o más variables dependientes (Bernal, 2010).

3.2 Población y muestra de estudio

3.2.1 Población de estudio

La población de estudio está compuesta por los parámetros meteorológicos que caracterizan el centro poblado de Kallapuma (Temperatura ambiente, irradiancia solar global horizontal, humedad relativa, velocidad y dirección del viento), las temperaturas

del aire en el interior del dormitorio de damas y dormitorio de varones, y las temperaturas superficiales de la envolvente de cada habitación (paredes, piso, techo y ventanas).

3.2.2 Muestra de estudio

Las muestras de estudio están constituidas por los valores de temperatura ambiente, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento, temperatura del aire en el interior de la habitación, y temperatura superficial de la envolvente. Todas ellas registradas durante el periodo de estudio desde abril de 2024 hasta mayo de 2025.

3.3 Acciones y actividades para la ejecución del proyecto

Se llevaron a cabo las siguientes acciones para ejecutar el proyecto.

1. Se realizó una visita al centro poblado de Kallapuma con el objetivo de identificar la zona, sus condiciones e inspeccionar la habitación de estudio (El dormitorio de damas y el dormitorio de varones del Tambo Kallapuma).
2. Se instaló un sistema de calefacción solar activo como parte del proyecto de investigación N° 04-2018-FONDECYT-BM-IADT-MU de la Universidad Nacional de Ingeniería en convenio con la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
3. Se verificó visualmente los componentes constructivos de las habitaciones con la finalidad de obtener información sobre las características físicas.
4. Se instalaron sensores de temperatura TMC20-HD Hobo dentro de cada habitación de estudio para medir sus temperaturas internas (temperatura del aire) y las temperaturas de las envolventes (temperaturas superficiales). Los sensores se conectan a dataloggers Hobo de 4 canales donde se almacenaron los datos registrados.
5. Se instaló una estación meteorológica Davis Vantage Pro2 para monitorear el clima de la zona, específicamente los parámetros de la temperatura ambiente (To), Irradiancia solar global horizontal (Ig), Humedad relativa (RH), velocidad del viento (WS) y dirección del viento (WD).

6. Se realizaron viajes mensuales al centro poblado de Kallapuma para la descarga de datos, así como para la verificación y el mantenimiento de los sensores, dataloggers, estación meteorológica y el Sistema de calefacción solar activo.

3.4 Materiales e instrumentos

Los instrumentos requeridos para la recopilación de datos experimentales fueron:

1. Estación meteorológica Davis ventage pro2 (Figura 1), encargado de recopilar información de los parámetros meteorológicos de la zona: temperatura ambiente (T_o), irradiancia solar global horizontal (I_g), humedad relativa (RH), dirección del viento (WD), velocidad del viento (WD).

Figura 1

Estación meteorológica Davis Ventage Pro2



Nota: Adaptado de Davis instruments, <https://www.davisinstruments.com>

2. Sensores de temperatura TMC20-HD Hobo de 15 metros de longitud (Figura 2b). Se instalaron 08 sensores de este tipo (16 en total) en cada habitación de para monitorear el comportamiento térmico de la temperatura del aire en los interiores (temperatura interna T_{in}) y las temperaturas superficiales de las envolventes.

Figura 2

(a) Datalogger Hobo de 4 canales. (b) Sensor de temperatura TMC20-HD Hobo



(a)

(b)

Nota: adaptado de Onset Hobo, <https://www.onsetcomp.com>.

3. Dataloggers Hobo de cuatro canales (Figura 2a). Estos dataloggers se emplearon para el registro y almacenamiento automático de datos de temperatura recopilados por los sensores TMC20-HD Hobo.
4. Software Weatherlink para la lectura y descarga de parámetros meteorológicos registrados por la estación meteorológica Davis ventage Pro2.
5. Software HOBOWere para la lectura y descarga de datos registrados los dataloggers Hobo.
6. Software SketchUp para el diseño en 3D de las habitaciones de estudio.
7. Lenguaje de programación Python para el procesamiento, limpieza y análisis de los datos recopilados por todos los sensores empleados en el estudio.
8. Software Origin Pro para la gráficas y visualización de datos.

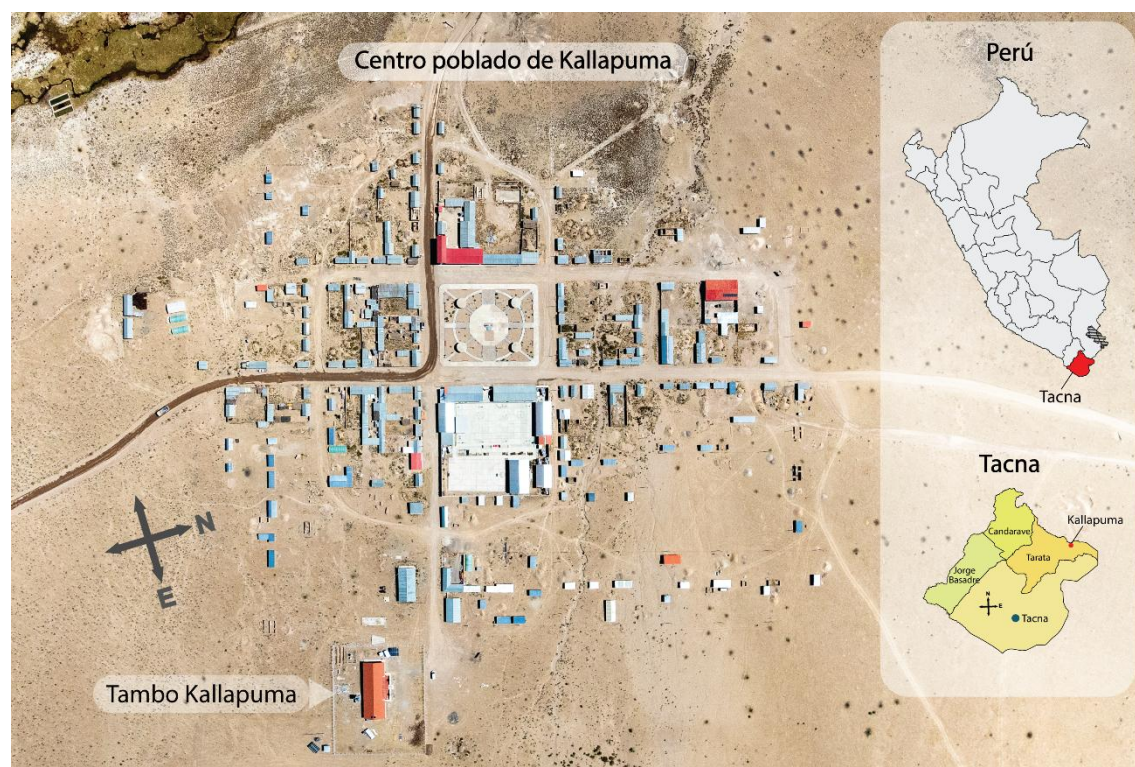
3.5 Centro Poblado Altoandino de Kallapuma

El centro poblado de Kallapuma (Figura 3) se única en la zona altoandina de la región Tacna, Perú, a 4266 metros sobre el nivel del mar (17°19'1,3'' latitud sur y 69°43'51,6''), con código de ubigeo 230410023. Kallapuma, de difícil acceso debido a

la ausencia de vías asfaltadas, se encuentra formalmente reconocido desde 1940 y titulada mediante la ficha registral 8567 (partida electrónica 5120435) con fecha de titulación del 19 de diciembre de 1994, abarca una extensión territorial de 38331,7009134 hectáreas. La población de Kallapuma, caracterizada por su aislamiento geográfico y condiciones de vida precaria típicas de zonas altoandinas rurales del Perú, comprende 45 viviendas habitadas por 70 personas según los datos del instituto nacional de estadística e informática (INEI, 2017). La economía local se desarrolla exclusivamente sobre la ganadería de camélidos sudamericanos, particularmente alpacas (*Vicugna pacos*), actividad que constituye la base del sustento familiar y representa una forma tradicional de aprovechamiento de recursos naturales altoandinos. Kallapuma carece de servicios básicos esenciales como sistemas de alcantarillado y electrificación, una situación que refleja brechas de infraestructura y desarrollo que caracterizan a los centros poblados rurales del país, afectando significativamente la calidad de vida de los pobladores de estas zonas.

Figura 3

Centro Poblado de Kallapuma



Nota: Fotografía aérea propia tomada el 09 de agosto de 2025.

3.6 Tambo Kallapuma

El Tambo Kallapuma (Figura 4) pertenece al Programa Nacional de Tambos, creado en 2013 con el objetivo de promover el trabajo articulado entre diferentes sectores del gobierno peruano, elevando la calidad de vida de los pobladores, fomentar oportunidades y fortalecer capacidades productivas (MIDIS, 2023). El Tambo cuenta con once ambientes, incluyendo dormitorios, oficinas, auditorio, cocina y servicios higiénicos. Su construcción difiere de las viviendas locales tanto en diseño como en material de construcción.

Figura 4

Tambo Kallapuma



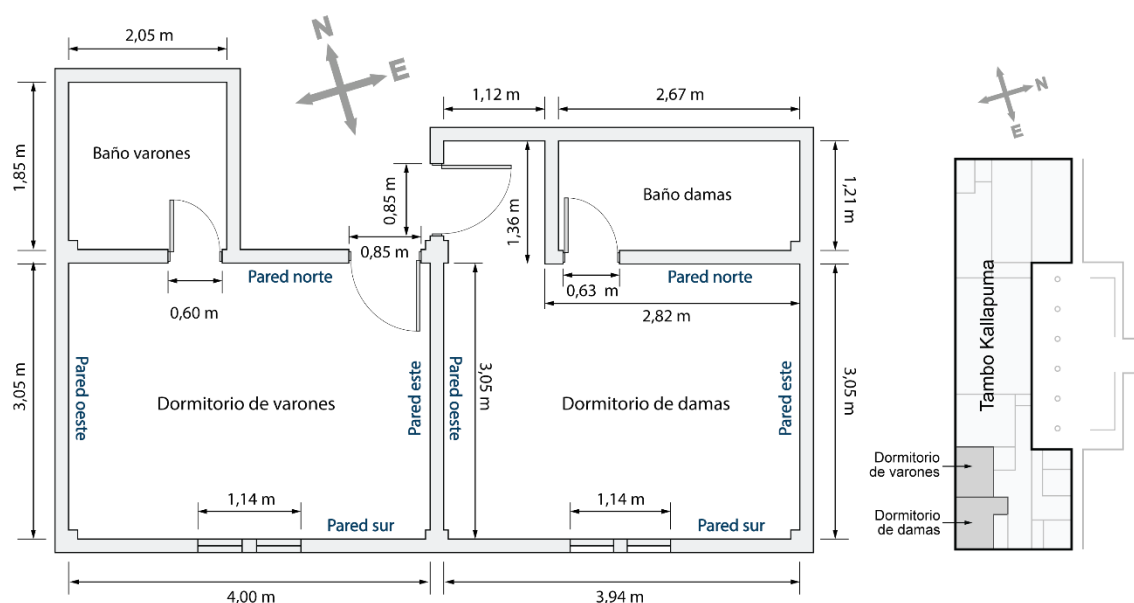
3.7 Dormitorio de damas y varones del Tambo Kallapuma

La Figura 5 muestra el plano arquitectónico de los dormitorios de damas y varones del Tambo Kallapuma, incluyendo sus dimensiones y disposición espacial. Ambas habitaciones presentan una altura interior de 2,80 m, medida desde el nivel del piso hasta el falso techo. El área del piso del dormitorio de damas es de 13,54 m², mientras que el dormitorio de varones ocupa un área de 12,20 m². En consecuencia, los volúmenes internos de las habitaciones son de 37,91 m³ y 34,16 m³, respectivamente.

Ambos dormitorios comparten una pared común: la pared oeste del dormitorio de damas corresponde a la pared este del dormitorio de varones. Las paredes sur de ambas habitaciones están expuestas directamente al exterior y cuentan con ventanas idénticas en dimensiones de 1,14 m de ancho por 1,33 m de alto. Adicionalmente, la pared este del dormitorio de damas está expuesta directamente al exterior. El resto de las paredes de ambas habitaciones se encuentran contenidas dentro de la edificación principal del Tambo Kallapuma y no están en contacto directo con el ambiente exterior.

Figura 5

Plano del dormitorio de damas y varones del Tambo Kallapuma



Nota: Basado en mediciones realizadas in situ.

Según se detalla en la Tabla 1, la construcción de las paredes del Tambo Kallapuma está compuesta por un muro de ladrillo de 0,12 m de espesor, revestido con enlucido de cemento en ambas caras y un enchapado interior de madera de 1,20 m de altura medidos desde el piso. El piso consiste en tablas de madera machihembradas sobre una base de concreto. El techo interior (falso techo) está constituido por placas de PVC machihembradas, mientras que el techo exterior es de calaminón tipo sándwich, con núcleo de poliuretano de 0,20 m de espesor. Las puertas son de madera contraplacada, y las ventanas están construidas con vidrio doble y marcos de madera.

Tabla 1*Materiales constructivos del Tambo Kallapuma*

	Material	Espesor [m]
Pared	Ladrillo	0,010
	Concreto	0,002
	Madera	0,020
Piso	Madera	0,120
	Concreto	0,015
Techo	Placas de PVC	0,010
	Calaminón	0,025
	Poliuretano	0,200

3.8 Recolección de parámetros meteorológicos

Los parámetros meteorológicos considerados (Tabla 2) se recopilan mediante la estación meteorológica Davis Ventage Pro2 instalada en el Tambo Kallapuma. Los datos se recopilaron con una frecuencia de una hora.

Tabla 2*Muestras de Estudio y sus Unidades*

Muestra de estudio	Unidad de medida	Frecuencia de registro
Temperatura habitacional	°C	5 minutos
Temperatura superficial	°C	5 minutos
Temperatura ambiente	°C	Una hora
Radiación solar	W/m ²	Una hora
Humedad relativa	%	Una hora
Velocidad del viento	m/s	Una hora
Dirección del viento	°	Una hora

3.9 Recolección de datos de temperatura

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento térmico de los dormitorios de damas y varones del Tambo Kallapuma, se implantó un sistema de monitoreo continuo de temperaturas mediante la instalación de sensores de temperatura TMC20-HD de la

marca hobo. Los sensores fueron ubicados estratégicamente en las caras interiores de las paredes de cada habitación y el punto medio geométrico (para la recopilación de la temperatura del aire interior) siguiendo un criterio de representatividad espacial y exposición térmica diferenciada según la orientación cardinal. La disposición de los sensores se detalla en la Tabla 3 y se ilustra gráficamente en la Figura 6, donde se identifican las posiciones relativas de las paredes este, oeste, norte y sur de cada dormitorio, etiquetadas de la manera siguiente: T_este_d, T_oeste_d, T_norte_d, T_sur_d para las temperaturas superficiales de la cara interior de las paredes del dormitorio de damas, y T_este_v, T_oeste_v, T_norte_v, y T_sur_v para las temperaturas superficiales de la cara interior de las paredes del dormitorio de varones.

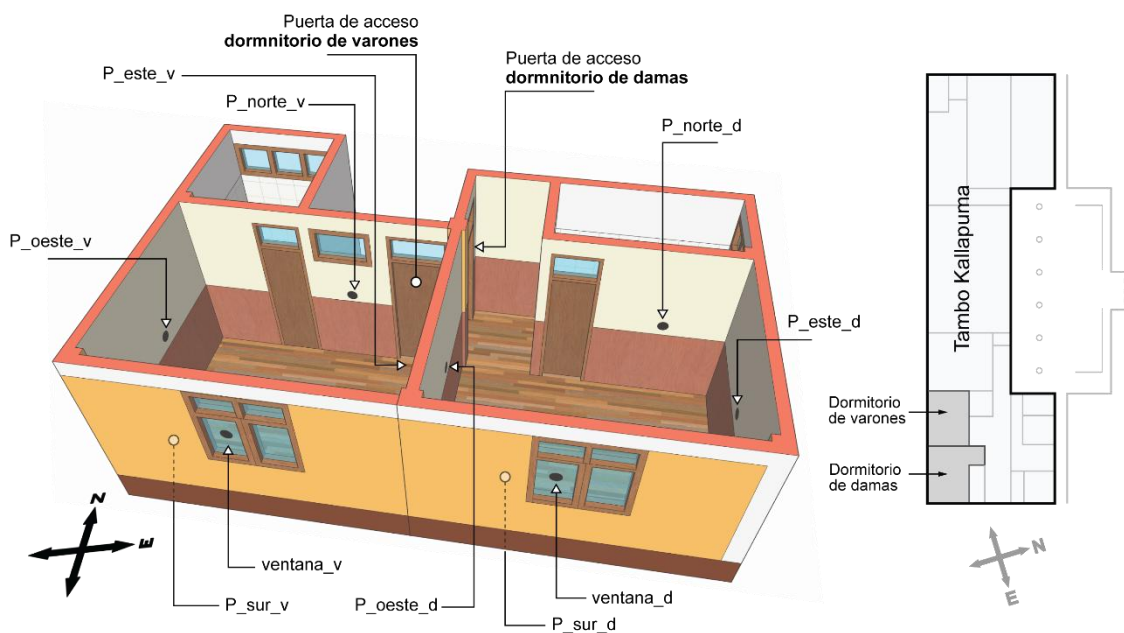
Tabla 3

Puntos de recolección de datos de temperatura y su etiquetado

habitación	Punto de recolección de datos	Etiqueta	Frecuencia de registro
Dormitorio de damas	Temperatura del aire interior	T_in_d	5 minutos
	Temperatura superficial en la pared este	P_este_d	5 minutos
	Temperatura superficial en la pared oeste	P_oeste_d	5 minutos
	Temperatura superficial en la pared norte	P_norte_d	5 minutos
	Temperatura superficial en la pared sur	P_sur_d	5 minutos
	Temperatura superficial del piso	piso_d	5 minutos
	Temperatura superficial del techo falso	techo_d	5 minutos
	Temperatura superficial de la ventana	ventana_d	5 minutos
Dormitorio de varones	Temperatura del aire interior	T_in_v	5 minutos
	Temperatura superficial en la pared este	P_este_v	5 minutos
	Temperatura superficial en la pared oeste	P_oeste_v	5 minutos
	Temperatura superficial en la pared norte	P_norte_v	5 minutos
	Temperatura superficial en la pared sur	P_sur_v	5 minutos
	Temperatura superficial del piso	piso_v	5 minutos
	Temperatura superficial del techo falso	techo_v	5 minutos
	Temperatura superficial de la ventana	ventana_v	5 minutos

Figura 6

Ubicación de los sensores de temperatura dentro de los dormitorios.



3.10 Cálculo de la temperatura de confort térmico

Para evaluar el confort térmico en las habitaciones es necesario calcular la temperatura neutra (o temperatura de confort térmico), para ello se ha empleado la ecuación desarrollada por Molina et al. (2023), que representa un modelo adaptativo de confort térmico especialmente calibrado para poblaciones de zonas altoandinas del Perú, donde se presentan condiciones climáticas extremas, donde las temperaturas nocturnas descienden drásticamente, fundamentado en estudios realizados en Imata, Arequipa a 4500 m.s.n.m.

$$T_n = 0,57 (T_m) + 11,80 \quad [1]$$

Donde:

T_n : Temperatura neutra

T_m : Temperatura media mensual

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Sistema de calefacción solar activo

El sistema de calefacción solar activo (SCSA) instalado en el dormitorio de damas del Tambo Kallapuma, es un sistema cerrado de fabricación alemana de la marca Viessmann y funciona con energía solar, siendo completamente independiente de suministro eléctrico de la red.

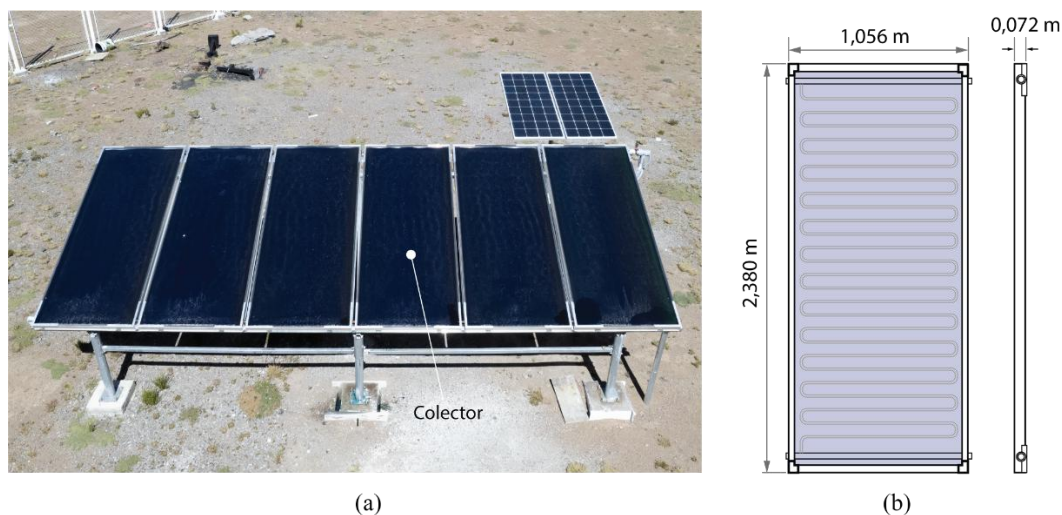
4.1.1 Componentes del Sistema de Calefacción Solar Activo

Las componentes principales de este SCSA son:

Colectores solares de placa plana: Los colectores de la marca Viessmann son de placa plana (Figura 7a) del modelo Vitosol 100-FM. Cada colector tiene medidas de 2,380 m por 1,056 m y 0,078 m de espesor (Figura 7b). Los colectores cuentan con tecnología Therm Protect que autolimita la captación de energía solar cuando se alcanza una determinada temperatura, patentada por la empresa viessmann. Esta tecnología evita el sobrecalentamiento y la formación de vapor de forma segura sin necesidad de dispositivos de disipación adicionales, reduciendo la temperatura en periodos de inactividad y la vida útil del fluido caloportador. Se instalaron 6 colectores.

Figura 7

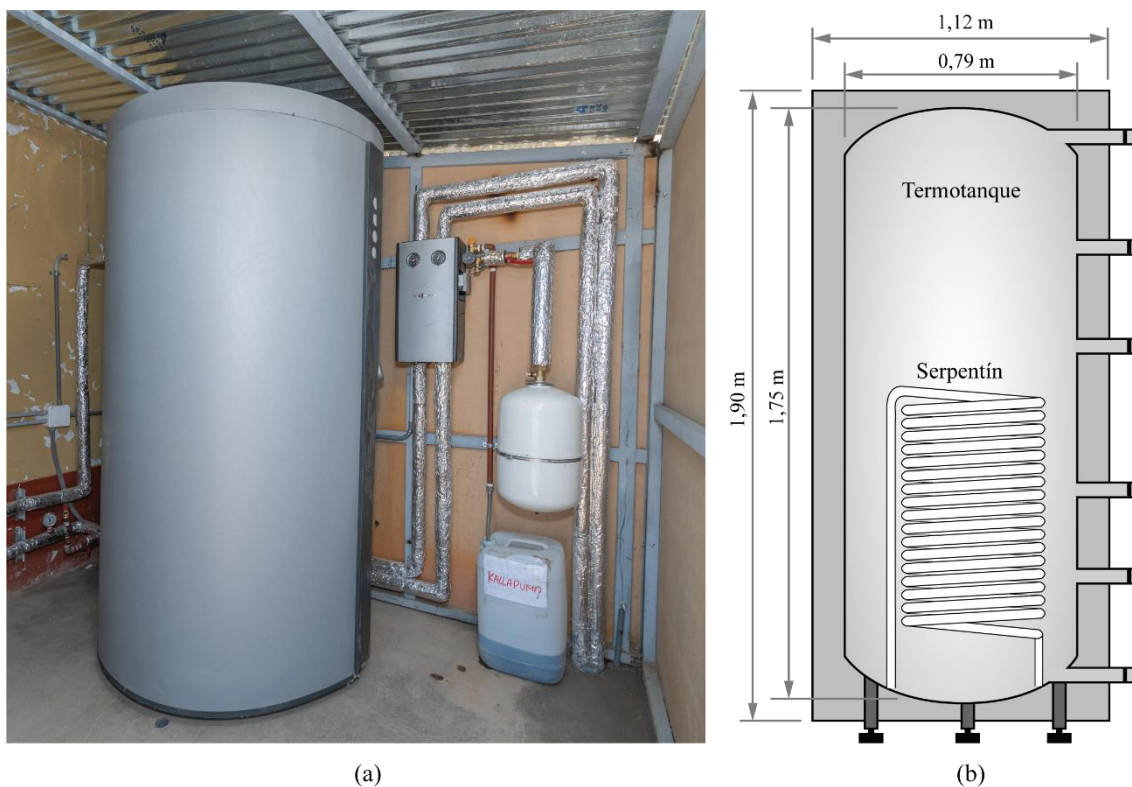
(a) Colectores de placa plana, (b) dimensiones de cada colector



Termotanque: El termotanque (Figura 8a) es un tanque de acero presurizado con capacidad de 750 litros, mide 1,75 metros de alto y 0,79 metros de diámetro (Figura 8b) y está envuelto de una capa de aislamiento térmico que le permite conservar el calor. Dentro del termotanque se encuentra un serpentín por la cual circula el fluido caloportador (glicol) que viene desde los colectores, este serpentín actúa como intercambiador de calor transfiriendo energía en forma de calor desde el glicol hacia el agua.

Figura 8

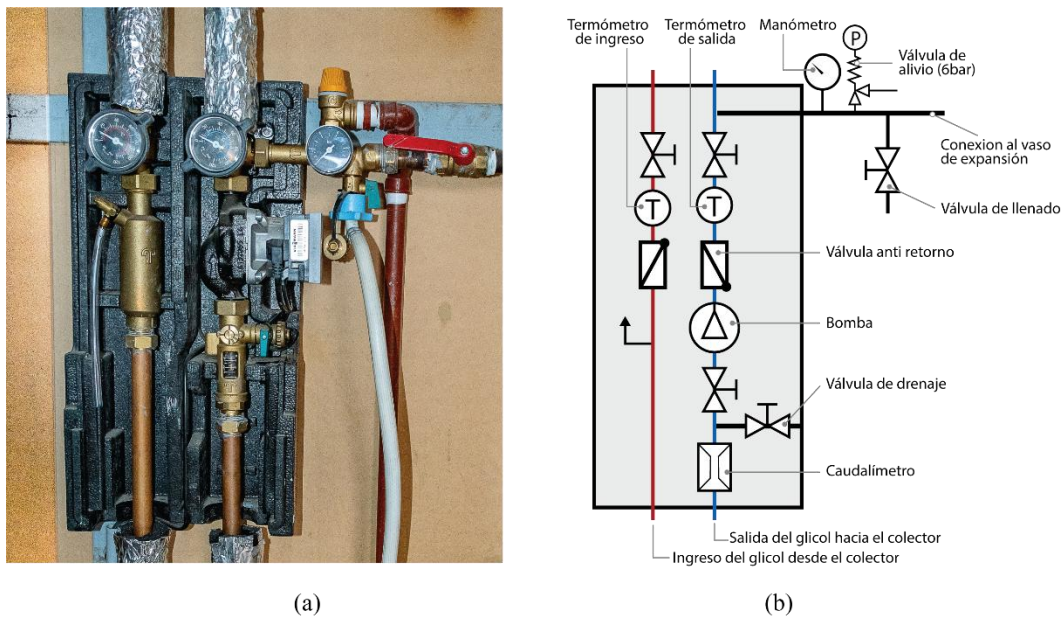
(a) Termotanque de 750 litros de capacidad, (b) dimensiones del termotanque



Estación de trabajo: La estación de trabajo (Figura 9a) cuenta con una bomba de circulación de alta eficiencia con regulación de revoluciones para corriente alterna que se encarga de mover el fluido caloportador (glicol) que circula por los colectores y el serpentín dentro del termotanque. También cuenta con un separador de aire, dos termómetros, dos llaves de paso con válvula antirretorno, indicador de caudal, manómetro, válvula de seguridad de 6 bares (Figura 9b). Esta estación de trabajo es capaz de impulsar le fluido caloportador hasta una altura de 6,5 metros con un caudal de 1500 l/h durante las 24 horas del día.

Figura 9

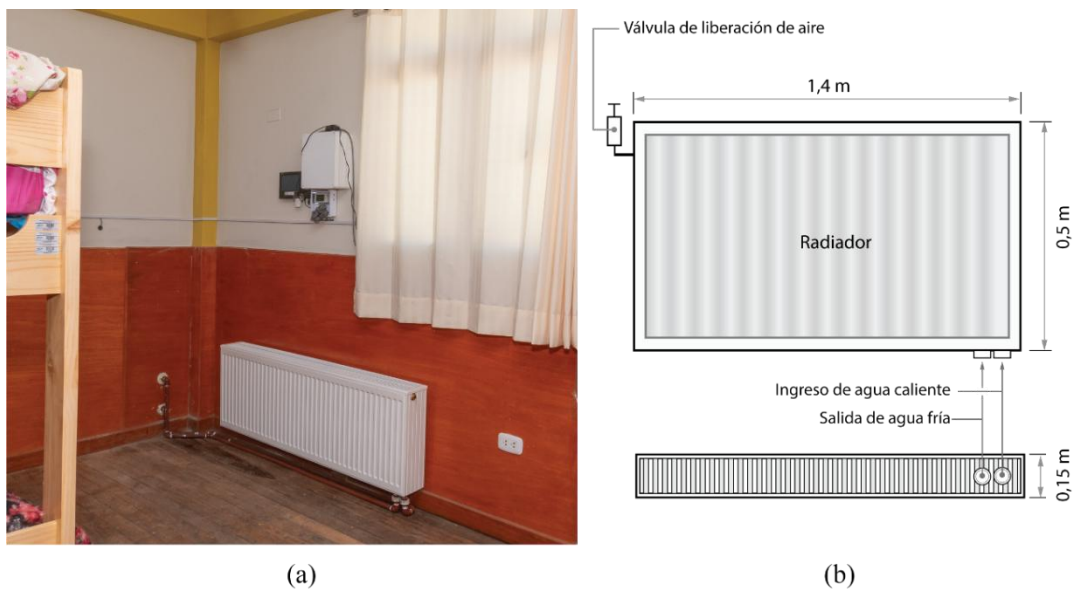
(a) Estación de trabajo, (b) esquema de la estación de trabajo



Radiator: Por el radiador circula agua como fluido caloportador que proviene desde el termotanque y es el encargado de transferir energía en forma de calor al ambiente que se desea calentar (Figura 10). El radiador se calienta por transferencia de energía desde el agua hacia el radiador.

Figura 10

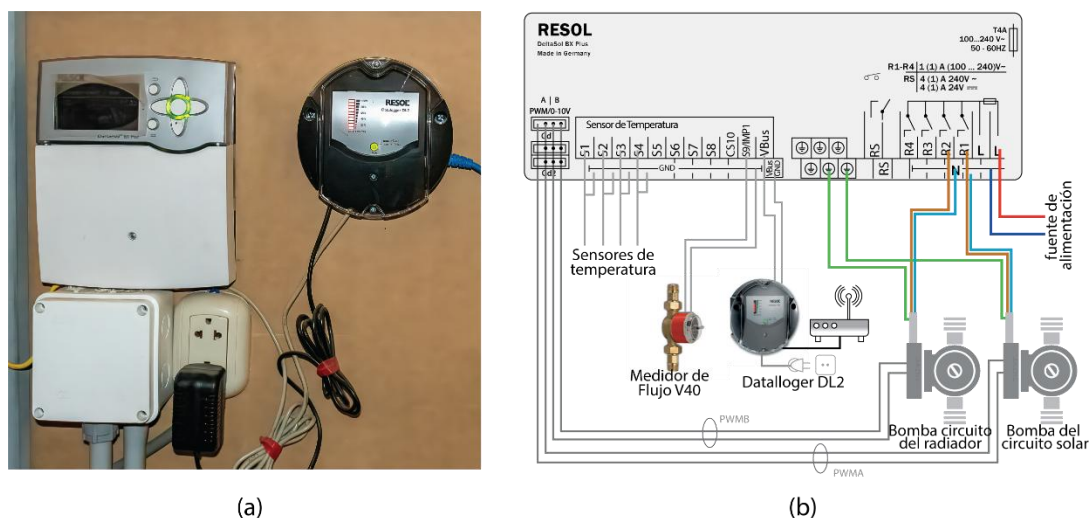
(a) Radiador instalado en el dormitorio de damas, (b) esquema del radiador



Controlador: El controlador de la marca DeltaSol BX (Figura 11) es el dispositivo mediante el cual se controlan las bombas de circulación de ambos circuitos (circuito solar y circuito del radiador), para ellos se apoya en un sensor de temperatura instalado dentro del dormitorio de damas y se alimenta mediante un sistema fotovoltaico.

Figura 11

(a) Controlador de las bombas de circulación, (b) Esquema de control



Sistema fotovoltaico: El sistema fotovoltaico se encarga de alimentar las bombas de circulación y el controlador de manera constante y eficiente, asegurando el funcionamiento del SCSA durante las 24 horas del día (Figura 12).

Figura 12

(a) Sistema fotovoltaico (SFV) para alimentar el SCSA, (b) Esquema del SFV

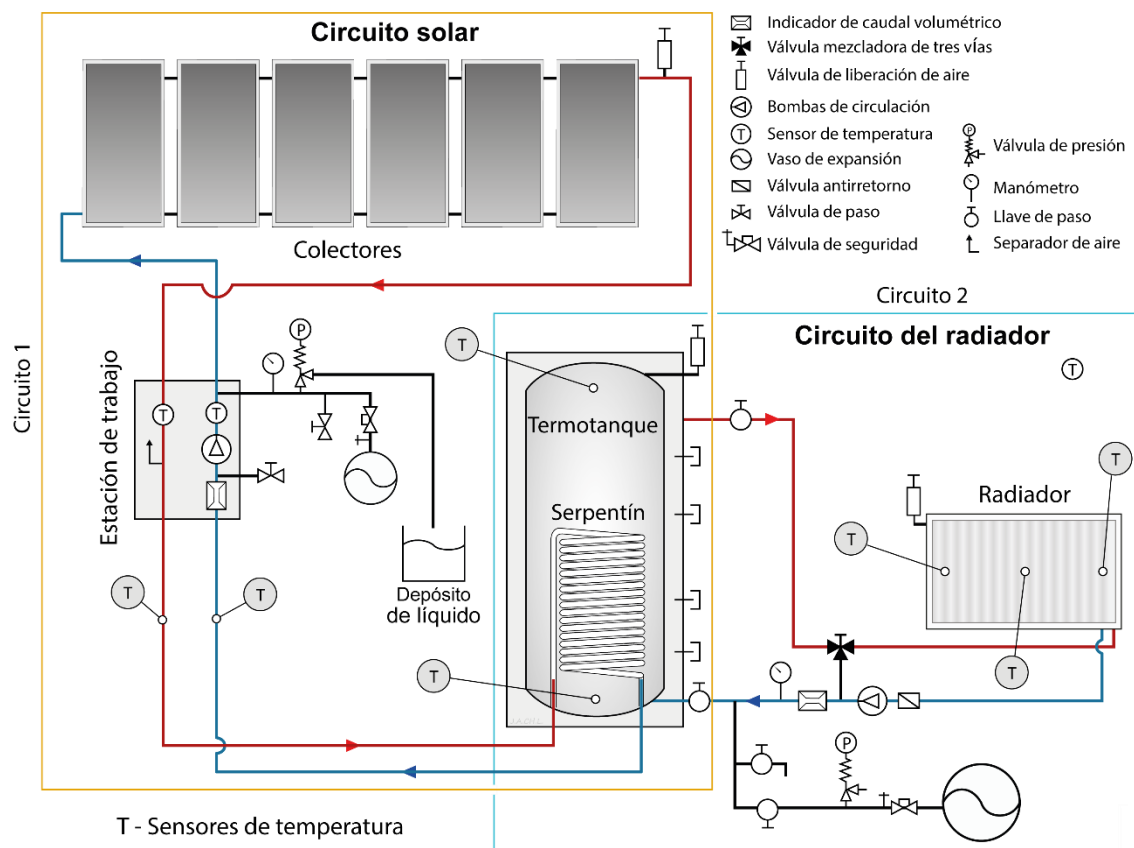


4.1.2 Circuitos del Sistema de Calefacción Solar Activo

El SCSA consta de dos Circuitos, la primera es el circuito solar y la segunda es el circuito del radiador, como se muestra en la Figura 13.

Figura 13

Esquema del sistema de calefacción solar activo (SCSA)



Circuito Solar: El circuito solar está constituido por los colectores y el termotanque, usando el glicol como fluido caloportador. Su función es captar la energía solar y transferirla al fluido caloportador mediante los colectores, es decir calienta el glicol. Este fluido caloportador [caliente] se mueve por las tuberías de cobre accionados por una bomba de circulación ingresando al termotanque, dentro de la cual circula por un serpentín dentro de la cual se enfría transfiriendo energía en forma de calor hacia el agua contenida dentro del termotanque. El fluido caloportador frío se mueve nuevamente hacia los colectores donde nuevamente absorberá la energía solar por medio de los colectores. Y el ciclo se repite.

Circuito del radiador: Este circuito cerrado está constituido principalmente por el termotanque y el radiador. Usa el agua como fluido caloportador. El agua, calentado por la acción del circuito solar, se deja circular hacia el radiador (instalado dentro del dormitorio de damas) mediante una bomba de circulación. Cuando el agua llega al radiador se enfría liberando energía en forma de calor hacia el interior de la habitación. El agua fría retorna al termotanque donde se calentará nuevamente y el ciclo se repite. Para evitar la congelación del agua que circula por este circuito, se deja recircular el agua cada vez que su temperatura se aproxime a 4,0 °C. Esta medida de protección no permite la formación de cristales de hielo.

4.1.3 Configuración del Funcionamiento del Sistema de Calefacción Solar Activo

El Sistema de calefacción solar activo es programable para que puncione de acuerdo con las necesidades del ambiente que se desea calentar. Para los propósitos del presente estudio se realizaron tres configuraciones:

a) Primera configuración (SCSA apagado)

En esta configuración se apagó el SCSA completamente con el objetivo de estudiar el dormitorio de damas (en la cual se encuentra el radiador) con el objetivo de estudiar su comportamiento térmico en condiciones de estado natural, sin ninguna fuente de energía térmica. El periodo evaluado con esta configuración va desde el primero de julio del 2024 hasta el 31 de agosto del 2024 y en adelante nos referiremos a este periodo como Primer periodo.

b) Segunda configuración (SCSA encendido y sin termostato)

En esta configuración se deja funcionar el SCSA de manera continua durante las 24 horas del día durante todo el periodo mencionado inicialmente. El propósito de esta configuración es ver el comportamiento térmico del dormitorio de damas y las temperaturas mínimas y máximas que es capaz de alcanzar gracias a la energía en forma de calor entregada por el SCSA. El periodo evaluado con esta configuración va desde el 01 hasta el 31 de diciembre del 2024 y en adelante nos referiremos a este periodo como segundo periodo.

c) Tercera configuración (SCSA encendido y con termostato)

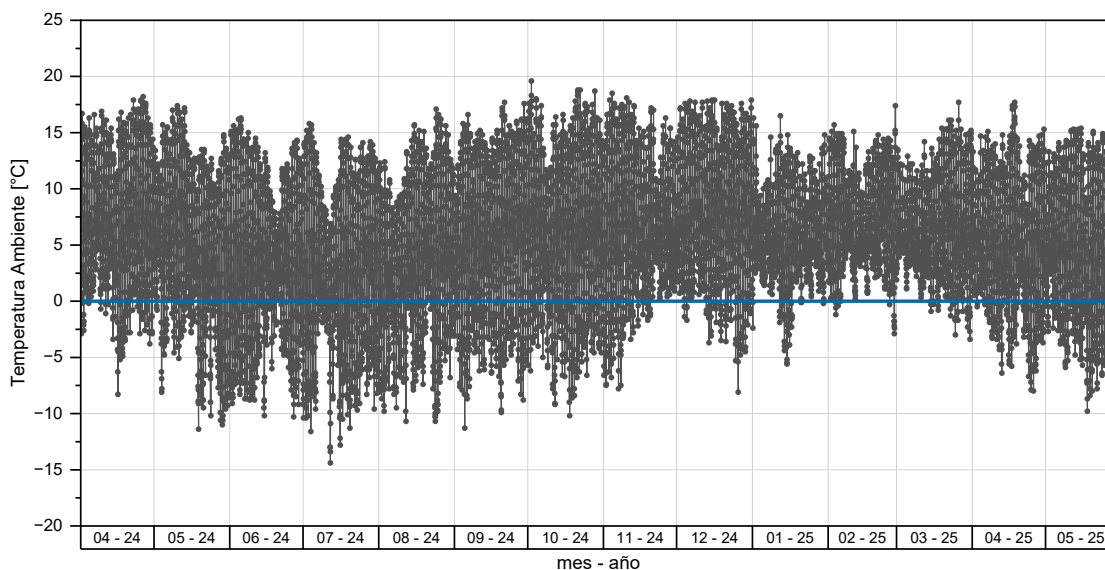
En esta configuración se deja funcionar el SCSA controlado por un termostato, de modo que el SCSA solo trabaja cuando el termostato de la orden. El termostato se programa para que active el SCSA cuando la temperatura en el interior del dormitorio de damas (T_{in_d}) disminuye por debajo de la zona de confort térmico ($T_n - 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$), y apaga el SCSA cuando la temperatura T_{in_d} sube por encima de la zona de confort térmico ($T_n + 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$), todo de manera automática sin intervención de algún operador. El periodo evaluado con esta configuración va desde el 01 de marzo del 2025 hasta el 30 de abril del 2025 y en adelante nos referiremos a este periodo como Tercer periodo.

4.2 Condiciones climáticas de Kallapuma

El estudio de las condiciones climáticas de Kallapuma se realizó mediante el monitoreo in situ, utilizando una estación meteorológica automática DAVIS Ventage Pro2. Para los propósitos de la presente investigación, se midieron continuamente los siguientes parámetros fundamentales para el análisis del clima de la zona: la temperatura ambiente (T_o), la irradiancia solar global horizontal (I_g), la humedad relativa (RH), la velocidad del viento (WS) y la dirección del viento (WD). La estación configurada con intervalos de registro de datos de una hora recopiló información durante el periodo que comprende desde abril del 2024 hasta mayo del 2025 lo que permitió capturar la variabilidad de los parámetros meteorológica en el transcurso de las estaciones anuales.

4.2.1 Temperatura Ambiente

Los registros de temperatura ambiente, mostrados en la Figura 14, durante el que va desde marzo del 2024 hasta junio de 2025, muestra que los valores no superan los $25 \text{ }^\circ\text{C}$ durante el día, sin embargo, descienden fácilmente por debajo de los $0 \text{ }^\circ\text{C}$ en cualquier estación del año, en especial durante la estación invierno. De los 465 días registrados, 336 días presentan temperaturas por debajo de $0 \text{ }^\circ\text{C}$, es decir, aproximadamente el 72,3 % de los días registrados, presentó temperaturas por debajo de cero. Lo que demuestra que Kallapuma presenta el fenómeno conocido como “La helada” en cualquier mes del año, una condición perjudicial para la salud y el bienestar de los pobladores de la zona.

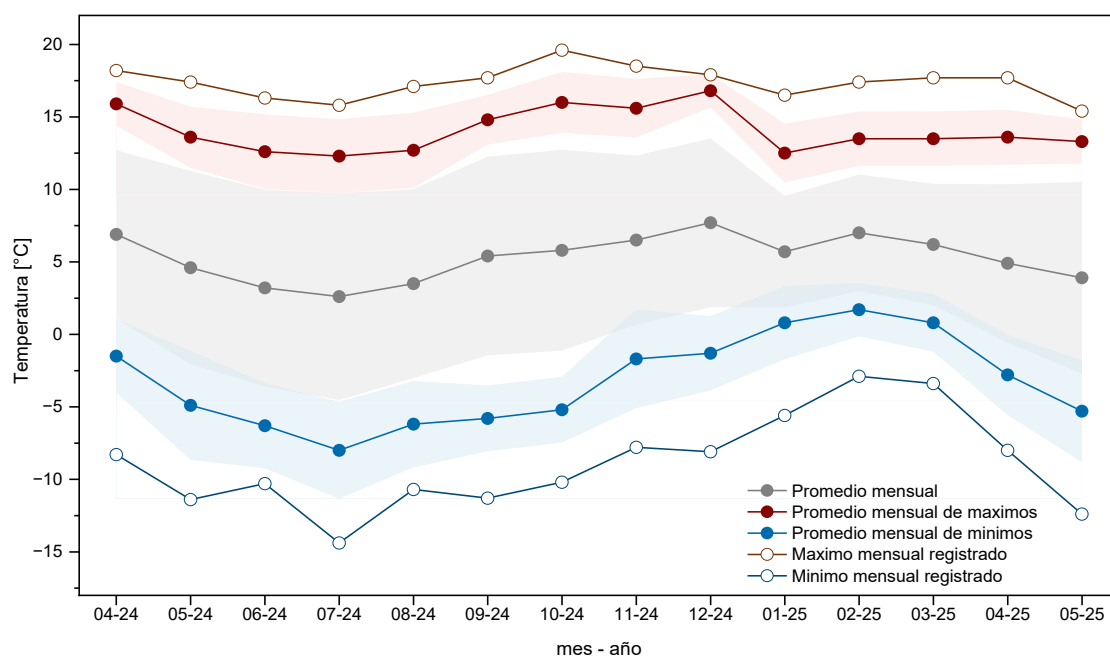
Figura 14*Registros de la temperatura ambiente de Kallapuma*

El análisis de los valores extremos y promedios de la temperatura ambiente, mostrados en la Tabla 4 y Figura 15, revela patrones significativos. Los valores muestran una amplitud térmica anual muy amplia. Durante el invierno las temperaturas mínimas promedio (puntos azules) alcanzan los $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el mínimo extremo (círculos azules) baja hasta los $-14,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que en verano los máximos promedios (puntos rojos) están entre los $16\text{ a }17\text{ }^{\circ}\text{C}$ y sus mínimos promedio se encuentran entre $0,8\text{ y }1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es interesante observar que los valores máximos promedio más altos se encuentran en la estación de primavera y principios de verano, observándose justamente el valor máximo extremo (círculo rojo) en el mes de octubre con un valor de $19,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. La temperatura promedio para todo el periodo registrado es de $5,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, el máximo promedio y mínimo promedio para el mismo periodo es de $14,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

Estas amplitudes térmicas extremas con amplitudes que superan los $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre máximos y mínimos y la persistencia de las temperaturas promedio mensuales (puntos grises) por debajo de los $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante la mayor parte del año, refleja la influencia de la altitud, la cual se puede considerar un clima con inviernos muy fríos y veranos moderadamente templados, típicos de zonas altoandinas.

Tabla 4*Temperaturas promedio, máximos y mínimos*

Mes - año	Promedio mensual [°C]	Promedio mensual de máximos [°C]	Promedio Mensual de mínimos [°C]	Máximo mensual registrado [°C]	Mínimo mensual registrado [°C]
04 – 24	6,9	15,9	-1,5	18,2	-8,3
05 – 24	4,6	13,6	-4,9	17,4	-11,4
06 – 24	3,2	12,6	-6,3	16,3	-10,3
07 – 24	2,6	12,3	-8,0	15,8	-14,4
08 – 24	3,5	12,7	-6,2	17,1	-10,7
09 – 24	5,4	14,8	-5,8	17,7	-11,3
10 – 24	5,8	16,0	-5,2	19,6	-10,2
11 – 24	6,5	15,6	-1,7	18,5	-7,8
12 – 24	7,7	16,8	-1,3	17,9	-8,1
01 – 25	5,7	12,5	0,8	16,5	-5,6
02 – 25	7,0	13,5	1,7	17,4	-2,9
03 – 25	6,2	13,5	0,8	17,7	-3,4
04 – 25	4,9	13,6	-2,8	17,7	-8,0
05 – 25	3,9	13,3	-5,3	15,4	-12,4

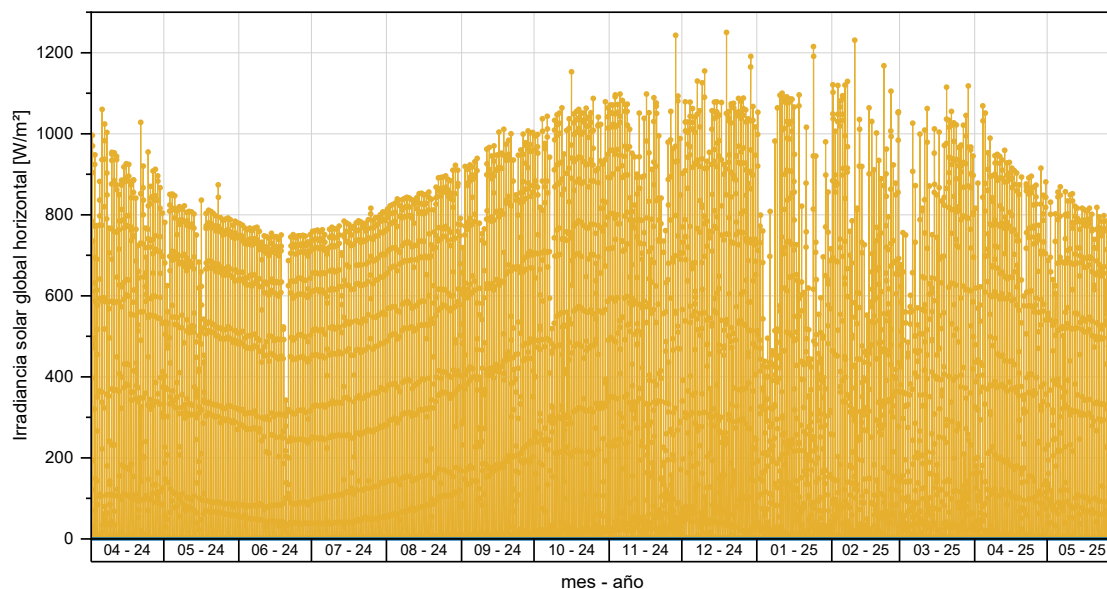
Figura 15*Temperaturas extremas y promedios para Kallapuma*

4.2.2 Irradiancia solar global horizontal

Los registros de la irradiancia solar global para Kallapuma registrados durante el periodo comprendido entre abril de 2024 y mayo de 2025 (Figura 16), revela una marcada estacionalidad en la radiación solar, característico de la región sur del país. La irradiancia solar diaria, expresada en W/m^2 , alcanzan valores máximos superiores a $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ entre octubre de 2024 y marzo 2025 que corresponde a finales de primavera y todo verano. Durante este periodo el sol alcanza su máxima elevación en el cielo, lo que reduce la trayectoria atmosférica que debe recorrer la radiación solar y por lo tanto aumenta su intensidad en la superficie. En contraste, desde abril hasta setiembre de 2024, la irradiancia solar disminuye significativamente, con valores inferiores a $800 \text{ W}/\text{m}^2$.

Figura 16

Irradiancia solar global horizontal en W/m^2



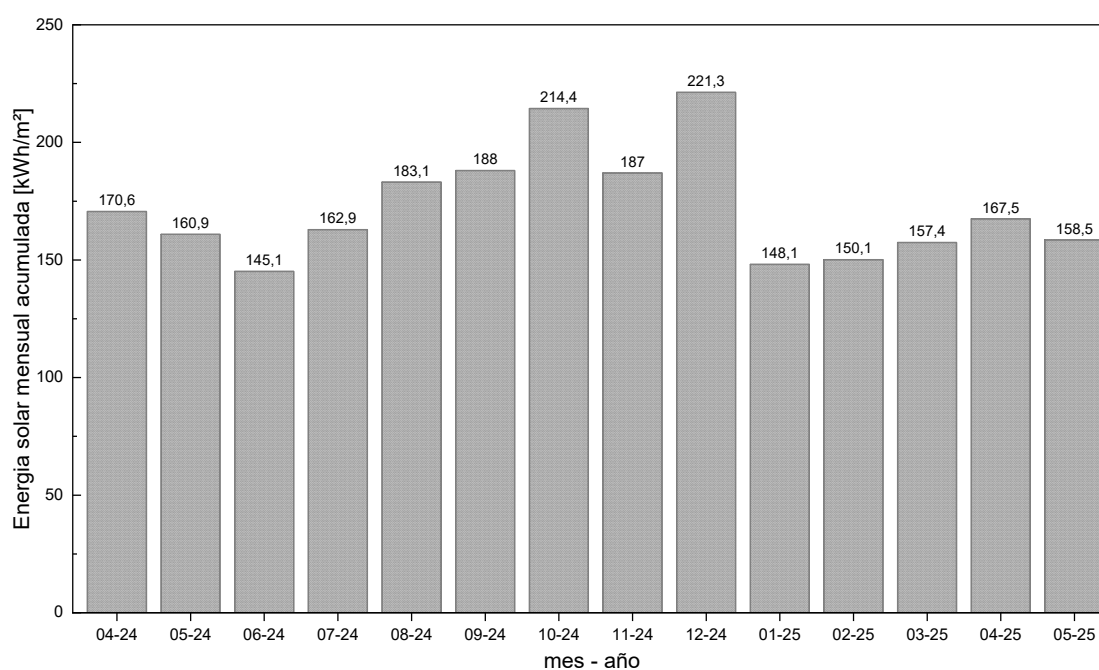
La Figura 17, que representa la energía solar mensual acumulada en kWh/m^2 , confirma la estacionalidad de la irradiancia solar. Los meses de noviembre, diciembre y enero de 2024 – 2025 muestran los mayores energéticos, con valores cercanos a $220 \text{ kWh}/\text{m}^2$. Este comportamiento es debido tanto a la intensidad solar más alta como a la mayor duración del día durante la estación de verano.

La altitud de Kallapuma, 4266 msnm , desempeña un papel fundamental en la magnitud de la irradiancia. A estas altitudes, la atmosfera es más delgada, reduciendo la

absorción y dispersión de la radiación solar por gases y partículas. Como resultado, la irradiancia solar global horizontal puede fácilmente superar los 1100 W/m² los días despejados, lo que sitúa a Kallapuma entre las zonas de mayor potencial solar. Estos datos sugieren que Kallapuma posee un alto potencial energético para la generación de energía solar fotovoltaica y térmica.

Figura 17

Energía solar mensual acumulada en kW/m²



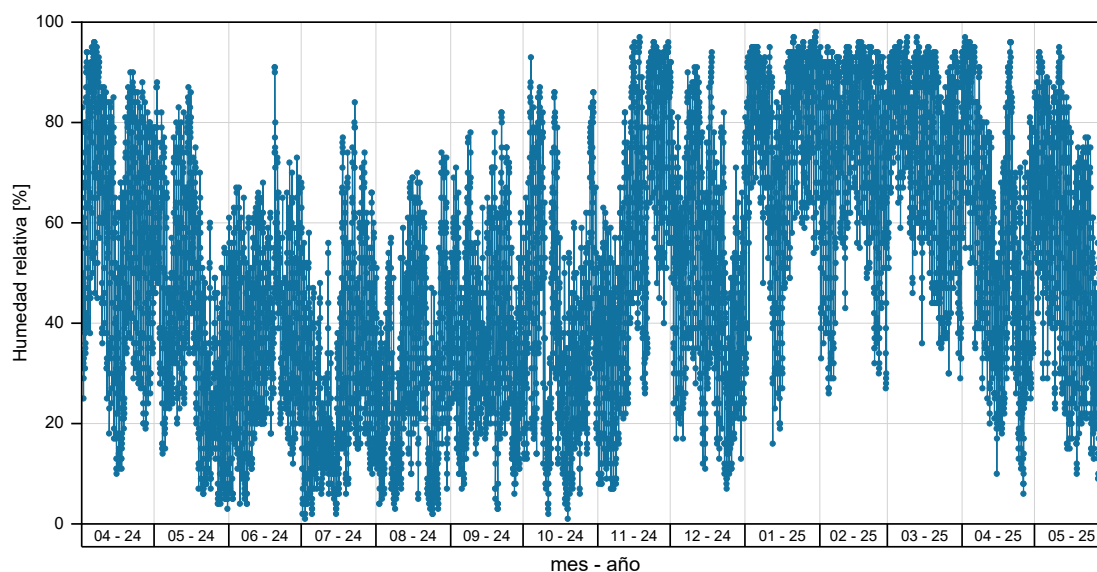
4.2.3 Humedad relativa

El registro de los valores de la humedad relativa para Kallapuma (Figura 18), revela un patrón estacional. Los registros oscilan desde valores muy cercanos al 0 % hasta aproximadamente el 100 %. Esta variación tan amplia es el resultado de factores como la altitud de la zona, las temperaturas extremas, sobre todo las bajas temperaturas y la radiación solar intensa. Durante la noche y madrugada la temperatura desciende rápidamente por radiación térmica, lo que provoca una saturación del aire y picos de humedad relativa cercanos al 100 %. En contraste, durante las horas de cercanas al medio día, especialmente en invierno, la radiación solar calienta el aire y aumenta su capacidad para retener vapor, lo que genera descensos bruscos en la humedad relativas por debajo incluso del 10 %.

Los valores de la humedad relativa por debajo del 10 % son fenómenos relativamente raros en cualquier parte del planeta y la presencia de estos en Kallapuma son indicativos de condiciones extremas, probablemente asociadas a eventos meteorológicos específicos como vientos cálidos y secos o ausencia prolongada de nubosidad. Estos valores tan bajos tienen impactos significativos en el ecosistema, causando estrés hídrico en las plantas y aumenta el riesgo de incendios en zonas con vegetación seca. Para la salud humana, estos eventos generan condiciones de deshidratación, resequedad en la piel e irritación de las vías respiratorias.

Figura 18

Humedad relativa para Kallapuma

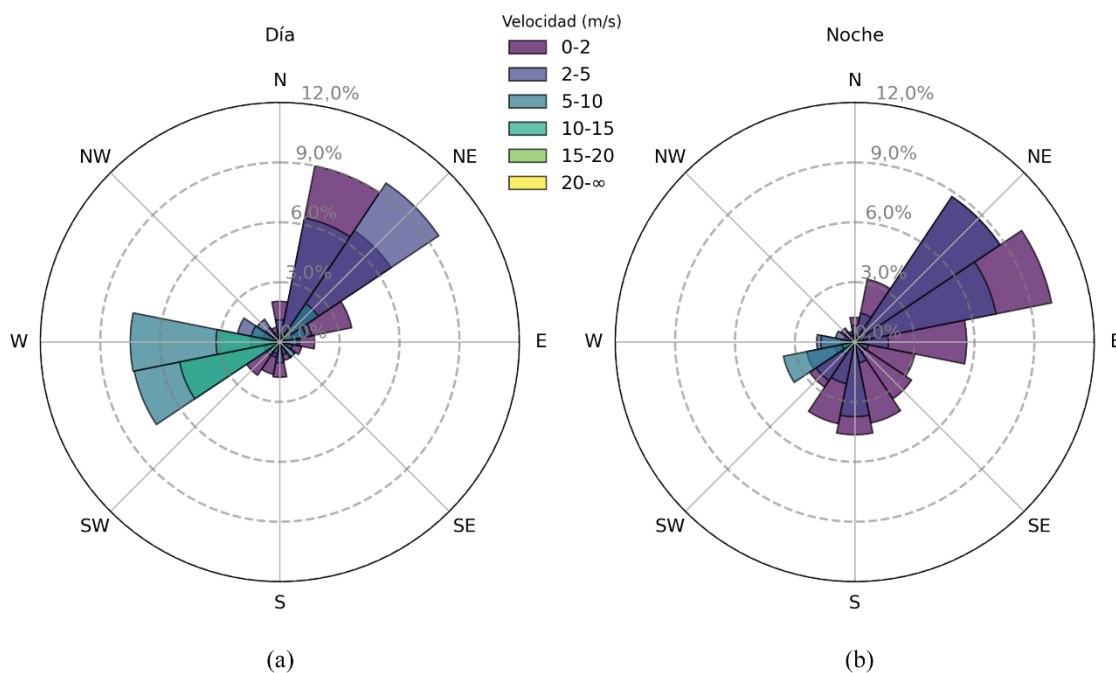


4.2.4 Velocidad y dirección del viento

En la Figura 19 se representan las rosas de vientos correspondientes a los periodos diurno (06:00 – 18:00 horas) y nocturno (18:00 – 06:00 horas), construidas a partir de la velocidad y dirección del viento registrados entre abril de 2024 y mayo de 2025. Este análisis comparativo permite identificar y contrastar los patrones que caracterizan esta zona altoandina, evidenciando diferencias significativas tanto en la en dirección como en la velocidad del viento entre el día y la noche.

Figura 19

(a) Rosa de los vientos diurno y (b) nocturno, para Kallapuma



Durante el día, la rosa de los vientos muestra (Figura 19a) que los vientos provenientes de noreste (NE) predominan, con una frecuencia relativa máxima de aproximadamente del 10 %, seguido por vientos que provienen del nor-noreste con un 9 %. Estas direcciones predominantes se asocian con velocidades bajas a moderadas. Las franjas más externas del gráfico indican una importante porción de vientos con velocidades de hasta 5 m/s y las franjas internas indican que, aunque en menor proporción, alcanzan velocidades de hasta 10 m/s, especialmente los vientos del NE. además, se observa una notable presencia de vientos provenientes del oeste (W) y del oeste-suroeste, con velocidades altas de entre 10 m/s y 15 m/s. los sectores sur (S), sureste (SE), este (E), norte (N), y noreste (NW) presentan una baja frecuencia y velocidades, lo que indica que las los vientos de estas direcciones no son predominantes durante el día.

Durante la noche (Figura 19b), se aprecia un cambio notable en la rosa de los vientos. Aunque el sector noreste (NE) sigue siendo uno de los más predominantes, su frecuencia disminuye a menos del 9 %, y el comportamiento de mayor intensidad se desplaza hacia el este-noreste, con una frecuencia significativa de vientos de baja a moderada velocidad del viento (0 – 5 m/s). La frecuencia de vientos significativamente

elevados, así como de sus altas velocidades provenientes del oeste y oeste-suroeste que se apreciaba durante el día, se reducen drásticamente para la noche. Además, hay aumentos apreciables en los vientos provenientes que abarcan las regiones desde el sur hasta el este. Asimismo, se observa una reducción generalizada en la velocidad de vientos, con mayor proporción de vientos entre 0 – 2 m/s, lo que indica una disminución de la actividad eólica nocturna.

4.3 Temperatura interior

Con el propósito de comparar el comportamiento térmico y establecer las posibles similitudes o diferencias entre las habitaciones de estudio, se realizó un registro simultáneo de la temperatura del aire en el interior de cada dormitorio. El monitoreo se llevó a cabo mediante sensores de temperatura TMC20-HD Hobo, donde la temperatura del dormitorio de damas fue etiquetada como T_{in_d} y la del dormitorio de varones como T_{in_v} , registrando valores con una frecuencia de 5 minutos. Esta metodología de adquisición de datos de alta frecuencia permitió capturar la variabilidad térmica detallada necesaria para un análisis comparativo riguroso entre ambas habitaciones.

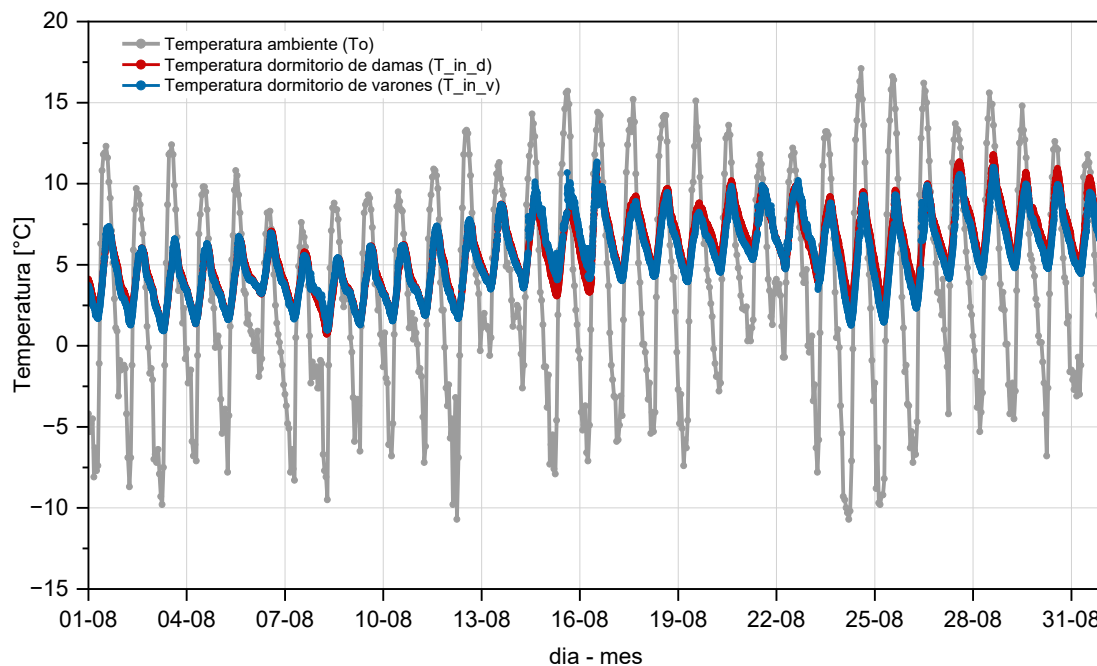
4.3.1 Temperatura del aire en el interior de las habitaciones

La Figura 20 muestra el comportamiento térmico de las habitaciones de estudio durante el mes de agosto del 2024, la curva roja para el dormitorio de damas, la curva azul para el dormitorio de varones, y la curva ploma es la temperatura ambiente. Se observa que la temperatura ambiente presenta una variabilidad considerable, con máximos que superan los 15 °C y mínimos que descienden por debajo de los -10 °C, característico de un clima extremo analizado en el apartado 4.2.

Las temperaturas en ambos dormitorios muestran oscilaciones más estrechas en comparación con la temperatura exterior, manteniéndose ambas curvas dentro de un rango térmico entre 0 °C y 12 °C. Esta notoria similitud en el comportamiento térmico de ambas habitaciones sugiere que están igualmente influenciados por las condiciones climáticas externas. El reducido rango de variación de las temperaturas internas confirma que los dormitorios actúan como espacios amortiguadores térmicos respecto al entorno extremo del exterior, un efecto que se atribuye a la inercia térmica de las paredes.

Figura 20

Temperaturas interiores en el dormitorio de damas (rojo) y varones (azul)



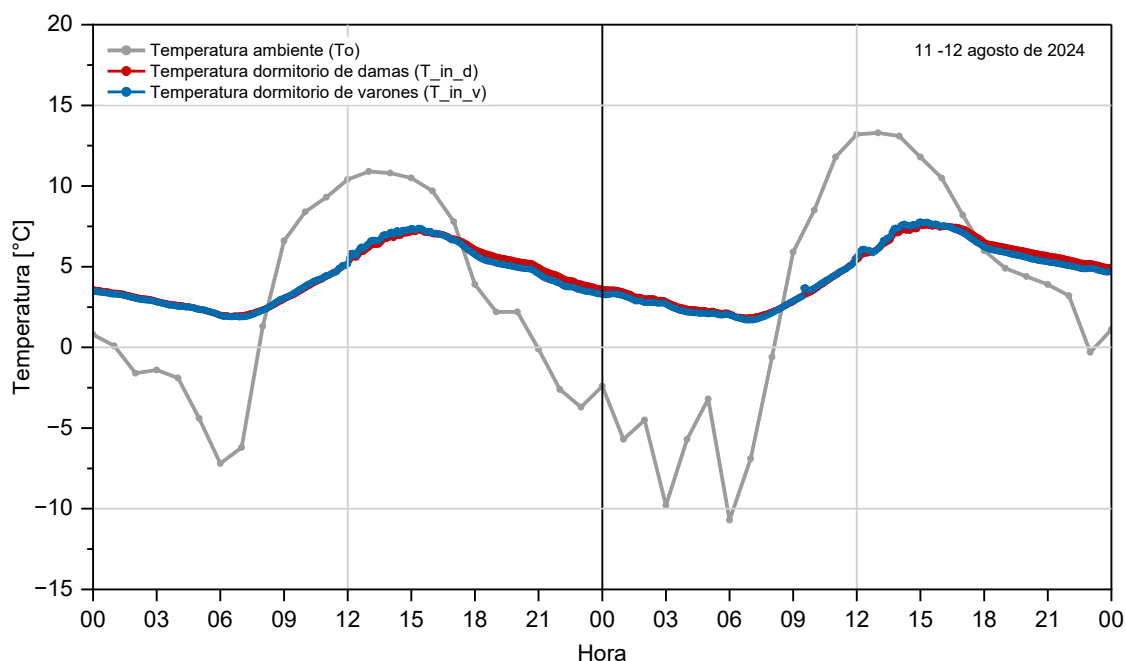
La Figura 21 muestra el comportamiento térmico de la temperatura del aire en el interior de las habitaciones de estudio para los días 11 y 12 de agosto del 2024. La curva gris muestra la temperatura ambiente (T_o), la curva roja muestra la temperatura en el interior del dormitorio de damas (T_{in_d}) y la curva azul muestra la temperatura en el interior del dormitorio de varones (T_{in_v}).

La temperatura ambiente muestra una variabilidad extrema con valores que oscilan entre aproximadamente $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante las primeras horas del amanecer (06:00 horas) y temperaturas que alcanzan los $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre las 12:00 y 15:00 horas, esta amplitud diría supera los $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo cual indica la baja inercia térmica del aire en la altitud que se encuentra Kallapuma. En contraste, las temperaturas interiores de ambos dormitorios presentan una estabilidad relativa que se mantiene dentro de un rango entre aproximadamente $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este comportamiento muestra la capacidad de las edificaciones de actuar como protectores térmicos frente a las extremas variaciones de la temperatura exterior, aunque no logran mantener condiciones térmicas óptimas para la salud de los habitantes.

Los valores máximos diarios de la temperatura exterior se alcanzan entre las 12:00 y 13:00 horas mientras que los valores máximos de temperatura dentro de las habitaciones se alcanzan alrededor de las 15:00 horas, este retardo de 2 a 3 horas es causado por la inercia térmica de los materiales constructivos, el calor solar absorbido por las paredes y techos durante el día se libera gradualmente hacia el interior, lo que provoca un desfase entre los máximos de la temperatura exterior e interiores.

Figura 21

Comportamiento térmico de la temperatura interior a lo largo de las 24 horas



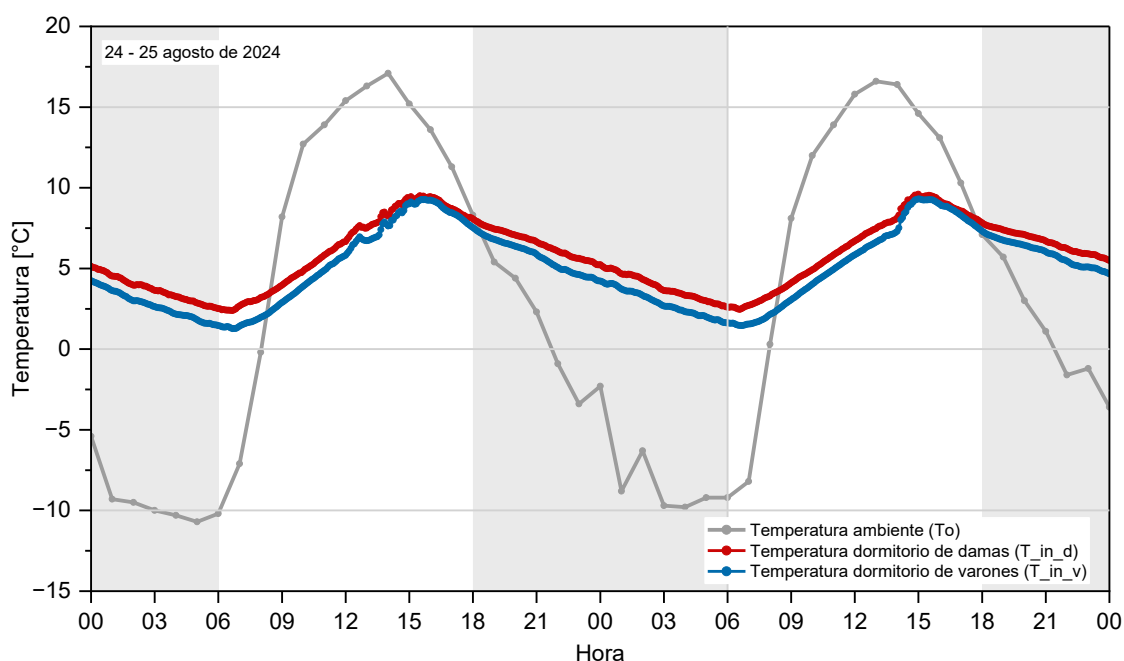
En la Figura 22, registrada para los días 24 y 25 de agosto de 2024, se detalla el comportamiento térmico durante el día (franjas blancas, a partir de las 06:00 horas hasta las 18:00 horas) y durante la noche (franjas plomas, a partir de las 18:00 horas hasta las 06:00 horas del día siguiente). El ascenso de la temperatura ambiente es notablemente rápido al inicio del día, aproximadamente entre las 6:00 horas y 9:00 horas, la cual coincide con la elevación del sol. Durante este periodo, el valor de T_o supera rápidamente los $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y alcanza su máximo de alrededor de $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ a las 13:00 horas. En cambio, el ascenso de las temperaturas interiores es significativamente más lento, las curvas de temperatura muestran que el ascenso de temperatura inicia más tardíamente y con una pendiente mucho menor que la temperatura ambiente.

Los valores de las temperaturas máximas alcanzadas dentro de los dormitorios son significativamente inferiores a las del ambiente.

El descenso de la temperatura al atardecer y durante la noche (franjas plomas en la Figura 22), presenta la diferencia más crítica, la temperatura ambiente presenta un descenso abrupto y continuo, alcanzando valores por debajo de los $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, estos valores mínimos se alcanzan justo antes del amanecer. Por otro lado, las temperaturas interiores descienden más lentamente de manera gradual hasta alcanzar valores cercanos al $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la madrugada.

Figura 22

Comportamiento térmico de la temperatura interior durante el día y la noche



La Tabla 5 muestra las estadísticas descriptivas de los registros realizados desde el 21 de junio de 2024 al 09 de octubre de 2024. Las temperaturas medias, mínimos y máximos en el interior de ambos dormitorios no muestran una diferencia significativa. Aunque el dormitorio de damas (T_{in_d}) presenta valores ligeramente superiores a las del dormitorio de varones (T_{in_v}), los valores de T_{in_d} están solo a $0,29\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima de la temperatura media, $0,24\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima de la temperatura mínima y $0,33\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima de la temperatura máxima.

Tabla 5

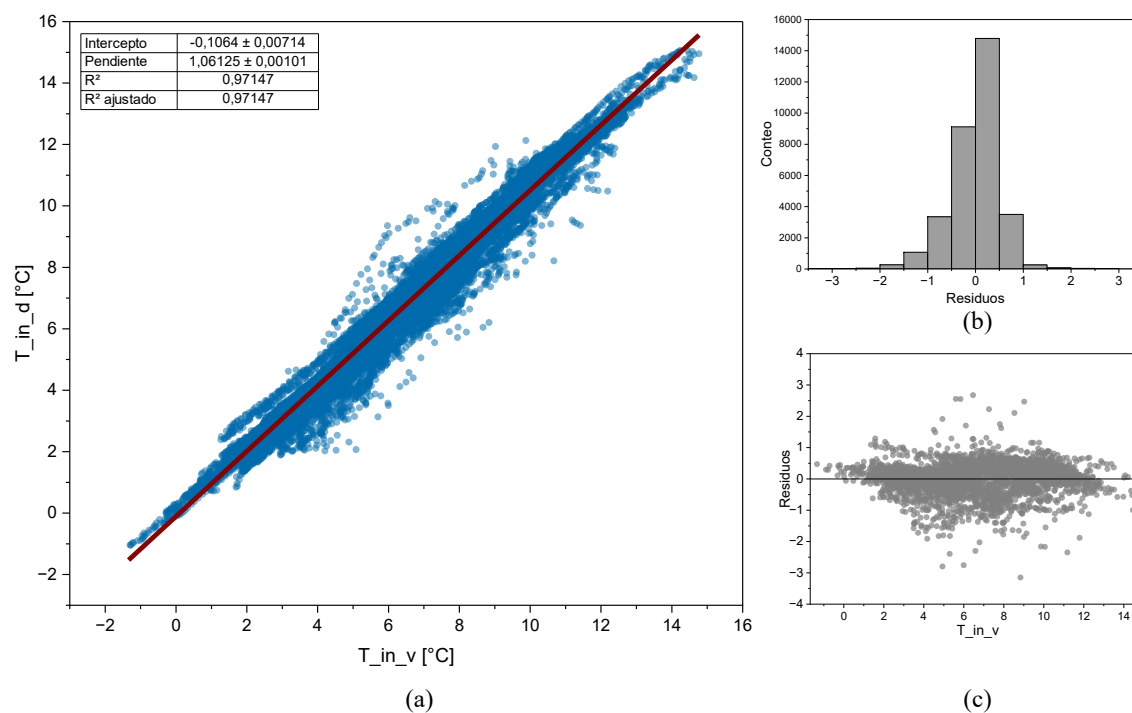
Tabla de estadísticas descriptivas de las variables

Variable	N	Media [°C]	Desviación estándar [°C]	Mínimo [°C]	Máximo [°C]
T_in_d	325545	6,79	3,03	-1,10	15,10
T_in_v	325545	6,50	2,82	-1,34	14,77
To	2449	3,83	6,89	-14,40	19,60

La regresión lineal entre las temperaturas del dormitorio de damas (T_in_d) y la temperatura del dormitorio de varones (T_in_v) mostrada en la Figura 23, revela una relación fuerte y altamente significativa entre ambas variables. El coeficiente de determinación (R^2) de 0,971 indica que más del 97,1 % de la varianza en T_in_d es explicada por T_in_v, lo que subraya que ambos dormitorios responden de manera casi idéntica a las condiciones térmicas ambientales (Tabla 6).

Figura 23

(a) Regresión lineal entre las temperaturas internas del dormitorio de damas y el dormitorio de varones, (b) Histograma de residuos, (c) Dispersión de residuos



El coeficiente de regresión (pendiente) de 1,061 indica que por cada grado Celsius de incremento en el dormitorio de varones (T_{in_v}), el dormitorio de damas aumenta en 1,06 °C. El valor del intercepto (Tabla 7) no significativo de -0,106, sugiere que la relación entre las variables es casi directamente proporcional, aunque el valor de la pendiente que es ligeramente superior a la unidad, indica que la temperatura en el dormitorio de damas es ligeramente más sensible a los cambios térmicos. El análisis de residuos confirma que el modelo es adecuado, ya que el histograma de residuos (Figura 23b) se aproxima a una distribución normal centrada en cero y las gráficas de dispersión de residuos (Figura 23c) no muestran patrones obvios de heterocedasticidad o no linealidad.

Tabla 6

Tabla estadística de la regresión lineal

	T_in_d
Número de puntos	32546
Grados de libertad	32544
Suma residual de cuadrados	8536,39456
Índice de Pearson (r)	0,98563
Coefficiente de determinación (R^2)	0,97147
R^2 ajustado	0,97147

Tabla 7

Tabla de parámetros de la regresión lineal

		Valor	Error estándar	t- valor	Prob > t
T_in_d	Intercepto	-0,1064	0,000714	-14,89629	$5,094 \times 10^{-50}$
	Pendiente	1,06125	0,00101	1052,65495	0

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) mostrado en la Tabla 8, revelan una relación estadísticamente significativa lo cual se evidencia mediante un valor F extremadamente alto (1105052,452) y una probabilidad asociada inferior a 0,0001, esto indica que la variabilidad explicada por el modelo es altamente significativa y que existe una fuerte relación lineal entre ambas variables.

Tabla 8*Tabla de ANOVA*

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F-valor	Prob > F
T_in_d Modelo	1	290653,547	290653,547	1108082,452	<0,0001
Error	32544	8536,395	0,262		
Total	32545	299789,941			

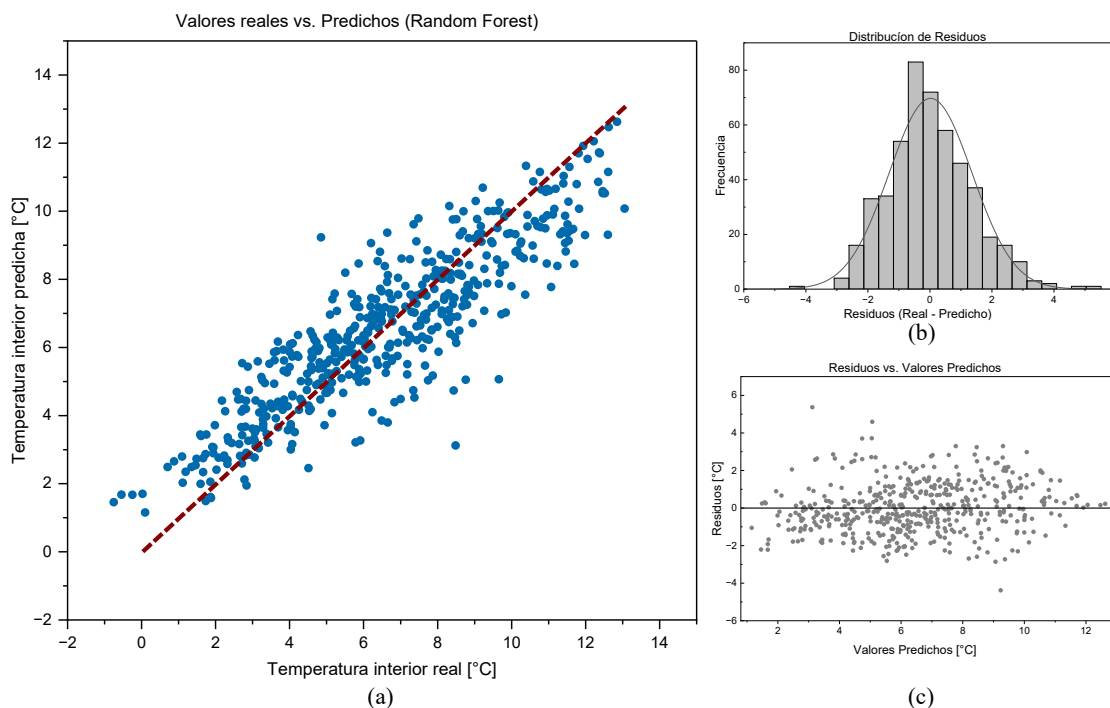
Estos resultados del análisis de regresión lineal muestran que las temperaturas interiores de ambos dormitorios evolucionan de manera sincronizada, reflejando una respuesta térmica compartida ante las mismas condiciones ambientales externas, debido a su proximidad física y similares características constructivas. Estos resultados justifican el uso de la temperatura en el interior del dormitorio de varones T_in_v como referencia térmica (control) al evaluar el comportamiento térmico del dormitorio de damas T_in_d con un sistema de calefacción que proporciona energía térmica para calentamiento.

4.3.2 Parámetros meteorológicos y su influencia en la temperatura interior de las habitaciones

El análisis de la influencia de los parámetros meteorológicos en la temperatura en el interior de los dormitorios se llevó a cabo mediante un modelo de Random Forest de Machine Learning, el cual demostró ser el más adecuado para entender las complejas relaciones no lineales presentes en los datos. En la Figura 24a muestra los valores de la temperatura interior real y los predichos por el modelo para e conjunto de prueba. La Figura 24b muestra la distribución de los residuos del modelo y la Figura 24c muestra los residuos en función de los valores predichos. En la Tabla 9 se puede apreciar los valores para el coeficiente de determinación (R^2) de 0,787, un error absoluto medio (MAE) de 1,025 °C y una raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 1,340 °C. Estos indicadores sugieren una capacidad predictiva robusta del modelo, explicando aproximadamente el 78,7 % de la variabilidad observada en las temperaturas del interior de los dormitorios.

Figura 24

Validación del modelo de Random Forest, (a) comparación entre valores reales y predichos, (b) distribución de residuos y (c) análisis de homocedasticidad

**Tabla 9**

Resultados del modelo Random Forest

Métrica	Valor
MAE (Error absoluto medio)	1,053
RMSE (Raíz del error cuadrático medio)	1,340
R ² (Coeficiente de determinación)	0,787

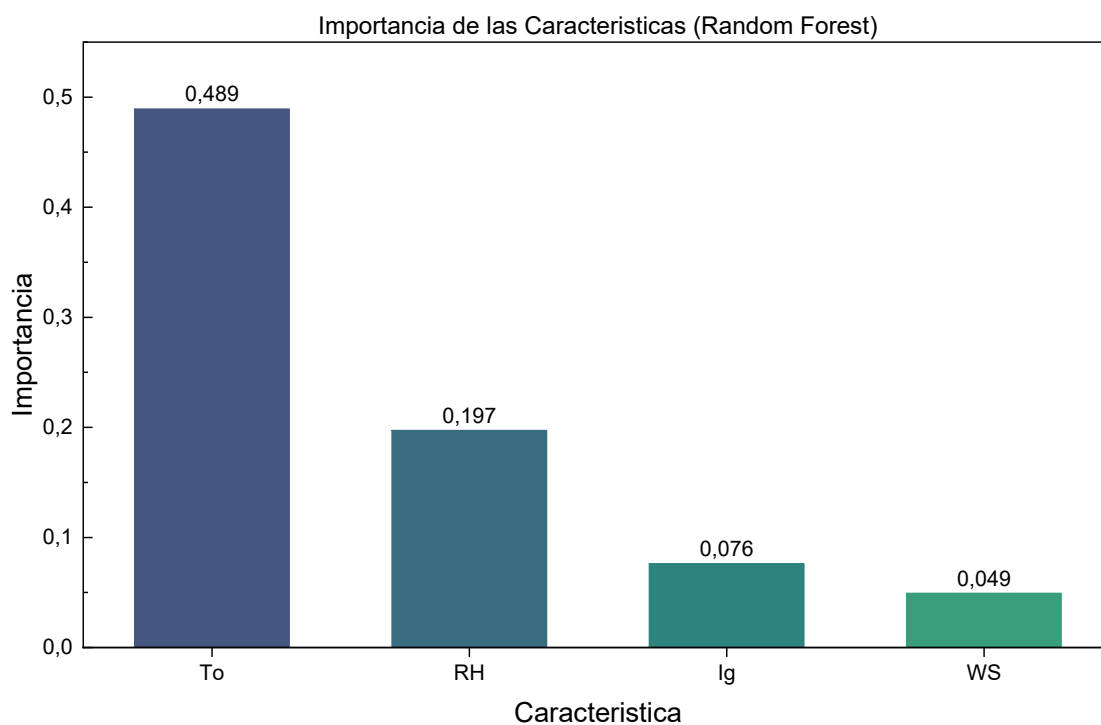
La temperatura exterior (T_o) es el parámetro más influyente en la temperatura interior de los dormitorios, con una importancia de característica de 0,489 como se muestra en la Figura 25. Este resultado es consistente con la física de la transferencia de calor, donde la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior es la principal causa del flujo de energía, además sugiere la limitada efectividad del aislamiento térmico de la envolvente de los dormitorios.

El siguiente parámetro meteorológicos que mayor influencia tiene sobre las temperaturas interiores es la humedad relativa (RH) con una importancia de 0,197, lo que

sugiere que la capacidad del aire para retener el calor y la sensación térmica asociada es un factor significativo dentro de dos dormitorios. La irradiancia solar (I_g) con una importancia de 0,076 muestra una influencia considerable pero no de mayor impacto como los dos anteriores. La irradiancia solar es particularmente relevante durante las horas diurnas, aportando una carga térmica directa a través de la envolvente de las edificaciones. Los resultados de este modelo de Random Forest considera la irradiancia solar igual a cero durante las horas nocturnas, un aspecto clave en la preparación de datos, permitiendo al modelo diferenciar adecuadamente entre el comportamiento térmico diurno y nocturno. Por último, la velocidad del viento (WS) presenta una influencia menor con una importancia de 0,049. Aunque el aire puede afectar la infiltración del aire y la convección externa, su impacto en la temperatura interior de los dormitorios es menor en comparación al resto de los parámetros meteorológicos.

Figura 25

Importancia de las variables meteorológicas



4.4 Temperatura de la envolvente

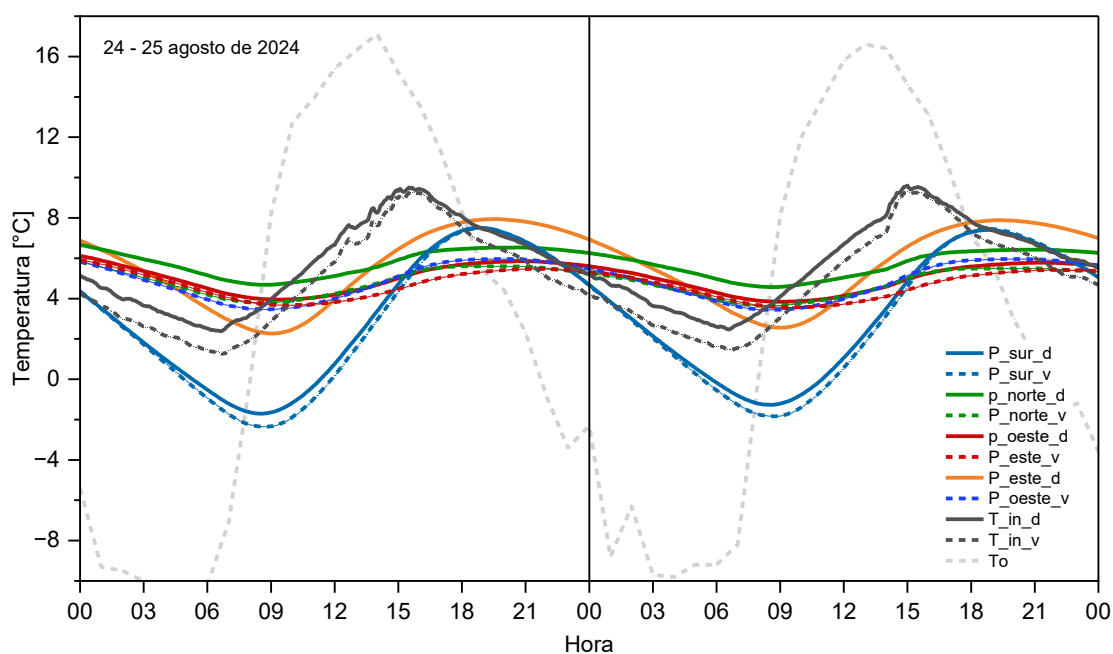
La envolvente de una edificación es el conjunto de elementos constructivos que separan el interior del ambiente exterior actuando como barrera térmica, acústica de humedad. Entender su comportamiento térmico es importante para el confort térmico y la eficiencia energética por lo que la medición de su temperatura superficial es clave para entender los posibles puntos de pérdida de energía en forma de calor.

4.4.1 Temperaturas superficiales de las paredes

El análisis de las temperaturas superficiales de la envolvente se realizó en el periodo de julio a agosto de 2024. La Figura 26 muestra el comportamiento detallado para los días 24 y 26 de agosto de 2024 y revela una clara correspondencia con la temperatura del aire en el interior de las habitaciones mostrando una inercia térmica que amortigua el efecto de la temperatura exterior. Durante las horas de menor temperatura exterior las paredes se mantienen menos frías, actuando como acumulador de calor. Por el contrario, durante las horas de mayor temperatura exterior, las paredes registran temperaturas inferiores a las de la temperatura del aire en el interior, contribuyendo al enfriamiento de las habitaciones durante el día.

Figura 26

Temperaturas superficiales de las paredes interiores



La pared que divide ambas habitaciones presenta un comportamiento térmico muy similar en ambas caras (P_oeste_d para la cara orientada hacia el dormitorio de damas y P_este_v para la cara orientada hacia el dormitorio de varones, ver Figura 5), con una diferencia de temperaturas mínima entre ellas. La temperatura superficial promedio registrada para P_oeste_d fue de 6,2 °C, mientras que para P_este_v fue de 6,1 °C. en cuanto a los extremos térmicos, el valor mínimo de la temperatura superficial registrado para P_oeste_d fue de 0,3 °C y para P_este_v de 0,4 °C; por otro lado, la temperatura superficial máxima alcanzó los 12,1 °C en P_oeste_d y 11,7 °C en P_este_v, como se detalla en la Tabla 10. Esta similitud en los valores de las temperaturas superficiales de la pared divisoria sugiere una distribución de calor homogénea entre ambos dormitorios lo que a su vez es evidencia de una transferencia de calor equilibrada a través de esta pared.

Tabla 10

Valores promedio, máximos y mínimos de la pared divisoria

Habitación	Etiqueta	Promedio [°C]	Mínimo [°C]	Máximo [°C]
Dormitorio de damas	P_oeste_d	6,2	0,3	12,1
Dormitorio de varones	P_este_v	6,1	0,4	11,7

Las paredes orientadas al sur (P_sur_d y P_sur_v) y la pared este del dormitorio de damas (P_este_d) mostraron una mayor fluctuación térmica a lo largo del día como se detalla en la Tabla 11, resultado directo de su exposición a las condiciones extremas del ambiente exterior y a la incidencia directa de la radiación solar.

Tabla 11

Valores promedio, máximos y mínimos de las paredes expuestas al ambiente

Habitación	Etiqueta	Promedio [°C]	Mínimo [°C]	Máximo [°C]
Dormitorio de damas	P_sur_d	5,1	-4,2	15,0
	P_este_d	6,7	-1,3	14,3
Dormitorio de varones	P_sur_v	5,0	-5,3	14,5

4.4.2 Temperaturas superficiales de los pisos

El análisis de las temperaturas superficiales de los pisos se realizó en el periodo de julio a agosto de 2024. La Figura 27 muestra el comportamiento detallado para los días 24 y 25 de agosto en la cual se aprecia que ambas habitaciones muestran una variación de la temperatura significativamente menor en comparación con las paredes y los techos. Estas temperaturas se mantienen en un rango intermedio entre la temperatura del aire en el interior y la temperatura exterior, lo que sugiere una influencia moderada de las condiciones ambientales externas sobre la temperatura del piso. Durante las noches, los pisos se enfrían a un ritmo menor más lento que el aire en el interior, mientras que, durante el día, su calentamiento es más lento y con valores muy por debajo de la temperatura del aire en el interior, lo que provoca una pérdida del calor de la habitación por los pisos.

Figura 27

Temperaturas superficiales de los pisos

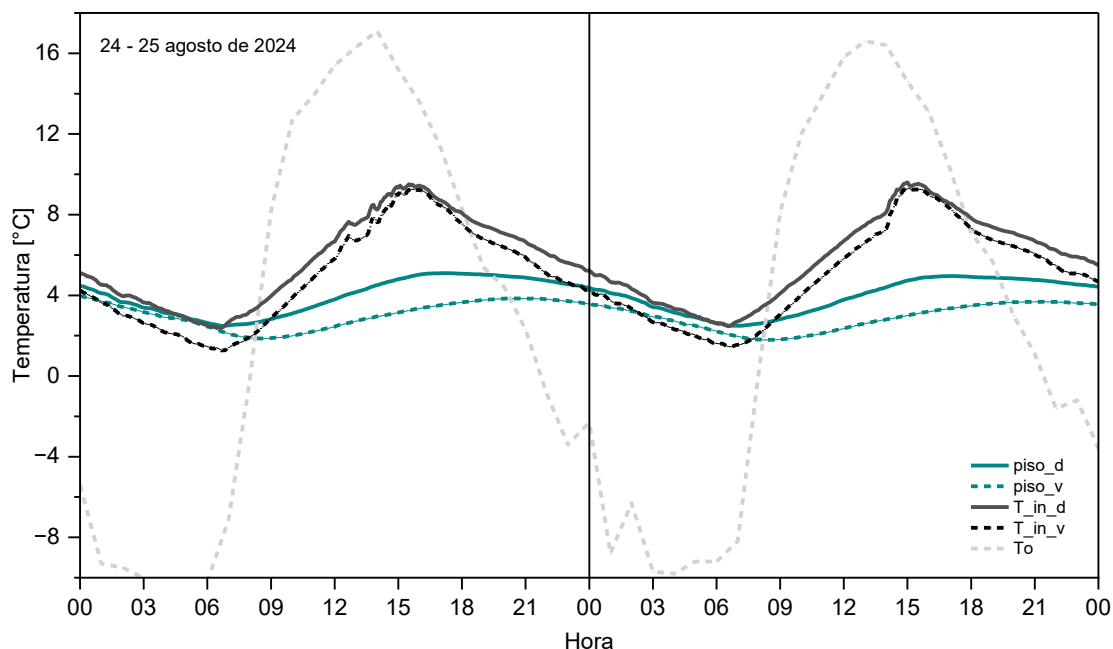


Tabla 12

Valores promedio, máximos y mínimos de los pisos

Habitación	Etiqueta	Promedio [°C]	Mínimo [°C]	Máximo [°C]
Dormitorio de damas	piso_d	5,0	-0,6	11,0
Dormitorio de varones	piso_v	4,6	-0,3	9,7

4.4.3 Temperaturas superficiales de los techos interiores

El análisis de las temperaturas superficiales de los techos interiores se realizó en el periodo de julio a agosto de 2024. En el comportamiento térmico detallado para los días 24 y 25 de agosto mostrado en la Figura 28, presenta una mayor amplitud térmica. Durante el día, los techos alcanzan as temperaturas más altas, superando incluso a la temperatura del aire en el interior de las habitaciones, lo que indica una ganancia térmica significativa a través de estas superficies. Por las noches, los techos se enfrían rápidamente, llegando a registrar temperaturas inferiores a la temperatura del aire en el interior. Este comportamiento muestra que los techos son el elemento de la envolvente más expuesto a las condiciones climáticas exteriores y uno de los principales responsables de las ganancias y pérdidas de calor en las habitaciones.

Figura 28

Temperaturas superficiales de los techos interiores

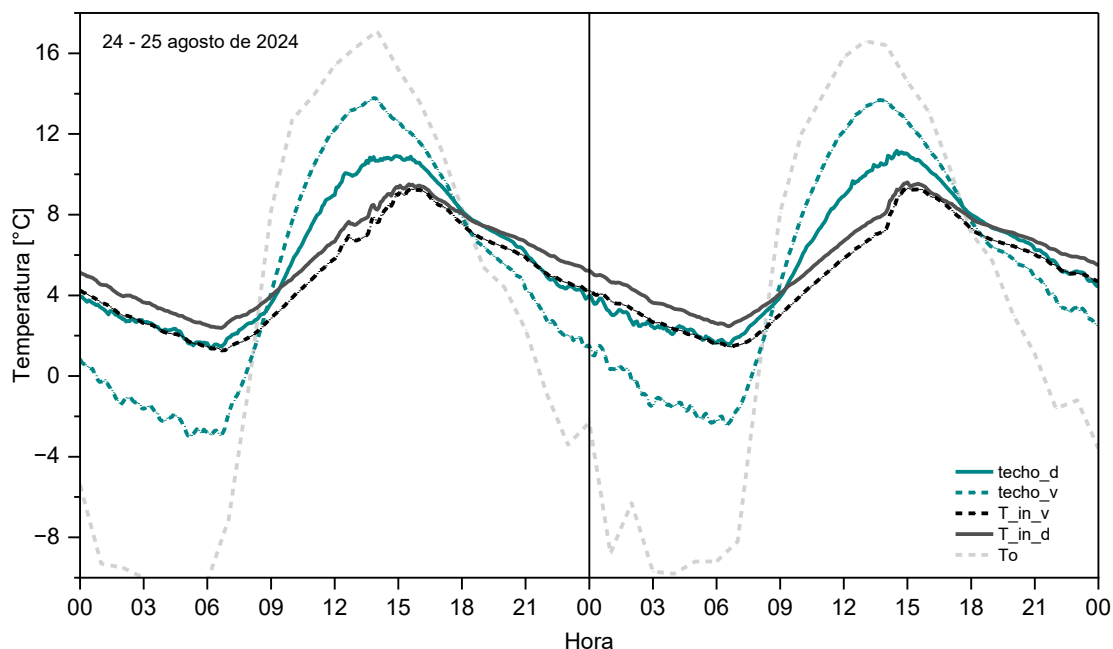


Tabla 13

Valores promedio, máximos y mínimos de los techos interiores

Habitación	Etiqueta	Promedio [°C]	Mínimo [°C]	Máximo [°C]
Dormitorio de damas	techo_d	6,9	-2,4	18,7
Dormitorio de varones	techo_v	6,6	-5,6	22,4

4.4.4 Temperaturas superficiales de las ventanas

El análisis de las temperaturas superficiales de las ventanas se realizó en el periodo de julio a agosto de 2024. La Figura 29 muestra un análisis detallado para los días 24 y 25 de agosto en la cual se aprecia que las ventanas presentan la menor inercia térmica de todos los elementos de la envolvente analizados en este estudio, siguiendo muy de cerca las fluctuaciones de la temperatura exterior. Durante las noches, las ventanas son puntos más fríos de las habitaciones, con temperaturas que llegan a descender por debajo de los 0 °C, lo que indica que una pérdida de calor considerable. Durante el día, las temperaturas de las ventanas aumentan rápidamente, aunque se mantiene por debajo de la temperatura del aire exterior. Este comportamiento muestra que las ventanas son el elemento más crítico de la envolvente.

Figura 29

Temperaturas superficiales interiores de las ventanas

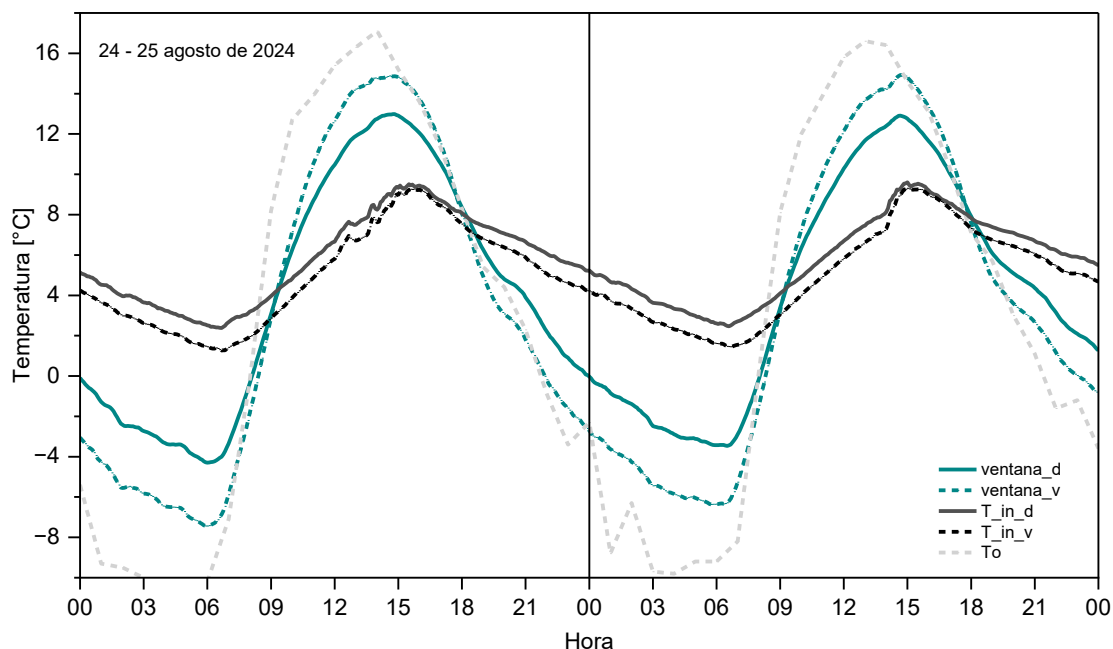


Tabla 14

Valores promedio, máximos y mínimos de las ventanas

Habitación	Etiqueta	Promedio [°C]	Mínimo [°C]	Máximo [°C]
Dormitorio de damas	ventana_d	5,6	-7,6	21,7
Dormitorio de varones	ventana_v	5,0	-9,7	22,6

4.5 Confort térmico

En este apartado se analiza la evolución del confort térmico en una de las habitaciones (dormitorio de damas) a lo largo de los tres periodos (ver apartado 4.1.3) que comprende el presente estudio. En el primer periodo no se cuenta con una fuente de calefacción. En el segundo periodo se cuenta con calefacción solar activo, pero sin un termostato que regule la temperatura, y el tercer periodo cuenta con calefacción solar activo y con un termostato que regule su temperatura.

4.5.1 Cálculo del confort térmico

Para evaluar el confort térmico de las habitaciones es necesario calcular la temperatura neutra (T_n) o temperatura de confort mediante métodos establecidos. La fórmula propuesta (ecuación 1) por Molina et al. (2023) representa un enfoque adaptativo que considera las condiciones locales para determinar esta temperatura de neutralidad térmica.

Tabla 15

Valores de la temperatura neutra mensual para Kallapuma

Mes - año	Temperatura Promedio mensual [°C]	Temperatura neutra T_n [°C]
04 – 24	6,9	15,7
05 – 24	4,6	14,4
06 – 24	3,2	13,6
07 – 24	2,6	13,2
08 – 24	3,5	13,8
09 – 24	5,4	14,9
10 – 24	5,8	15,1
11 – 24	6,5	15,5
12 – 24	7,7	16,2
01 – 25	5,7	15,0
02 – 25	7,0	15,8
03 – 25	6,2	15,4
04 – 25	4,9	14,6
05 – 25	3,9	14,0

Los resultados obtenidos para las temperaturas neutras se muestran en la Tabla 15, Los valores oscilan entre 13,2 °C para julio de 2024 y 16,2 °C para diciembre de 2024, con una media anual de 14,8 °C y una amplitud de confort térmico de 3,0 °C. la variación estacional muestra un patrón coherente con el clima de Kallapuma, donde las temperaturas neutras más bajas se registran durante el invierno y las más elevadas se durante el verano.

Se conoce como zona de confort térmico al rango de temperaturas comprendido entre $T_n - \sigma$ como límite inferior y $T_n + \sigma$ como límite superior, el valor de σ fue definido igual a 2,5 °C por Molina et al. (2023). Las zonas de confort térmico, calculado para los tres periodos de evaluación, se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16

Zonas de confort térmico para cada periodo de evaluación

Periodo	Mes – año	T _n [°C]	Zona de confort térmico	
			Límite inferior T _n – σ [°C]	Límite superior T _n + σ [°C]
Primero	07 – 24	13,2	10,7	15,7
	08 – 24	13,8	11,3	16,3
Segundo	12 – 14	16,2	13,7	18,7
Tercero	03 – 25	15,4	12,9	17,9
	04 – 25	14,6	12,1	17,1

4.5.2 Confort térmico durante el primer periodo

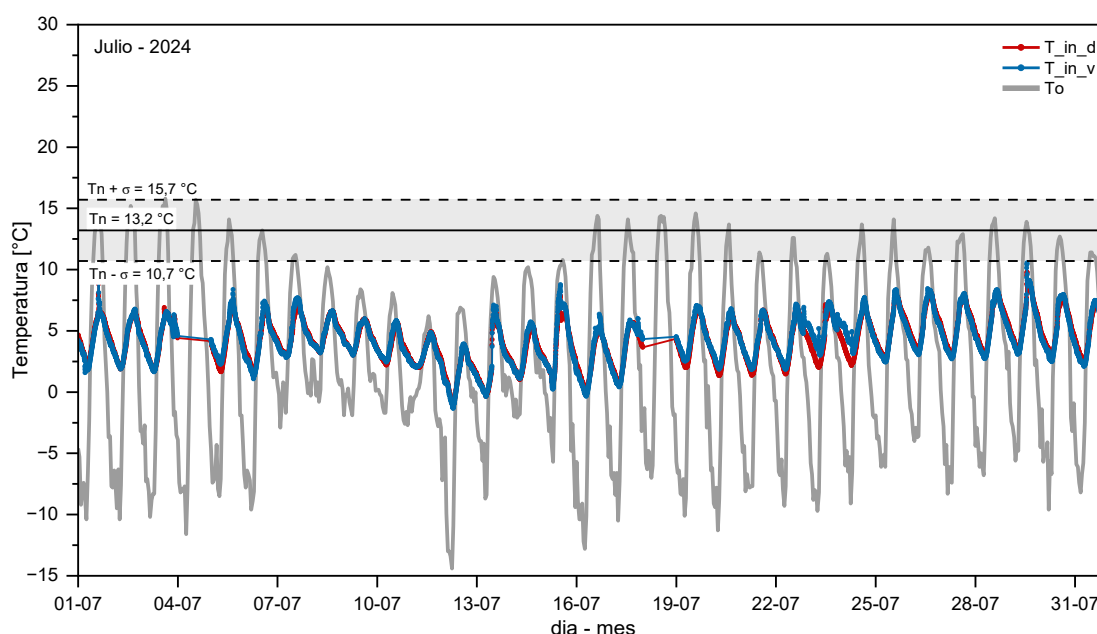
Durante este primer periodo, que abarcó los meses de julio y agosto de 2024, ninguna de las habitaciones bajo estudio contaba con algún tipo de sistema de calefacción. Las temperaturas de confort térmico calculados fueron de 13,2 °C para julio y de 13,8 °C para agosto, con un rango de $\pm 2,5$ para definir la zona de confort (Tabla 16).

Las temperaturas interiores registradas en los dormitorios, presentadas en la Figura 30, muestran que en ningún momento durante el mes de julio de 2024 se alcanzó la zona de confort térmico en ninguna de las dos habitaciones evaluadas. En consecuencia, el porcentaje de tiempo durante el cual las condiciones estuvieron dentro dicho rango de

confort (11,3 °C a 16,3 °C) fue de 0,0 % tanto para el dormitorio de damas (T_{in_d}) como para el dormitorio de varones (T_{in_v}). La temperatura promedio registrada en el dormitorio de damas fue de 4,2 °C, ligeramente inferior a los 4,3 °C medidos en el dormitorio de varones, mientras que las temperaturas mínimas internas fueron de -1,1 °C y -1,3 °C para los dormitorios de damas y varones, respectivamente. La temperatura promedio ambiente para este mes fue de 2,3 °C y su valor mínimo de -14,4 °C.

Figura 30

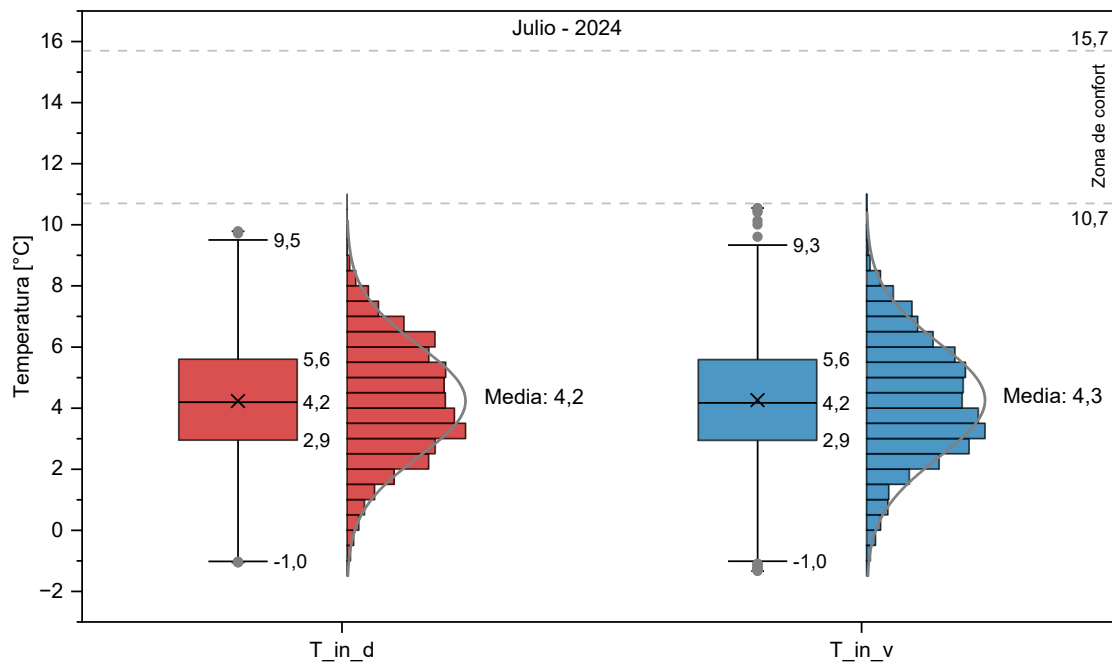
Temperaturas internas de los dormitorios para el mes de julio - 2024



La Figura 31 muestra la distribución de temperaturas internas de ambos dormitorios para el mes de julio de 2024, revelando condiciones térmicas críticamente por debajo de la zona de confort. Para el dormitorio de damas (T_{in_d}), la media de 4,2 °C se sitúa 6,5 °C por debajo del límite inferior de confort, con un rango intercuartílico (RIC) estrecho (2,9 – 5,6 °C) que refleja baja variabilidad y una concentración persistente de valores en rangos térmicos fríos. En el dormitorio de varones (T_{in_v}), la media ligeramente superior (4,3 °C) y un RIC similar (2,9 – 5,6 °C) indican una dinámica térmica similar al dormitorio de damas, con un valor máximo también insuficiente para alcanzar el rango de confort. La similitud en los parámetros estadísticos (Tabla 17) entre ambas habitaciones sugiere una respuesta térmica homogénea a las condiciones climáticas de Kallapuma, con temperaturas internas que no logran mitigar el frío extremo.

Figura 31

Diagrama de cajas para la temperatura interior en los dormitorios para julio - 2024

**Tabla 17**

Valores promedio, máximos y mínimos de la temperatura interior en los dormitorios para el mes de julio - 2024

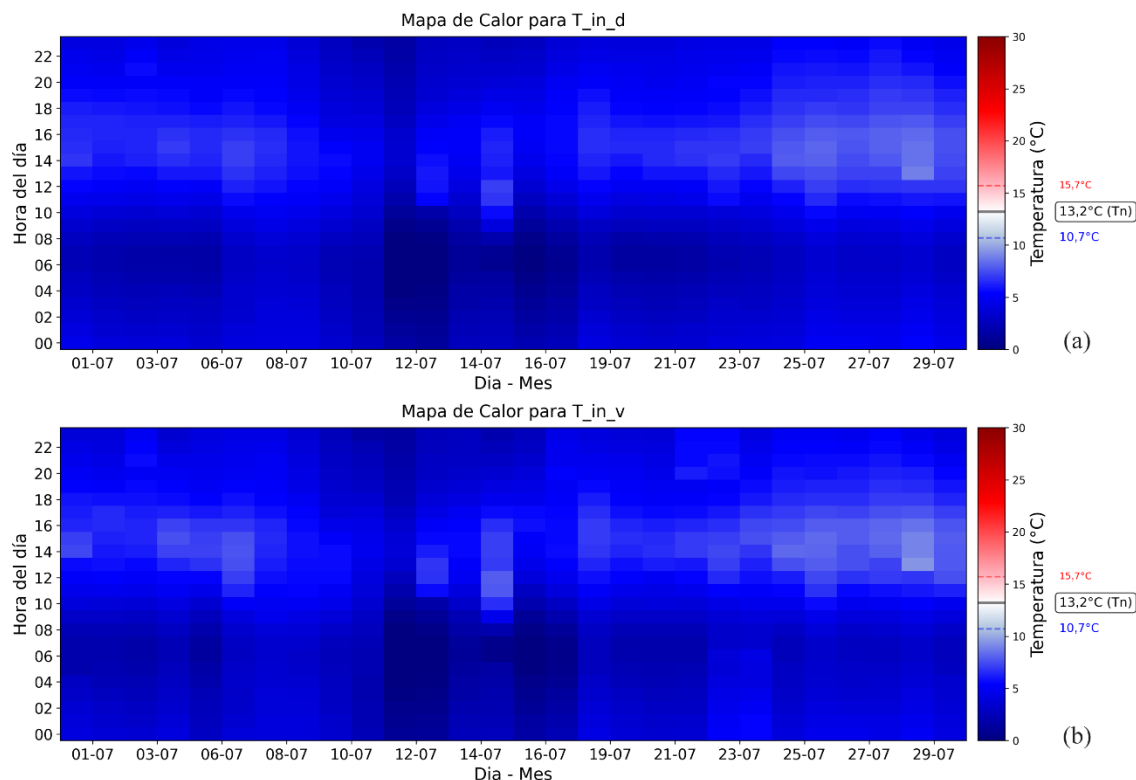
	Límite inferior [°C]	Límite superior [°C]	Temperatura neutra [°C]	Desviación estándar [°C]	Rango intercuartílico	
Tn	10,7	15,7	13,2	2,5		
	Mínimo [°C]	Máximo [°C]	Promedio [°C]	Desviación estándar [°C]	Percentil 25 % (Q1)	Percentil 75 % (Q3)
T_in_d	-1,1	9,8	4,2	1,8	2,9	5,6
T_in_v	-1,3	10,6	4,3	1,9	2,9	5,6
To	-14,4	15,8	2,4	7,1	-3,2	8,7

La Figura 32 complementa el análisis mediante un mapa de calor donde el eje horizontal representa los días del mes y el eje vertical, las horas del día. La escala de colores indica las condiciones térmicas: el color blanco representa la zona de confort, mientras que las tonalidades de azul y rojo simbolizan el desconfort por frío y por calor, respectivamente. Intensificándose con el oscurecimiento del color. El análisis visual del mapa confirma que, durante todo el mes de julio, no se registraron temperaturas [en el

interior de los dormitorios] dentro del rango de confort térmico. La totalidad de los datos se concentra en la gama de azules, lo que indica una condición persistente de desconfort térmico por frío en ambos dormitorios de estudio.

Figura 32

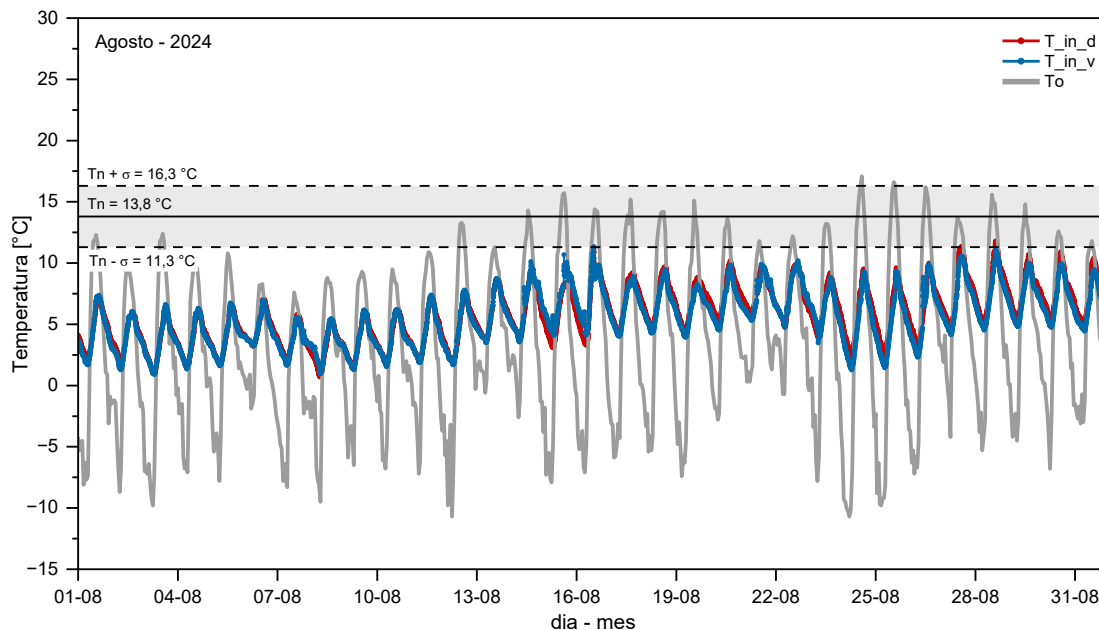
Mapa de calor de los dormitorios para el mes de julio - 2024



Para el mes de agosto de 2024, la Figura 33 muestra un ligero incremento en las temperaturas registradas en comparación al mes de julio, no obstante, los valores se mantuvieron muy por debajo de la zona de confort térmico. La temperatura promedio en el dormitorio de damas fue de 5,8 °C, mientras que, en el de varones fue de 5,6 °C, con una temperatura ambiente exterior promedio de 3,5 °C. A pesar de este leve incremento de temperaturas, la fracción de tiempo en la cual las temperaturas se mantienen dentro del confort térmico apenas alcanzó un 0,22 % para el dormitorio de damas y un 0,01 % para el de varones, reflejando la persistencia de desconfort térmico por frío.

Figura 33

Temperaturas internas de los dormitorios para el mes de agosto - 2024

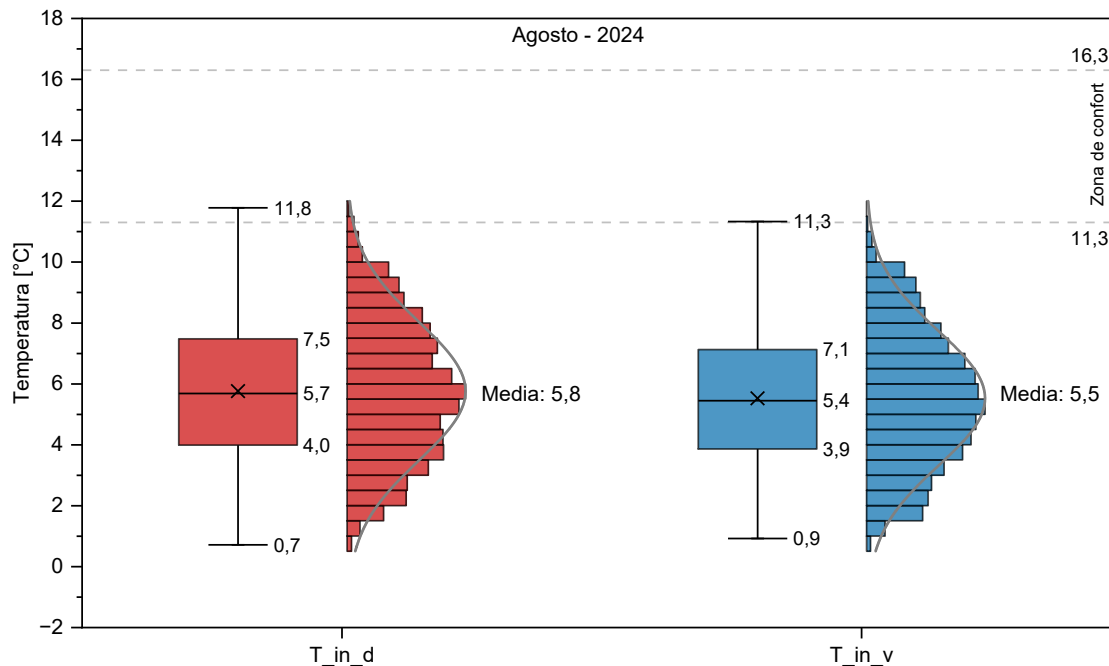


La grafica de distribución representada en la Figura 34 para agosto de 2024, muestra que la temperatura interna en ambos dormitorios continúa siendo críticas tal como ya se había notado en la Figura 33, aunque hay una leve mejora relativa en comparación con julio. En el dormitorio de damas (T_{in_d}), la media de $5,8\text{ °C}$ permanece $5,5\text{ °C}$ por debajo del límite inferior de la zona de confort con un rango intercuartílico (RIC) de $4,0 - 7,5\text{ °C}$ que refleja una concentración persistente de temperaturas consideradas como frío. No obstante, el valor máximo registrado ($11,8\text{ °C}$) supera ligeramente el umbral mínimo de confort, aunque es insuficiente para alterar la tendencia general. En el dormitorio de varones (T_{in_v}), la media ($5,5\text{ °C}$) y el RIC ($3,9 - 7,1\text{ °C}$) son comparables a los del dormitorio de damas con un valor máximo de $1,3\text{ °C}$ que apenas alcanza el límite inferior de confort.

Los parámetros estadísticos mostrados en la Tabla 18, sugieren, al igual que para el mes de julio, una respuesta térmica homogénea a las condiciones climáticas externas entre ambas habitaciones. Estos valores observados destacan que los dormitorios no son capaces de garantizar el bienestar térmico dentro de sus instalaciones para cualquier habitante que se aloje en él.

Figura 34

Diagrama de cajas para la temperatura interior en los dormitorios para agosto - 2024

**Tabla 18**

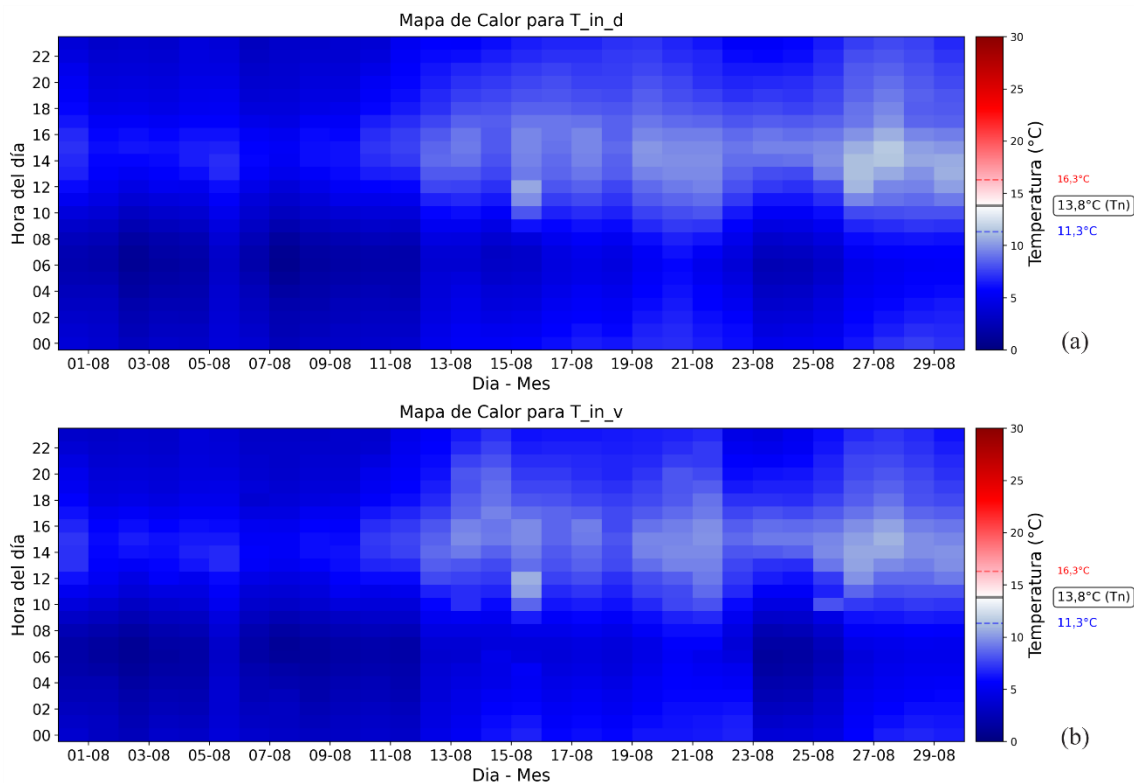
Valores promedio, máximos y mínimos de la temperatura interior en los dormitorios para el mes de agosto - 2024

	Límite inferior [°C]	Límite superior [°C]	Temperatura neutra [°C]	Desviación estándar [°C]	Rango intercuartílico	
Tn	11,3	16,3	13,8	2,5		
	Mínimo [°C]	Máximo [°C]	Promedio [°C]	Desviación estándar [°C]	Percentil 25 % (Q1)	Percentil 75 % (Q3)
T_in_d	0,7	11,8	5,8	2,3	4,0	7,5
T_in_v	0,9	11,3	5,5	2,2	3,9	7,1
To	-10,7	17,1	3,5	6,5	-1,4	8,7

El correspondiente mapa de calor para agosto (Figura 35) muestra un patrón similar al observado para el mes de julio. La predominancia de colores azules confirma que ambos dormitorios continúan sin alcanzar la zona de confort térmico durante prácticamente todo el mes, manteniéndose la sensación de disconfort por frío dentro de las habitaciones de estudio.

Figura 35

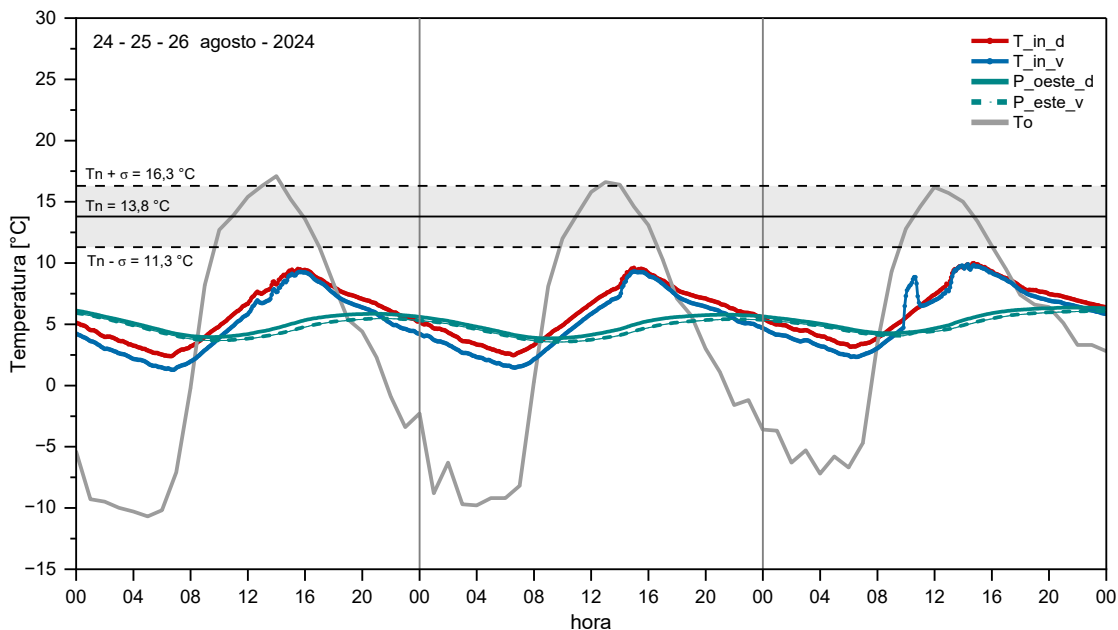
Mapa de calor de los dormitorios para el mes de agosto - 2024



Un análisis detallado del periodo del 24 al 36 de agosto de 2024 (Figura 36) permite observar como las temperaturas internas de ambas habitaciones (T_{in_d} y T_{in_v}) se mantuvieron considerablemente por debajo del límite inferior de la zona de confort térmico durante las 24 horas del día, acentuándose esta condición durante las horas de madrugada. Adicionalmente, en la gráfica se aprecia las temperaturas superficiales de ambas caras de la pared que divide los dormitorios de estudio. (ver Figura 5), donde P_{oeste_d} corresponde a la superficie orientada al dormitorio de damas y P_{este_v} a la superficie orientada al dormitorio de varones. Ambas temperaturas superficiales muestran un comportamiento térmico muy similar, registrándose una diferencia promedio de 0,20 °C y diferencia máxima de apenas 1,34 °C entre P_{oeste_d} y P_{este_v} durante todo el primer periodo de evaluación. La similitud entre las temperaturas superficiales medidas en ambas caras de la pared es un resultado esperado, dado el comportamiento casi idéntico de las temperaturas internas del aire en ambos dormitorios, por lo tanto, la transferencia de calor entre ambos dormitorios es mínima.

Figura 36

Temperaturas internas y superficiales de la pared compartida entre los dormitorios



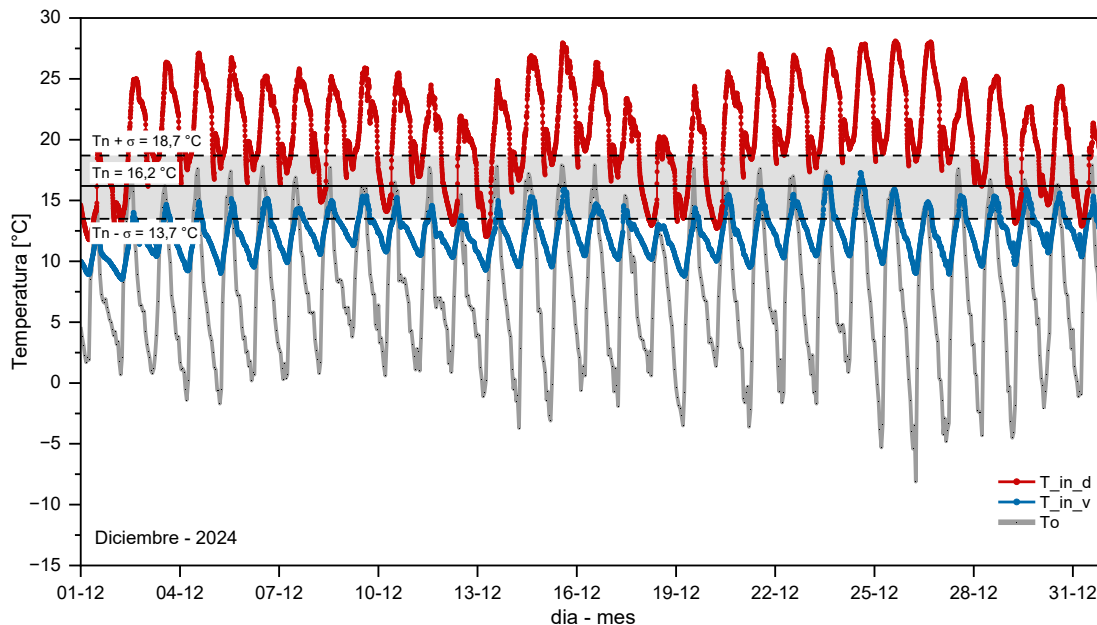
4.5.3 Confort térmico habitacional durante el segundo periodo

En este segundo periodo, correspondiente al mes de diciembre del 2024, se introdujo un sistema de calefacción solar activo (SCSA) en el dormitorio de damas, aunque sin un termostato para regular la temperatura. El dormitorio de varones, por su parte, continuó sin ningún tipo de sistema de calefacción. La temperatura de confort térmico calculado para diciembre fue de 16,2 °C, con un rango de $\pm 2,5$ para definir la zona de confort (Tabla 16).

Los valores de temperatura registrados y mostrados en la Figura 37, revelan una notable elevación de temperatura, alcanzando una media de 20,4 °C. Esta mejora se refleja también en la fracción de tiempo en la cual las temperaturas estuvieron dentro de la zona de confort en un 27,20 %. Sin embargo, la ausencia de un termostato de control resultó en fluctuaciones significativas con sobrecalentamientos, con temperaturas máximas que llegan a los 28,1 °C. Esto sugiere que, si bien la calefacción solar es efectiva para aumentar la temperatura, la falta de regulación puede llevar a condiciones de disconfort por exceso de calor. En contraste, el dormitorio de varones, sin calefacción, registró una temperatura promedio de 12,3 °C y un 20,73 % del tiempo en confort.

Figura 37

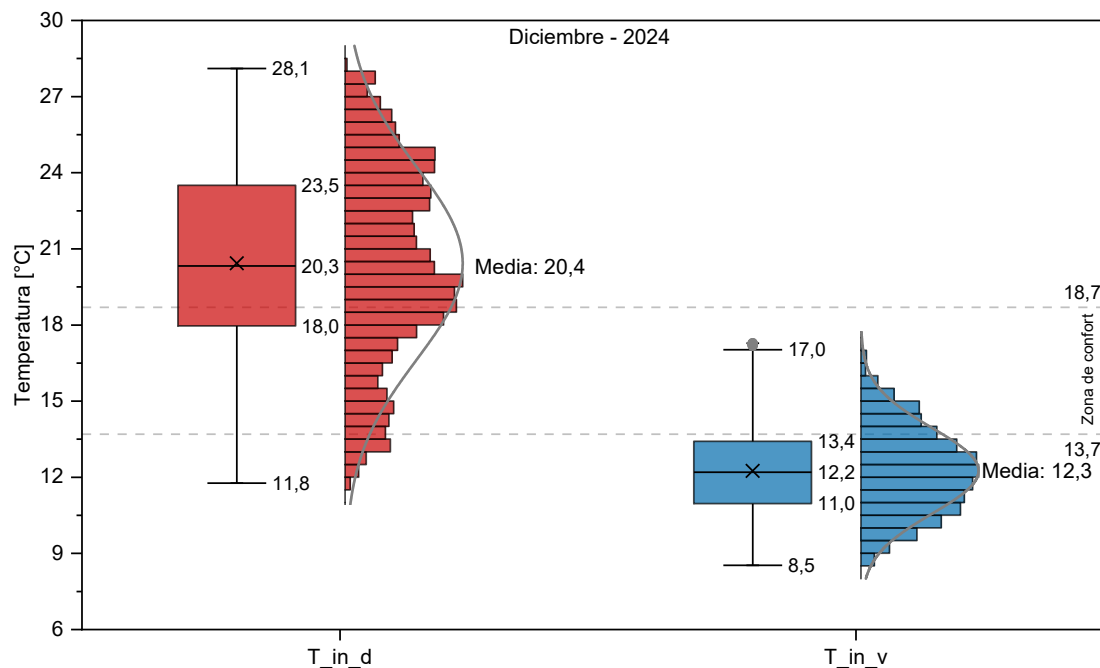
Temperaturas internas de los dormitorios para el mes de diciembre - 2024



La Figura 38 muestra la distribución para el mes de diciembre 2024, en la cual se muestra como las temperaturas internas evidencian un marcado contraste entre los dormitorios, influenciado por el sistema de calefacción solar activo (SCSA) en el dormitorio de damas (T_{in_d}) y la ausencia de sistemas térmicos en el de varones (T_{in_v}). En el dormitorio de damas, la media de $20,4\text{ °C}$ supera en $1,7\text{ °C}$ el límite superior de la zona de confort térmico, con casi el 75 % de las observaciones (rango intercuartílico $18,0 - 23,5\text{ °C}$) ubicándose por encima del límite superior de confort. Este patrón refleja un sobrecalentamiento significativo a causa del SCSA no regulado por termostato, lo que genera temperaturas internas críticamente elevadas, con valores máximos de hasta $28,1\text{ °C}$ (Tabla 19), por el contrario en el dormitorio de varones, la media de $12,3\text{ °C}$ se sitúa $1,4\text{ °C}$ por debajo del límite inferior de confort, con un RIC ($11,0 - 13,4\text{ °C}$) que concentra el 50 % de las observaciones en rangos térmicos fríos. Aunque el valor máximo alcanzó $17,0\text{ °C}$, la ausencia de algún tipo de sistema de calefacción mantuvo las condiciones predominantes por debajo del rango de confort. Estos resultados subrayan la necesidad de sistemas de regulación térmica en el dormitorio de damas para evitar disconfort térmico por sobrecalentamiento.

Figura 38

Diagrama de cajas para la temperatura interior en los dormitorios, diciembre - 2024

**Tabla 19**

Valores promedio, máximos y mínimos de la temperatura interior en los dormitorios para el mes de diciembre - 2024

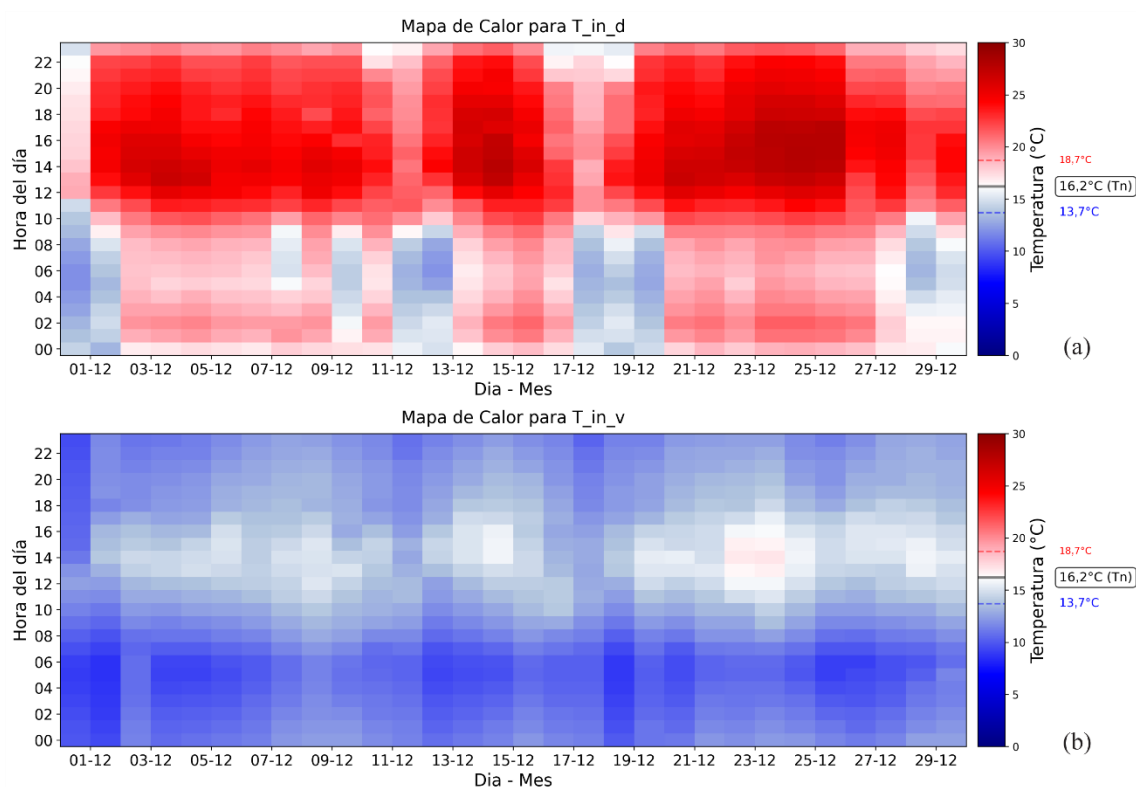
	Límite inferior [°C]	Límite superior [°C]	Temperatura neutra [°C]	Desviación estándar [°C]	Rango intercuartílico	
Tn	13,7	18,7	16,2	2,5		
	Mínimo [°C]	Máximo [°C]	Promedio [°C]	Desviación estándar [°C]	Percentil 25 % (Q1)	Percentil 75 % (Q3)
T_in_d	11,8	28,1	20,4	3,8	18,0	23,5
T_in_v	8,5	17,3	12,3	1,7	11,0	13,4
To	-8,1	17,9	7,7	5,8	3,2	12,9

El mapa de calor correspondiente a este periodo (Figura 39) revela una situación térmica diferenciada entre ambos dormitorios: el dormitorio de damas (Figura 39a) presenta condiciones de disconfort por exceso de calor, mientras que el dormitorio de varones, condiciones de disconfort por frío. En el dormitorio de varones (Figura 39b) se registran temperaturas más próximas al límite inferior de la zona de confort a pesar de no

contar con un SCSA. Este acercamiento a condiciones térmicas adecuadas se explica fundamentalmente por la transferencia de calor desde el dormitorio de damas hacia el dormitorio de varones a través de la pared que los divide. Esta transferencia de calor es mucho más significativa que los observados durante los meses de julio y agosto (sin SCSA), esto debido a la diferencia promedio de $2,61\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre $P_{\text{oeste_d}}$ y $P_{\text{este_v}}$ y un valor máximo de $4,53\text{ }^{\circ}\text{C}$ registrada entre las caras opuestas de la pared (Figura 40), confirmado la existencia de una gradiente de temperatura significativo.

Figura 39

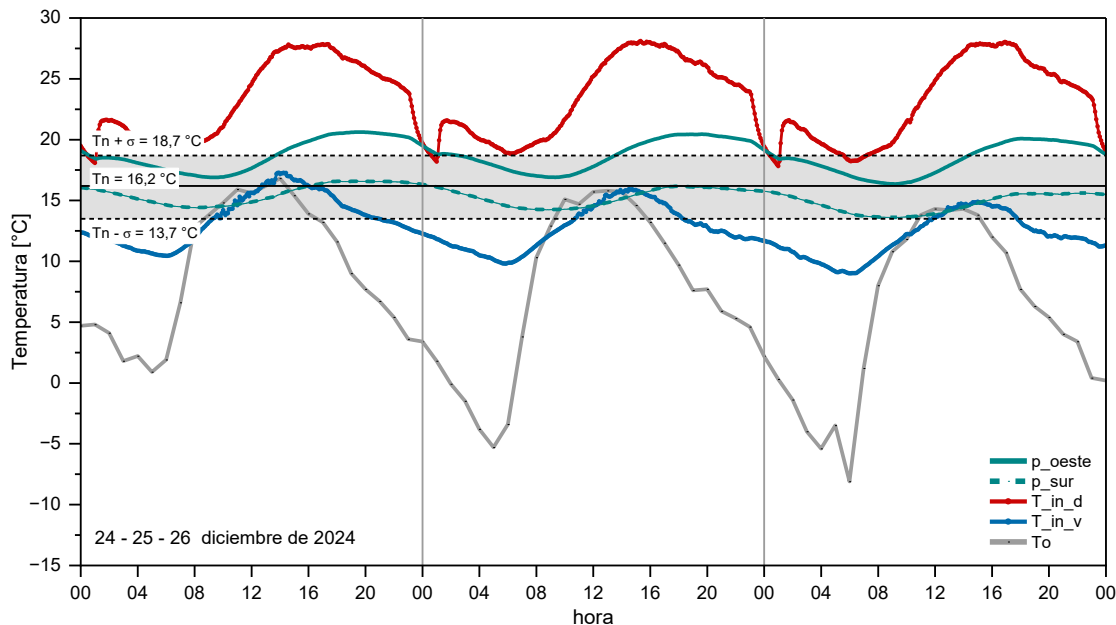
Mapa de calor de los dormitorios para el mes de diciembre - 2024



La Figura 40 muestra el comportamiento térmico registrado durante los días 24 al 26 de diciembre. Se observa que los valores de temperatura dentro del dormitorio de damas se mantienen considerablemente por encima del límite superior de la zona de confort térmico durante prácticamente las 24 horas del día, con valores que disminuyen durante las horas de madrugada. Esta condición genera una situación continua de desconfort térmico por exceso de calor dentro del dormitorio de damas.

Figura 40

Temperaturas internas y superficiales de la pared compartida entre los dormitorios



4.5.4 Confort térmico habitacional durante el tercer periodo

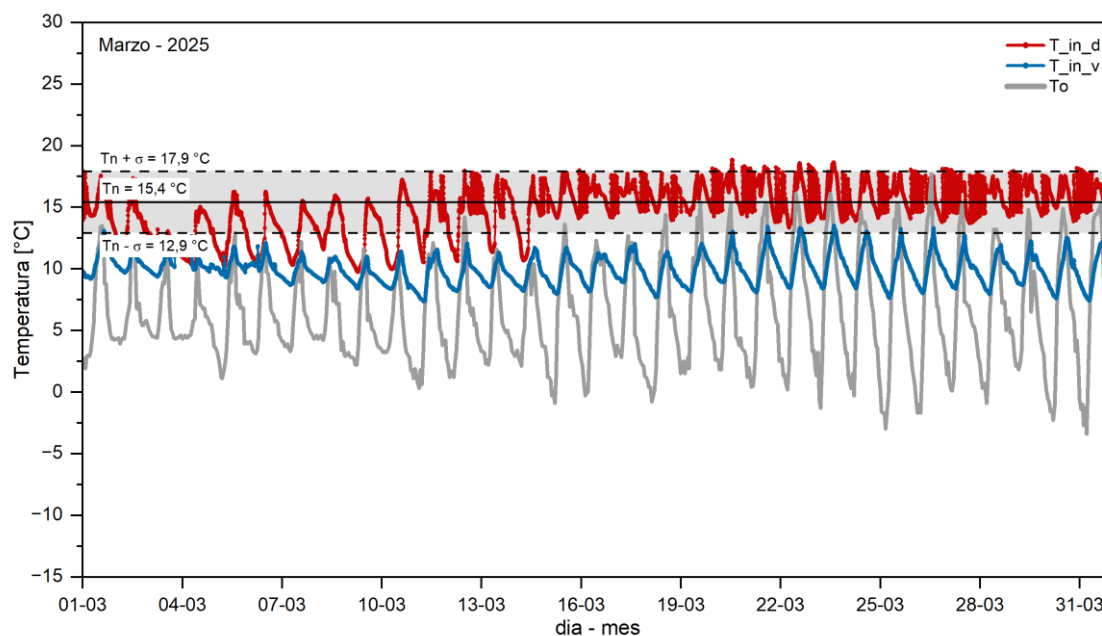
El tercer periodo, que corresponde a los meses marzo y abril del 2025, se ha caracterizado por la implementación de un termostato en el sistema de calefacción solar activo (SCSA) del dormitorio de damas, programado para mantener la temperatura dentro de la zona de confort térmico. El dormitorio de varones continuó sin calefacción. La temperatura de confort térmico calculado fue de $15,4\text{ °C}$ para marzo y $14,6\text{ °C}$ para abril, con un rango de $\pm 2,5$ para definir la zona de confort.

La implementación del sistema de control de temperatura (termostato) en el sistema de calefacción solar activo (SCSA) produjo una mejora significativa de las condiciones térmicas en el interior del dormitorio de damas, como se muestra en la Figura 41. Durante el mes de marzo de 2025, se logró mantener la temperatura interna del dormitorio de damas (T_{in_d}) dentro de la zona de confort térmico durante el 79,94 % del tiempo, con una temperatura promedio registrada de $14,9\text{ °C}$. Este resultado demuestra la efectividad del sistema de control (termostato) para regular la temperatura interna del dormitorio de damas, estabilizándola dentro del rango de confort y evitando los problemas de sobrecalentamiento registrados en la etapa anterior (mes de diciembre de 2024). En contraste, la temperatura en el dormitorio de varones (T_{in_v}), al carecer de sistema de

calefacción, apenas alcanzó un 1,27 % del tiempo en condiciones de confort, registrando una temperatura promedio significativamente inferior de 10,0 °C, lo que evidencia la persistencia de desconfort térmico por frío.

Figura 41

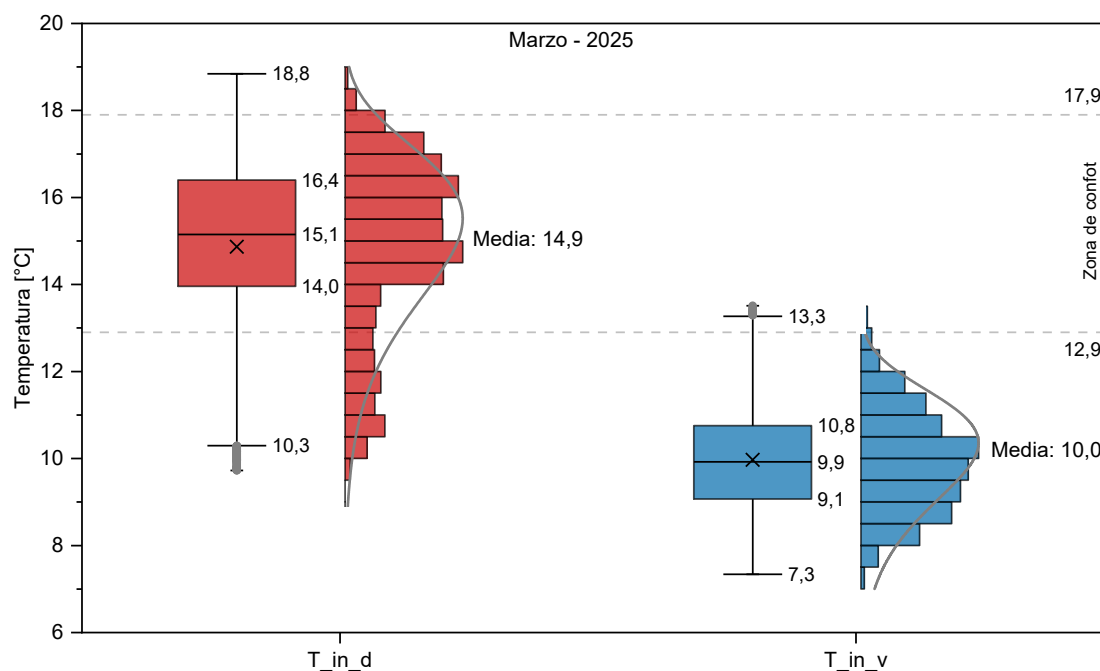
Temperaturas internas de los dormitorios para el mes de marzo - 2025



La distribución de temperaturas mostrada en la Figura 42 y complementada en la Tabla 20, para el mes de marzo de 2025, muestra que la implementación de un termostato en el sistema de calefacción solar activo del dormitorio de damas logró una regulación térmica eficaz, logrando mantener la mayor parte de las temperaturas en el interior del dormitorio de damas (T_{in_d}) dentro de la zona de confort. La media de 14,9 °C y el RIC (14,0 – 16,4 °C) se sitúan dentro del rango de confort térmico. Aunque se registran valores atípicos en los extremos (mínimo de 10,3 °C y máximo de 18,8 °C), estos fueron limitados y no alteran la estabilidad térmica general. En contraste, el dormitorio de varones (T_{in_v}), sin sistema de calefacción, presentó una media de 10,0 °C, 2,9 °C por debajo de límite inferior de la zona de confort, con un RIC (9,1 – 10,8 °C) que refleja una concentración persistente en rangos térmicos fríos. Aunque el valor máximo alcanzó 13,3 °C (ligeramente superior al límite inferior de la zona de confort), menos del 25 % de los registros se acercaron a la zona de confort.

Figura 42

Diagrama de cajas para la temperatura interior en los dormitorios para marzo - 2025

**Tabla 20**

Valores promedio, máximos y mínimos de la temperatura interior en los dormitorios para el mes de marzo - 2025

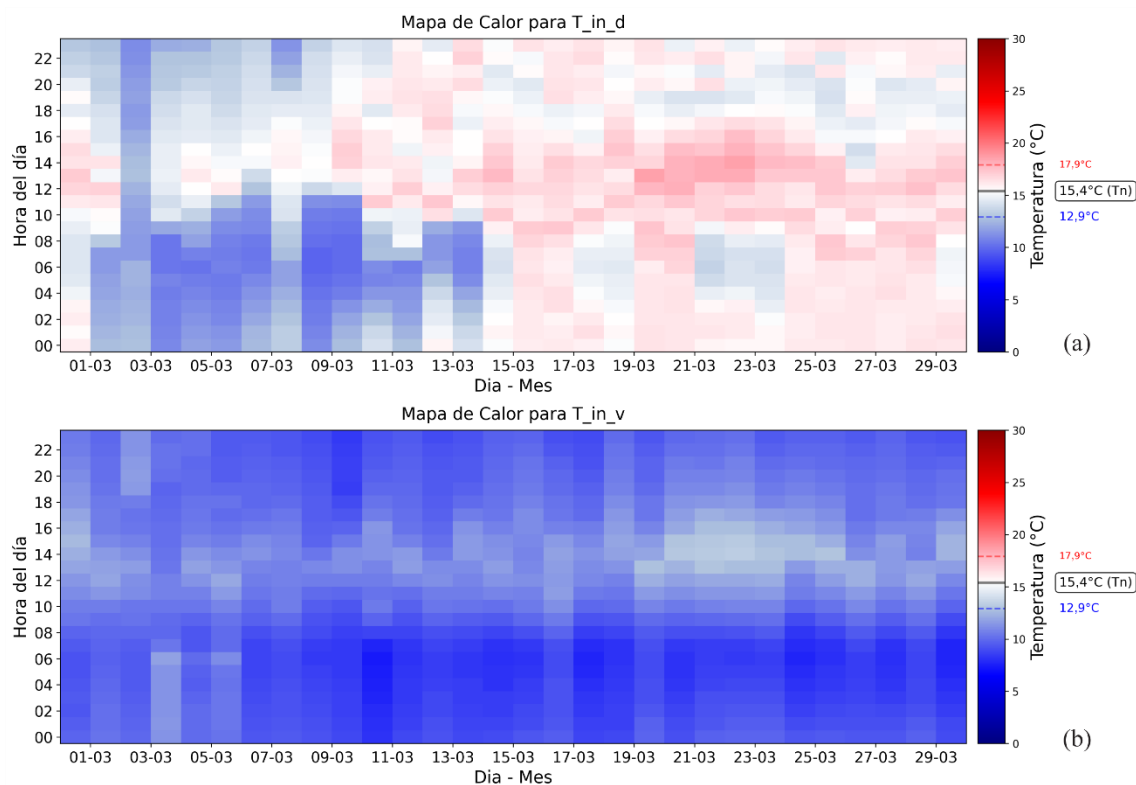
	Límite inferior [°C]	Límite superior [°C]	Temperatura neutra [°C]	Desviación estándar [°C]	Rango intercuartílico	
Tn	12,9	17,9	15,4	2,5		
	Mínimo [°C]	Máximo [°C]	Promedio [°C]	Desviación estándar [°C]	Percentil 25 % (Q1)	Percentil 75 % (Q3)
T_in_d	9,7	18,8	14,9	2,0	14,0	16,4
T_in_v	7,3	13,5	10,0	1,2	9,1	10,8
To	-3,4	17,7	6,2	4,2	-3,4	9,3

El mapa de calor correspondiente al mes de marzo de 2025 (Figura 43a) permite visualizar la evolución temporal, a largo del día y mes, de las condiciones térmicas. Durante los primeros días del mes se observan valores ligeramente por debajo del límite inferior de confort, mientras que en el resto del mes predominan condiciones dentro del rango de confort, y en ocasiones, con valores ligeramente por encima del límite superior de confort. Estos resultados muestran una mejora notable de confort frente a los periodos

anteriores caracterizados por disconfort térmico persistente. Por otro lado, el dormitorio de varones (Figura 43b) aún persiste el disconfort por frío, consecuencia directa de la ausencia de un sistema de calefacción que compense las pérdidas térmicas al exterior.

Figura 43

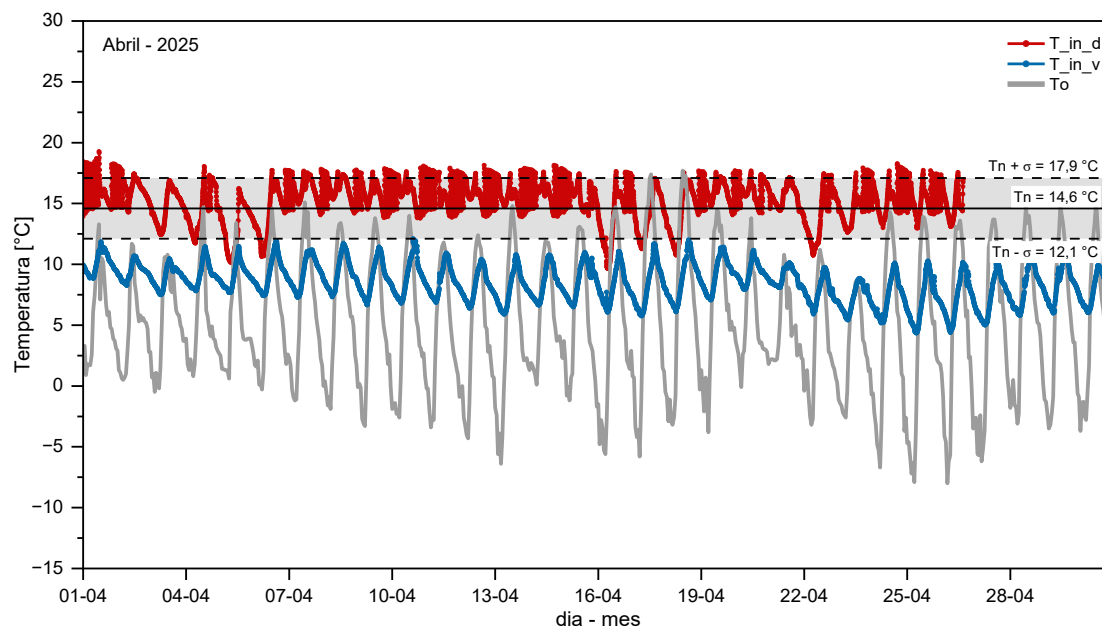
Mapa de calor de los dormitorios para el mes de marzo - 2025



El análisis de temperaturas internas registradas para el mes de abril de 2025 y mostrada en la Figura 44, confirma la tendencia de mejora en las condiciones de confort térmico dentro del dormitorio de damas, alcanzando un 83,89 % del tiempo dentro de la zona de confort con una temperatura promedio de 15,3 °C, un valor muy próximo a la temperatura neutra (14,6 °C) correspondiente al mes de abril. En contraste, el dormitorio de varones, al carecer de un sistema de calefacción, registra valores de temperatura por debajo de la zona de confort, registrando tan solo un 0,01 % del tiempo dentro de la zona de confort y una temperatura promedio significativamente inferior de 8,6 °C. Este resultado demuestra, nuevamente, la efectividad del termostato para mantener T_{in_d} dentro de la zona de confort y evitar problemas de sobrecalentamiento.

Figura 44

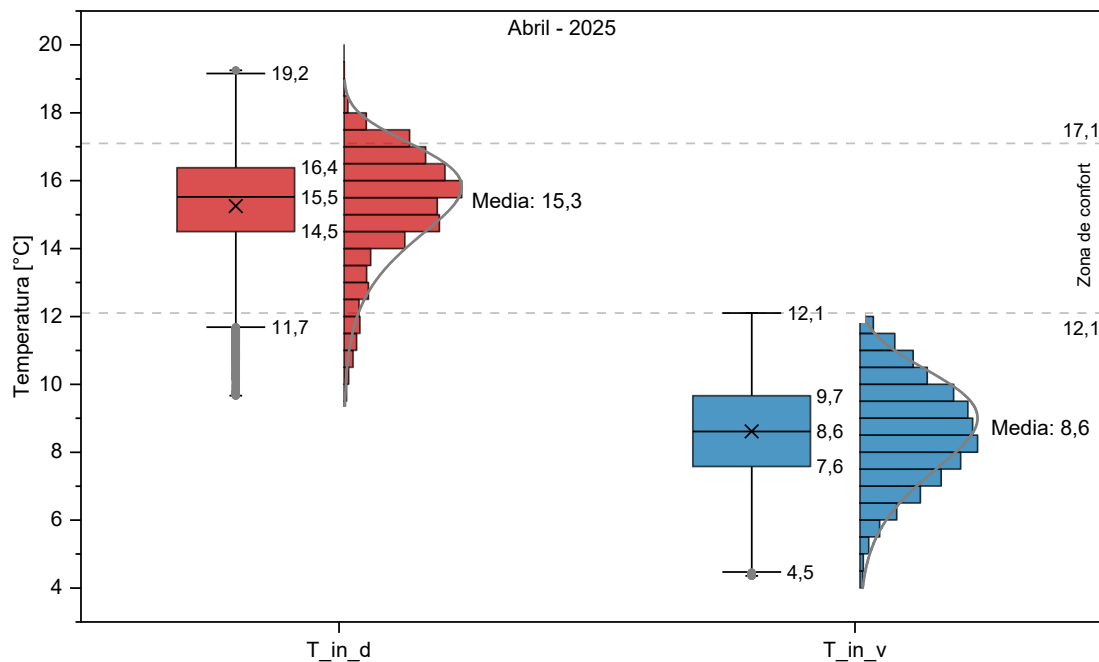
Temperaturas internas de los dormitorios para el mes de abril - 2025



La distribución de temperaturas mostrada en la Figura 45 y complementada en la Tabla 21, para el mes de abril de 2025, muestra que el sistema de calefacción solar equipado con un termostato mantuvo temperaturas en el interior del dormitorio de damas (T_{in_d}) dentro de la zona de confort térmico. La media de 15,3 °C y el rango intercuartílico (14,5 – 16,4 °C) se ubican dentro de la zona de confort térmico. También se registraron valores atípicos en los extremos, aunque con baja frecuencia y no alteran la estabilidad general, lo que evidencia la eficacia del termostato para minimizar fluctuaciones críticas. Por el contrario, el dormitorio de varones al no contar con algún tipo de sistema de calefacción presentó una media de 8,6 °C, que está 3,5 °C por debajo del límite inferior de la zona de confort, con un RIC (7,6 – 9,7 °C) que refleja valores bajos de temperatura interna. Aunque el valor máximo de T_{in_v} alcanzó 12,1 °C (coincidiendo con el límite inferior de la zona de confort), menos del 10 % de las temperaturas registradas se acercaron a la zona de confort térmico, lo que indica que el dormitorio de damas se mantuvo en disconfort por frío. Estos resultados confirman la importancia de un sistema regulador de temperaturas cuando se trabaja con sistemas de calefacción solar activos (SCSA).

Figura 45

Diagrama de cajas para la temperatura interior en los dormitorios para abril - 2025

**Tabla 21**

Valores promedio, máximos y mínimos de la temperatura interior en los dormitorios para el mes de abril - 2025

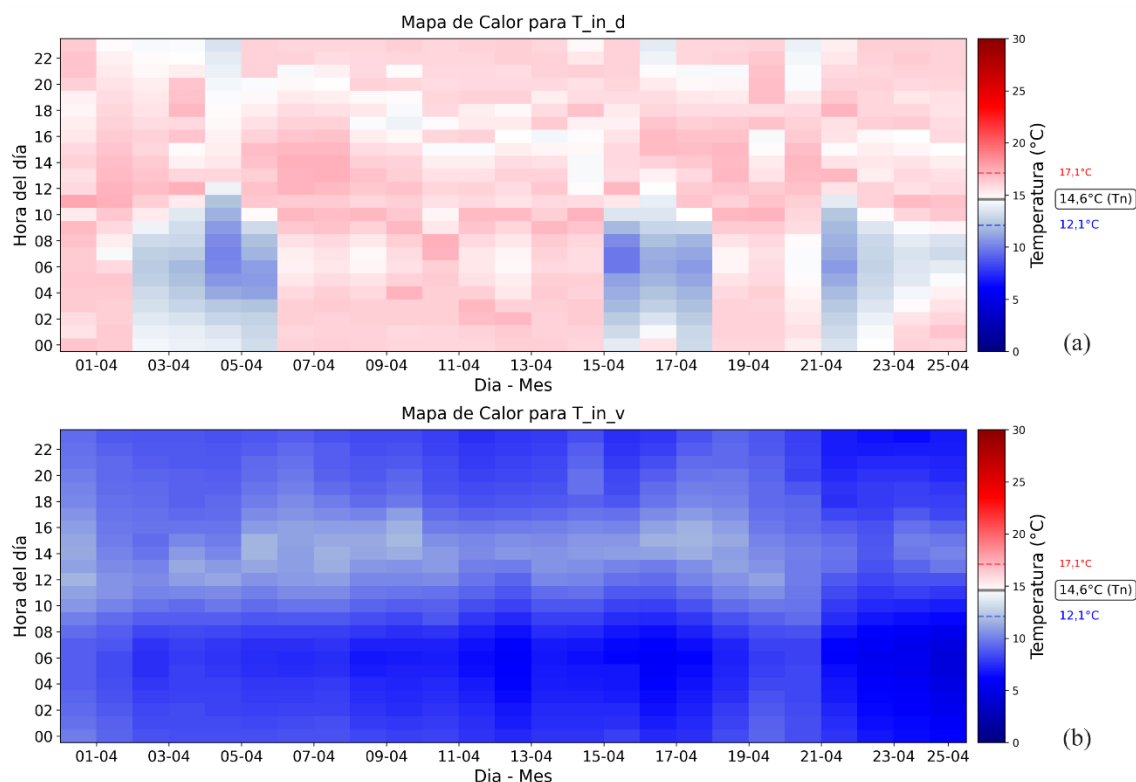
	Límite inferior [°C]	Límite superior [°C]	Temperatura neutra [°C]	Desviación estándar [°C]	Rango intercuartílico	
Tn	12,1	17,1	14,6	2,5		
	Mínimo [°C]	Máximo [°C]	Promedio [°C]	Desviación estándar [°C]	Percentil 25 % (Q1)	Percentil 75 % (Q3)
T_in_d	9,7	19,3	15,3	1,6	14,5	7,6
T_in_v	4,4	12,1	8,6	1,5	16,4	9,7
To	-8,0	17,7	4,9	5,5	1,0	9,4

El mapa de calor correspondiente para este mes se muestra en la Figura 46a, en la cual se parecía que el dormitorio de damas se mantuvo dentro de la zona de confort térmico durante la mayor parte del ciclo diario y mensual, mostrando fluctuaciones menores y ocasionales especialmente hacia el sobrecalentamiento. Por el contrario, el mapa (Figura 46b) revela una situación completamente distinta para el dormitorio de

varones, en el cual se presenta una condición persistente y continua de discomfort por frío durante prácticamente la totalidad de las horas del día y todo el mes con ligeras aproximaciones a la zona de confort durante las horas del día.

Figura 46

Mapa de calor de los dormitorios para el mes de abril - 2025



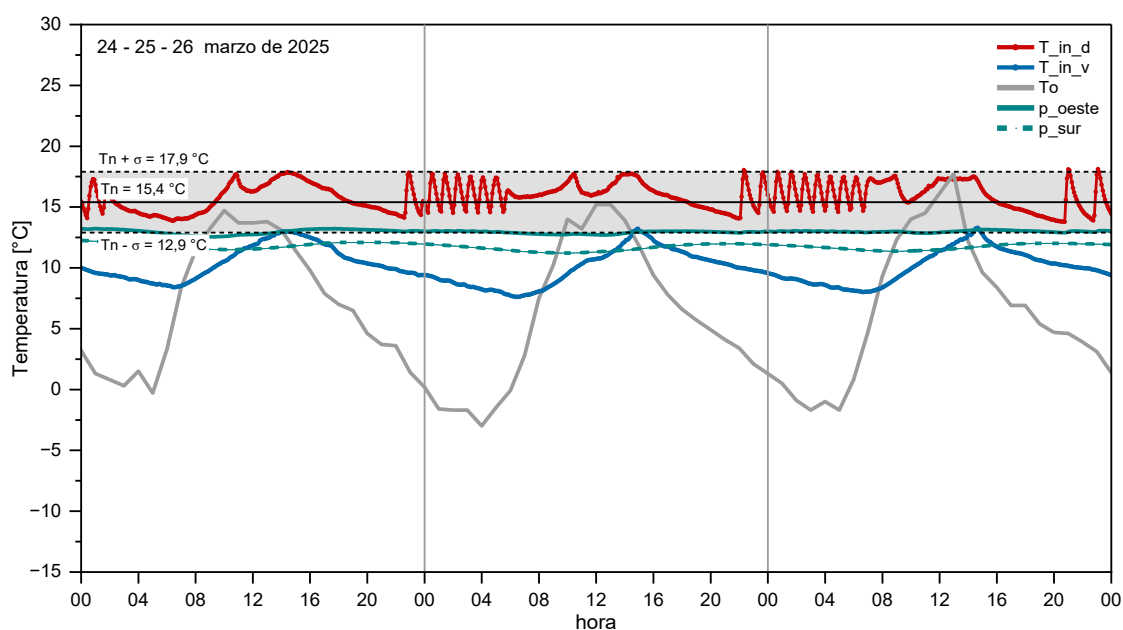
Una evaluación detallada del comportamiento térmico (Figura 47) para los días del 24 al 26 de marzo de 2025, demuestra que el dormitorio de damas logró mantener su temperatura interior dentro de la zona de confort de manera ininterrumpida durante las 24 horas del día, incluso durante las horas de madrugada cuando las temperaturas ambientales descienden drásticamente. Simultáneamente, las temperaturas en el dormitorio de varones se mantuvieron por debajo de la zona de confort. Esta diferencia significativa en el comportamiento térmico de los dormitorios genera un gradiente de temperatura en la pared que divide dichos ambientes.

Como se aprecia en la Figura 47, las temperaturas superficiales de la pared divisoria reflejan esta diferencia: la cara orientada hacia el dormitorio de damas (P_{oeste_d}) registra valores significativamente superiores a los de la cara orientada hacia el dormitorio

de varones (P_{este_v}), con una diferencia promedio de $1,22\text{ }^{\circ}\text{C}$ y valor máximo registrado de $2,36\text{ }^{\circ}\text{C}$ registrada durante todo el tercer periodo de evaluaciones. Este gradiente térmico de $1,22\text{ }^{\circ}\text{C}$ constituye una evidencia clara de la existencia de un flujo de calor unidireccional desde el dormitorio de damas hacia el dormitorio de varones a través de la pared divisora. Sin embargo, el valor pequeño de dicho gradiente térmico implica que la tasa de transferencia de calor es cuantitativamente pequeña.

Figura 47

Temperaturas internas y superficiales de la pared compartida entre los dormitorios



CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

La presente investigación realizada en Kallapuma (4266 msnm) confirma la severidad de las condiciones climáticas altoandinas y la urgente necesidad de soluciones para mejorar el confort térmico, un hallazgo que es consistente con estudios previos realizados en otras zonas de gran altitud en Perú. Los cálculos de la temperatura de confort térmico se realizaron empleando el modelo adaptativo de temperatura neutra (T_n) propuesto por Molina et al. (2023) que realizó sus estudios en la zona altoandina de Imata, Arequipa a 4500 msnm, con condiciones muy similares a las de Kallapuma. Los modelos estándares internacionales como ASHRAE e ISO 7730 suelen sobrestimar las condiciones de confort para poblaciones aclimatadas a temperaturas más bajas. El rango de T_n calculado para Kallapuma osciló entre 13,2 °C (julio 2024) y 16,2 °C (diciembre 2024). Este rango es cercano a los valores bajos reportados por otros estudios, por ejemplo, Ratache Rojas et al. (2021) en Imata (4500 msnm) determinaron una T_n de 13,7 °C. además, Molina et al. (2020b) estimaron en Imata la zona de confort térmico entre 12,4 °C (julio) y 19,8 °C (diciembre), valores que están muy cerca a la zona de confort térmico definida para Kallapuma.

5.1 Análisis del comportamiento térmico en los tres periodos de evaluación

5.1.1. Primer periodo (Sin calefacción: julio y agosto de 2024)

Los resultados obtenidos demuestran que, durante el primer periodo, el dormitorio de damas (T_{in_d}) y el dormitorio de varones (T_{in_v}) registraron temperaturas promedio muy bajas de 4,2 °C y 4,3 °C respectivamente en julio, aumentando levemente a 5,8 °C y 5,6 °C en agosto. Ponce et al. (2021), analizando un módulo experimental típico en Imata (4519 msnm), reportaron una temperatura interior promedio de 3,29 °C para el mes de julio, lo que subraya la baja capacidad de amortiguación térmica de las construcciones tradicionales andinas frente a las heladas. La necesidad de mejorar estas condiciones es evidente, ya que, durante este primer periodo, el tiempo en la zona de confort fue de 0,0 % en julio para ambos dormitorios. En agosto, la fracción de tiempo en zona de confort apenas alcanzó un 0,22 % para el dormitorio de damas (T_{in_d}) y un 0,01 % para el de varones (T_{in_v}). Esto es similar a estudios realizados en la sierra sur por Vera Piazzini

& Arispe Sevilla (2020) y Thangam et al. (2022), en la cual, sin intervención de algún tipo de sistema de calefacción, las envolventes amortiguaron las bajas temperaturas del exterior, pero no lograron alcanzar la zona de confort en invierno.

5.1.2 Segundo periodo (SCSA encendido, sin termostato: diciembre de 2024)

Al implementar un sistema de calefacción solar activo (SCSA), se observó una elevada mejora en T_{in_d} , alcanzando una temperatura promedio de 20,4 °C, superando en 1,7 °C el límite superior de la zona de confort térmico. Aunque se registró un 27,20 % de tiempo en confort, la falta de regulación del SCSA sin termostato generó desconfort por sobrecalentamiento, con temperaturas máximas que alcanzaron los 28,1 °C. Este resultado confirma la necesidad indispensable de un termostato de control. Esta mejora en la temperatura interna, pero con problemas de sobrecalentamiento es congruente con lo señalado por Arranz et al. (2020), quienes muestran la ganancia térmica cuando se aumenta la captación de energía solar, pero advierten la necesidad de control para evitar temperaturas excesivas en envolventes livianas. Molina et al. (2020) simularon mediante el programa EnergyPlus un máximo de 28,1 °C en su módulo experimental de vivienda, un valor muy similar al registrado en el dormitorio de damas durante este periodo. En contraste, T_{in_v} , sin SCSA, alcanzó una temperatura promedio de 12,3 °C con 20,73 % de tiempo en zona de confort debido a la transferencia de energía desde el dormitorio de damas a través de la pared que los separa.

5.1.3 Tercer periodo (SCSA encendido, con termostato: marzo y abril de 2025)

El uso del SCSA regulado por un termostato supuso un cambio evidente y eliminó eficazmente el problema de sobrecalentamiento y el frío extremo nocturno. T_{in_d} logró mantener la temperatura dentro de la zona de confort térmico durante el 78,94 % del tiempo en marzo con una temperatura promedio de 14,9 °C y el 83,89 % en abril con una temperatura promedio de 15,3 °C. Este resultado demuestra la efectividad del sistema de control para mantener la temperatura interna (T_{in_d}) dentro de la zona de confort térmico, la alta eficiencia del SCSA regulado por termostato en Kallapuma, confirma la viabilidad de los sistemas activos para asegurar el confort térmico.

En cambio, la temperatura (T_{in_v}) en el dormitorio de varones, sin aporte térmico por algún tipo de sistema de calefacción, registró valores significativamente menores, de

10,0 °C en marzo y 8,6 °C en abril, con porcentajes de tiempo dentro de la zona de confort de apenas 1,27 % y 0,01 %, respectivamente.

5.2 Comparación con estrategias pasivas en zonas altoandinas

La implementación de SCSA regulado por termostato superó con claridad los desempeños reportados por intervenciones centradas solo en estrategias pasivas. Los estudios previos revelan que, si bien la incorporación de técnicas bioclimáticas pasivas (como aislamiento, claraboyas o invernaderos adosados) puede generar incrementos significativos de temperatura, como el aumento de 11 °C en la temperatura interior mínima promedio reportado por Molina et al (2020) en un módulo experimental de vivienda, o el incremento de 11,5 °C en la temperatura media del aire interior en un módulo experimental con invernadero adosado según Ponce et al. (2021), estas estrategias no evitan el enfriamiento durante las horas nocturnas, disminuyendo las temperaturas interiores por debajo de la zona de confort térmico debido al frío exterior extremo y de gran amplitud que caracteriza las zonas altoandinas. Molina Fuertes et al. (2024) reportaron temperaturas interiores que oscilaron entre 3,0 °C y 8,8 °C en un módulo experimental de vivienda altoandino, valores que son considerablemente inferiores a los obtenidos en este estudio con SCSA. Únicamente con métodos pasivos no es posible alcanzar los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, ya que los sistemas pasivos permiten llegar al confort cuando hay radiación solar directa, pero la temperatura desciende nuevamente durante las horas nocturnas especialmente de madrugada antes del amanecer, imposibilitando el mantenimiento de condiciones de confort térmico las 24 horas del día como se muestra en el estudio realizado por Ticona Chura y Vilca Apaza (2022). Además, en un caso de estudio en San Francisco de Raymina (3700 msnm), Molina et al (2021) encontraron que las infiltraciones de aire contribuyen aproximadamente al 48,6 % de las pérdidas diarias de energía, un problema que la calefacción activa aborda garantizando el bienestar térmico dentro de la habitación.

Un hallazgo particularmente relevante, es que no se ha encontrado en la literatura científica revisada, ningún estudio en el cual se haya logrado mantener la temperatura interna dentro de la zona de confort térmico durante las 24 horas del día a lo largo de periodos prolongados en zonas altoandinas y bajo las condiciones climáticas que lo

caracteriza. El SCSA implementado en este estudio logró mantener la temperatura interna del dormitorio de damas (T_{in_d}) dentro de la zona de confort térmico durante periodos mucho más prolongados, e incluso de manera ininterrumpida durante las 24 horas del día, como se evidenció del 24 al 26 de marzo de 2025.

5.3 Influencia de variables climáticas y justificación del sistema activo

El contexto del clima extremo de Kallapuma refuerza la necesidad del uso de sistemas de calefacción solar activos con control por termostato. El potencial solar energético de la región altoandina de Tacna justifica plenamente la implementación de sistemas solares, ya que estas zonas cuentan con un gran potencial de energía solar de 6,04 kWh/m² día en promedio anual (Polo Bravo, 2013), y la irradiancia solar alcanza valores máximos superiores a 1100 W/m² entre finales de primavera y verano, un recurso que debe ser aprovechado.

Las condiciones de humedad relativa registradas en Kallapuma representan uno de los aspectos más extremos del clima altoandino, alcanzando valores por debajo del 10 % durante el día. Estos valores tan bajos de humedad son comparables a los reportados en el desierto de atacama (Azua-Bustos et al., 2017, 2022). La humedad relativa extremadamente baja acentúa las pérdidas por radiación y convección durante la noche, subrayando la necesidad de aporte térmico por sistemas de calefacción para evitar descensos drásticos de temperatura.

Los resultados del análisis de importancia de variables meteorológicas mediante el algoritmo Random Forest muestran los parámetros meteorológicos más influyentes en la variabilidad de la temperatura interior de las habitaciones. La temperatura exterior (T_o) es la variable más influyente, con una importancia de 0,489; seguido de la humedad relativa (RH) con una importancia de 0,197. El tercer parámetro meteorológico influyente es la irradiancia solar (I_g) aunque muestra una influencia menor con una importancia de 0,076. Esta jerarquización valida la efectividad del SCSA la cual es regulado para mitigar las fluctuaciones extremas de la temperatura exterior característica de Kallapuma y toda la zona altoandina. El contraste directo entre T_{in_d} y T_{in_v} sitúa a los SCSA como una estrategia robusta para combatir el clima extremo y mantener temperaturas de confort en el interior, superando las estrategias basadas únicamente en estrategias pasivas.

CONCLUSIONES

1. La implementación de un sistema de calefacción solar activo (SCSA) en el Tambo Kallapuma, demostró ser altamente eficaz para alcanzar y mantener el confort térmico en el dormitorio de estudio; una zona con condiciones climáticas extremas. El resultado eficaz del SCSA está condicionado a la existencia de un sistema de control (termostato). Con la implementación del SCSA y termostato (durante el tercer periodo de evaluaciones) se logró mantener la temperatura interior del dormitorio de damas (T_{in_d}) dentro de la zona de confort térmico hasta un 83,89 % del tiempo (abril 2025), con una temperatura promedio de 15,3 °C. Esto contrasta marcadamente con el periodo sin calefacción (primer periodo), donde la permanencia en la zona de confort de del 0,0 %, y en el periodo sin regulación por termostato (segundo periodo), donde se generó desconfort por sobrecalentamiento (temperatura promedio de 20,4 °C). Por lo tanto, la implementación de SCSA, en combinación con un sistema de regulación, se considera como una solución viable y efectiva para mitigar el desconfort por frío severo en las zonas altoandinas de Tacna.
2. Se logró identificar que las variables ambientales más influyentes en el confort térmico interior de los dormitorios en /Kallapuma fueron la temperatura ambiente (T_o) con una importancia de 0,489, seguida de la humedad relativa (RH) con 0,197, y la irradiancia solar global horizontal (I_g) con 0,076, según el análisis del modelo de Random Forest.
3. La medición y comparación de la temperatura interior del dormitorio de damas (T_{in_d}) sin SCSA (primer periodo) y con SCSA regulado (tercer periodo) demostró un incremento significativo de confort térmico cuando el SCSA está operativo (segundo periodo). En el primer periodo (SCSA apagado, julio y agosto de 2024) la temperatura promedio fue de 4,2 °C (dormitorio de damas), mientras que en el tercer periodo (SCSA encendido y con termostato marzo y abril de 2025), la temperatura promedio se elevó a rangos de confort térmico, alcanzando 14,9 °C (marzo) y 15,3 °C (abril). Al comparar con la temperatura del dormitorio de varones (sin SCSA), se establece una diferencia de 4,9 °C y 6,7 °C para marzo y abril, respectivamente, en favor de la habitación de damas (con SCSA).

4. La comparación simultánea del confort térmico entre las habitaciones de estudio (dormitorio de damas y de varones) en especial durante el tercer periodo de evaluaciones, demostró la efectividad del SCSA con termostato para alcanzar la zona de confort térmico. El dormitorio de damas (Con SCSA regulado) logró una permanencia en la zona de confort térmico del 79,94 % (marzo 2025) y 83,89 % (abril 2025), mientras que el dormitorio de varones (sin SCSA) mostro una permanencia de solo 1,27 % (marzo 2025) y 0,01 % (abril 2025). Asimismo, se determinó que el funcionamiento del SCSA sin termostato (segundo periodo) generó condiciones de desconfort por sobrecalentamiento alcanzando temperaturas de hasta 28,1 °C. esto subraya que la implementación de un SCSA en zonas altoandinas de Tacna con clima extremo es sumamente eficaz para alcanzar el confort térmico, siempre y cuando se implemente un sistema de regulación para evitar grandes fluctuaciones y el sobrecalentamiento, manteniendo la las temperaturas dentro de la zona de confort.

RECOMENDACIONES

1. Para optimizar la eficacia del sistema, se recomienda complementar la instalación del sistema de calefacción solar activo (SCSA) con mejoras en la envolvente de las edificaciones, especialmente el reemplazo de ventanas simples por sistemas de doble vidrio y la implementación de aislamiento térmico adicional en techos. Estas intervenciones podrían incrementar la eficiencia del sistema de calefacción y reducir las pérdidas térmicas identificadas en el presente estudio.
2. Es recomendable establecer una red de monitoreo térmico en comunidades altoandinas que permita la evaluación continua del desempeño de los sistemas instalados y la identificación de oportunidades de mejora. Esta red debería incluir la medición automática de variables meteorológicas, temperaturas interiores y consumo energético, proporcionando datos valiosos para la optimización de futuras instalaciones.
3. Se recomienda la implementación de políticas públicas que incentiven la adopción de tecnologías de calefacción solar en zonas altoandina, así como programas de financiamiento accesible para comunidades rurales. La evidencia científica respalda la viabilidad técnica y económica de estas intervenciones como una inversión en salud pública y bienestar social.
4. Para futuras investigaciones, se sugiere evaluar la eficiencia del sistema durante periodos de nubosidad prolongada y desarrollar estrategias de calefacción complementaria, para garantizar el confort térmico en condiciones climáticas adversas. Asimismo, se recomienda realizar estudios de costo-beneficio que consideren no solo los aspectos técnicos, sino también los impactos en salud, productividad y calidad de vida de los pobladores beneficiarios.
5. Se recomienda realizar un análisis cuantitativo del Sistema de Calefacción Solar Activo (SCSA) para determinar el consumo energético requerido para mantener una habitación dentro de la zona de confort térmico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alpaca Rendón, O. (2022). *Evaluación de un sistema de calefacción por suelo radiante implementado en un módulo educativo-experimental construido con materiales alternativos a escala pequeña para la enseñanza superior*. Revista Tecnia, 32(1), 70-81. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v32i1.1370>
- Arranz, B., Oteiza, I., Delgado, E., & Gutiérrez, A. (2020). *Construcción y monitorización del Laboratorio REVen para el estudio del impacto de las ventanas integrando eficiencia energética y calidad ambiental interior*. Informes de la Construcción, 72(557), e324. <https://doi.org/10.3989/ic.67523>
- Azua-Bustos, A., González-Silva, C., & Corsini, G. (2017). *The Hyperarid Core of the Atacama Desert, an Extremely Dry and Carbon Deprived Habitat of Potential Interest for the Field of Carbon Science*. Frontiers In Microbiology, 8, 993. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00993>
- Azua-Bustos, A., González-Silva, C., Fairén, A., (2022). *The Atacama Desert in Northern Chile as an analog model of Mars*. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 9, 810426. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.810426>
- Bernal, C. A. (2010). *Metodología de la investigación* (3ra ed.). Pearson Education.
- Betman, A., Balter, J., & Ganem, C. (2022). *Incidencia de estrategias pasivas en el comportamiento termo-energético de una vivienda en verano, con diferentes escenarios de orientación en mendoza*. Arquitecto, (20), 12. <https://doi.org/10.30972/arq.0206255>
- Brack, A., & Mendiola, C. (2000). *Ecología del Perú*. Bruño.
- Breiman, L. (2001). *Random forests*. Machine Learning, 45(1), 5-32.
- Calderón Uribe, F. (2019). *Evaluación del mejoramiento del confort térmico con la incorporación de materiales sostenibles en viviendas de autoconstrucción en bogotá, colombia*. Revista Hábitat Sustentable, 9(2), 30-41. <https://doi.org/10.22320/07190700.2019.09.02.03>
- Carrion Atiaja, K., Ortega Castro, J., Rivela Carballal, B. (2023). *Recomendaciones para la aplicación de estrategias bioclimáticas pasivas en un clima mega térmico lluvioso, tena-ecuador*. Ciencia Digital, 7(2), 95-118. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v7i2.2554>

- Castilla, M., Rodríguez-Díaz, F., Álvarez, J. D., Berenguel, M., & Bordons, C. (2022). *Formulación del problema de optimización multiobjetivo del confort en edificación sostenible*. Actas de las XXXVII Jornadas de Automática 7, 8 y 9 de septiembre de 2016, Madrid, 505-512. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498081.0505>
- Cerrón Contreras, A. (2024). *Estrategias de calefacción pasiva y su impacto en el confort térmico en viviendas altoandinas en apurímac-perú*. Cátedra Villarreal, 11(2). <https://doi.org/10.24039/rcv20231121629>
- Chen, Y., Chen, Z., Wang, D., Liu, Y., Zhang, Y., Liu, Y., Zhao, Y., Gao, M., & Fan, J. (2023). *Co-optimization of passive building and active solar heating system based on the objective of minimum carbon emissions*. Energy, 275, 127401. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127401>
- Cillari, G., Fantozzi, F., & Franco, A. (2021). *Passive Solar Solutions for Buildings: Criteria and Guidelines for a Synergistic Design*. Applied Sciences, 11(1), 376. <https://doi.org/10.3390/app11010376>
- Cornejo Quispe, F. (2025). *Estrategias bioclimáticas aplicadas al prototipo de vivienda para el caserío el Arenal en Jayanca*. Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. <https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/8350>
- Davis instruments. (2025). *Weather Stations*. <https://www.davisinstruments.com>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons.
- Erazo-Velasco, I., Macas-Mendoza, D., Mina-González, N., Estupiñan-Estupiñan, Y., & Barre-Cedeño, K. (2023). *Diseño de un controlador inteligente para un sistema de calefacción residencial*. Ibero-American Journal of Engineering & Technology Studies, 3(1), 86-97. <https://doi.org/10.56183/iberotecs.v3i1.590>
- Escobar Carreño, A., More Ayala, S., Castellano Arellano, P. (2023). *Relación entre los criterios de diseño arquitectónico utilizados y el nivel de confort de los ocupantes de las viviendas de una comunidad rural en el norte del Perú*. Revista De Climatología, 23, 2399-2407. <https://doi.org/10.59427/rcli/2023/v23cs.2399-2407>
- Espinoza Montes, C. (2013). *Sistema de calefacción solar para reducir el friaje en viviendas alto andinas*. Universidad Nacional del Centro del Perú. Recuperado de <https://repositorio.uncp.edu.pe/items/e00f99d2-9921-435e-964b-2c462a440442>

- Giraldo, J. & Arango, J. (2020). *Proceso de optimización en el diseño de sistema de calefacción solar pasivo*. Revista Técnica Energía, 16(2), 100-110. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v16.n2.2020.357>
- Girón Pizarro, M. L. (2023). *Desarrollo de un modelo de evaluación de parámetros ambientales para lograr el confort térmico al interior de las viviendas en el Centro Poblado Menor de Kallapuma, Provincia de Tarata, Región Tacna*. Tesis de Grado. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/3465>
- González González, F. (2021). *Propuesta metodológica para el análisis de las afectaciones en la salud y confort térmico del ser humano debido al cambio climático en tres regiones de México*. Acta Universitaria, 31, 1-17. <https://doi.org/10.15174/au.2021.3071>
- Guo, R., Yang, B., Guo, Y., Li, H., Li, Z., Zhou, B., Hong, B., & Wang, F. (2024). *Machine learning-based prediction of outdoor thermal comfort: Combining Bayesian optimization and the SHAP model*. Building And Environment, 254, 111301. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111301>
- Hasanuzzaman, M. (2022). *Technologies for Solar Thermal Energy*. En Elsevier eBooks. <https://doi.org/10.1016/c2020-0-00601-8>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6a ed.). McGraw Hill.
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill.
- Humphreys, M. A., & Fergus Nicol, J. (2002). *The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments*. Energy and Buildings, 34(6), 667–684. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(02\)00018-x](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(02)00018-x)
- Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI]. (2017). *Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*. INEI.
- ISO 7730. (2005). *International standard ISO 7730 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* (Third).
- Jiménez, C., Wieser, M., & Biondi, S. (2017). *Improving thermal performance of traditional cabins in the high-altitude peruvian andean region*. Recuperado de <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/187754>

- Kalogirou, S. A. (2009). *Solar energy engineering: Processes and systems*. Academic Press.
- Lalvay Mejía, F., & Romo Zamudio, C. (2023). *Estrategias de diseño para el control solar en edificios escolares en un clima cálido húmedo - caso estudio nivel de bachillerato de la ciudad de Macas –Ecuador*. *Ciencia Digital*, 7(3), 171-198. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v7i3.2632>
- Laura Castillo, A., Belén Sosa, M., Norma Correa, É., & Alicia Cantón, M. (2018). *Comportamiento y confort térmico exterior de canales viales urbanos insertos en diversas tramas y geomorfologías de mendoza*. *Revista Hábitat Sustentable*, 8(2), 116-129. <https://doi.org/10.22320/07190700.2018.08.02.09>
- Ledesma Hidalgo, G., & Rivera Lara, R. (2018). *Análisis de confort térmico en escuelas del milenio. Caso: Quito y Babahoyo*. *Eídos Ute Revista*, 11. <https://doi.org/10.29019/eidos.v0i11.408>
- López Cañedo, J., Rincón-Martínez, J., & Fernández Melchor, F. (2021). *Estimación del confort térmico por variable física del entorno térmico: un estudio en los espacios abiertos de la uabc-sauzal, México*. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 4(2), 58-80. <https://doi.org/10.37636/recit.v425880>
- Lstiburek, J. W. (2006). *Builder's guide: Hot-humid climates: A systems approach to designing and building homes that are safe, healthy, durable, comfortable, energy efficient and environmentally responsible*. Building Science Corporation.
- Madrigal Cardiel, M., Maldonado Paleo, J., & Velázquez Roque, S. (2023). *Diseño y simulación de un sistema de calefacción solar para incrementar la temperatura en una habitación de 100 m³*. *South Florida Journal of Development*, 4(10), 3995–4008. <https://doi.org/10.46932/sfjdv4n10-021>
- Manrique, J. (2019). *Energía solar. Fundamentos y aplicaciones fototérmicas*. Harla.
- Martínez García, A., Estrada Cahuapaza, Y., Marín Mamani, G., Enríquez Mamani, V., Cotacallapa Ochoa, K., & Curro Pérez, F. (2023). *Thermal evaluation of a rustic building prototype at 1/5 scale with vegetal envelope during the winter in southern Peru*. *Data & Metadata*, 2, 34. <https://doi.org/10.56294/dm202334>
- Martínez, P. R. (2012). *Energía solar térmica: Técnicas para su aprovechamiento*. Marcombo.

- Mascaró Palliser, R., Costa-Castelló, R., & Álvares, J. (2016). *Una estrategia de control mediante observadores para la temperatura en edificio de oficinas*. Actas de las XXXVII Jornadas de Automática 7, 8 y 9 de Septiembre de 2016, Madrid, 410-416. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498081.0410>
- Mercado Calapuja, E. & Machaca Cutipa, H. (2017). *Sistema de calefacción solar térmico controlado para mantener el confort térmico en un ambiente de la FIQ*. Tesis de grado. Recuperado de: <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/5543>
- Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social [MIDIS], 2023. *Programa Nacional Tambos*. <https://www.pais.gob.pe/tambook/tambos/19802>
- Molina Fuertes, J. O., Horn Mutschler, M. J., & Gómez León, M. M. (2020). *Evaluación sistemática del desempeño térmico de un módulo experimental de vivienda alto andina para lograr el confort térmico con energía solar*. *Tecnia*, 30(1), 70-79. <https://doi.org/10.21754/tecnica.v30i1.841>
- Molina Fuertes, J. O., Horn Mutschler, M. J., & Gómez León, M. M. (2024). *Evaluación del comportamiento térmico de un sistema constructivo de pared en zona altoandina utilizando un módulo experimental*. *Tecnia*, 34(2), 53-61. <https://doi.org/10.21754/tecnica.v34i2.2170>
- Molina, J. O., Espinoza, R. E., Horn, M. J., & Gómez, M. M. (2019b). *Thermal performance evaluation of isolation and two active solar heating systems for an experimental module: A rural Peruvian case at 3700 masl*. *Journal Of Physics Conference Series*, 1173, 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1173/1/012003>
- Molina, J. O., Lefebvre, G., Horn, M., & Gómez, M. M. (2020b). *Diseño de un módulo experimental bioclimático obtenido a partir del análisis de simulaciones térmicas para el centro poblado de Imata (4519 m.s.n.m.) ubicado en Arequipa, Perú*. *Información Tecnológica*, 31(2), 173-186. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000200173>
- 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>

- Olesen, B., & Parsons, K. (2002). *Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730*. Energy And Buildings, 34(6), 537-548. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(02\)00004-x](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(02)00004-x)
- Onset Hobo. (2025). *Onset HOBO and InTemp Data Loggers*. <https://www.onsetcomp.com>
- Pari Quispe, D., Ribeiro Silva, J., & e Silva, C. (2021). *Confort térmico en viviendas sociales en la zona mesoandina de Perú – soluciones para mejorar la calefacción pasiva usando materiales autóctonos*. Revista Latino-Americana De Ambiente Construido & Sustentabilidade, 2(6). <https://doi.org/10.17271/rlass.v2i6.2980>
- Polo Bravo, C. (2013). *Potencial energético solar y su impacto ambiental en la Región Tacna*. Tesis de grado. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Repositorio institucional UNJBG <https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/d43cb4da-d0c5-43c9-a5b1-8c038c58291e>
- Ponce Gonzales, M., Molina-Fuertes, J., Horn-Mutschler, M., & Gómez-León, M. (2021). *Evaluación térmica de modificaciones en las envolventes de módulos experimentales ubicados en el centro poblado de Imata (4519 msnm), Arequipa*. Tecnia, 31(1), 18-27. <https://doi.org/10.21754/tecnica.v21i1.1106>
- Ratache Rojas, P. R., Cabanillas, C. E. R., Horn Mutschler, M., & Gómez León, M. M. (2021). *Simulación del consumo energético para la calefacción de un módulo de vivienda experimental ubicado a 4500 msnm*. Revista TECNIA, 31(1), 35–41. <https://doi.org/10.21754/tecnica.v21i1.1083>
- Rodríguez-Muñoz, N., Nájera-Trejo, M., & Martín-Domínguez, I. (2018). *Análisis del desempeño térmico de los sistemas constructivos de un edificio de oficinas mediante simulaciones dinámicas*. Ingeniería Investigación Y Tecnología, 19(3), 281-291. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19n3.024>
- Rojas, M., Fernández, L., Zambrano, L., & Paredes, A. (2022). *Análisis de la vivienda rural utilizando el confort térmico como medida de habitabilidad*. Cienciamérica, 11(2), 124-138. <https://doi.org/10.33210/ca.v11i2.399>
- Soto-Estrada, E., Álvarez-Carrascal, M. F., Gómez-Lizarazo, J., & Valencia-Montoya, D. (2019). *Confort térmico en viviendas de Medellín*. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 18(35), 51-68. <https://doi.org/10.22395/rium.v18n35a4>

- Tavares Silva, S., & Guimarães Sousa, N. (2020). *Uso da energia solar como fonte alternativa para o aquecimento de utilidades: simulação e controle*. Research Society And Development, 9(3), e188932730. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i3.2730>
- Thangam, A., Auckaili, A., & Farid, M. (2022). *Combination of Passive and Active Solar Heating with Thermal Energy Storage*. Molecules, 27(14), 4386. <https://doi.org/10.3390/molecules27144386>
- Ticona Chura, J. G., & Vilca Apaza, H. M. (2022). *Casa caliente: Diseño de un módulo de vivienda rural bioclimatizado para mejorar el confort térmico en la zona altoandina, Puno - 2021*. Tesis de Grado. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/91365>
- Toala-Zambrano, L. A., Vanga-Arvelo, M. G., Muñoz-Molina, J. G., & Zambrano-Quiroz, F. N. (2021b). *Percepción del Confort Térmico en Conjuntos Residenciales y su Incidencia en la Calidad de Vida*. Revista Lasallista de Investigación, 18(1), 34-47. <https://doi.org/10.22507/rli.v18n1a3>
- Vera Piazzini, O. G., & Arispe Sevilla, F. S. (2020). *Campamentos mineros en el Perú: Análisis bioclimático y recomendaciones de diseño para mejorar el confort interior*. Módulo Arquitectura CUC, 26, 47-82. <https://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.26.1.2021.03>
- Wang, X., Xia, L., Bales, C., Zhang, X., Copertaro, B., Pan, S., & Wu, J. (2019). *A systematic review of recent air source heat pump (ASHP) systems assisted by solar thermal, photovoltaic and photovoltaic/thermal sources*. Renewable Energy, 146, 2472-2487. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.096>
- Wieser, M., Garaycochea, A., & Prada, V. (2023). *Improving the thermal performance of schools in the High Andean Region of Peru. The case of “PRONIED’S prefabricated frost-type modular classrooms”*. Revista Hábitat Sustentable, 13(1), 56-67. <https://doi.org/10.22320/07190700.2023.13.01.05>
- Yu, T., Wang, D., Zhao, X., Liu, J., & Kim, M. K. (2022). *Experimental and Numerical Study of an Active Solar Heating System with Soil Heat Storage for Greenhouses in Cold Climate Zones*. Buildings, 12(4), 405. <https://doi.org/10.3390/buildings12040405>

- Zhai, P., Li, J., Lei, T., Zhu, J., & Novakovic, V. (2023). *Indoor thermal comfort comparison between passive solar house with active solar heating and without active solar heating in Tibetan*. *Energy and Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.11.004>
- Zheng, X., Tang, Z., Wang, Y., & Liu, H. (2024). *Performance of the air source heat pump assisted solar heating system combined with PCM floor*. *Applied Thermal Engineering*, 239, 122115. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122115>

ANEXOS

ANEXO 1: FOTOS DEL TAMBO KALLAPUMA Y DORMITORIOS**Figura 48**

Vista lateral del tambo Kallapuma sin caseta del SCSA

**Figura 49**

Vista lateral del tambo Kallapuma con caseta del SCSA



Figura 50

Vista interior del dormitorio de damas del Tambo Kallapuma

**Figura 51**

Vista del radiador instalado en el dormitorio de damas del Tambo Kallapuma



Figura 52

Vista interior del dormitorio de varones del Tambo Kallapuma



ANEXO 2: FOTOS DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN SOLAR ACTIVO

Figura 53

Colectores solares (derecha de la imagen) instalado en el tambo Kallapuma



Figura 54

Colectores de placa plana del SCSA



Figura 55

Termotanque, estación de trabajo y vaso de expansión

**Figura 56**

Circuito del radiador, conexiones hacia el dormitorio de damas



ANEXO 3: FOTO DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DAVIS**Figura 57**

Estación meteorológica Davis instalado en Kallapuma

