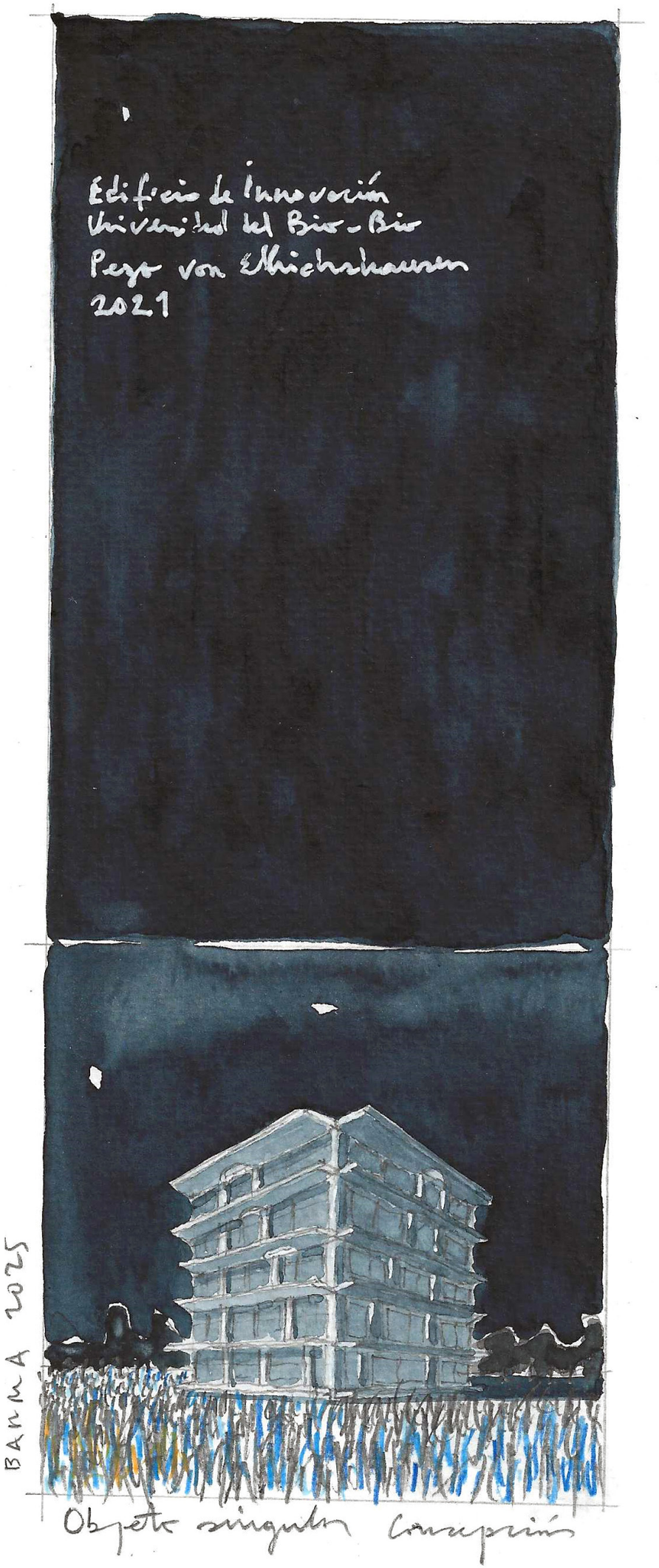


HS

Revista Hábitat Sustentable

ISSN 0719 - 0700
Vol. 16 N°. 1
jun
2026

UNIVERSIDAD DEL BIO BIO



Revista Hábitat Sustentable

ISSN 0719 - 0700
Vol. 16 N°. 1
junio
2026



UNIVERSIDAD DEL BIO BIO

HS REVISTA HÁBITAT SUSTENTABLE V16N1
Revista del Departamento Diseño y Teoría de la Arquitectura
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile

ISSN 0719-6466 versión online

RECTOR:
BENITO UMAÑA HERMOSILLA

DECANO FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO:
HERNÁN BARRÍA CHATEAU

EDITORA RESPONSABLE:
Maureen Trebilcock-Kelly / Departamento Diseño y Teoría de la Arquitectura, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
mtrebilc@ubiobio.cl

Rafael López-Guerrero / Departamento Ciencias de la Construcción, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
rlopez@ubiobio.cl

PRODUCTORA EDITORIAL:
JOCELYN VIDAL RAMOS / Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
javidal@ubiobio.cl

ASISTENTE EDITORIAL:
Arq. ALMENDRA ÁLVAREZ RÍOS / Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
calvarezr@ubiobio.cl

CORRECIÓN DE ESTILO:
TANIA VIDAL RAMOS

GESTIÓN INFORMÁTICA:
KARINA LEIVA / Universidad del Bío-Bío, Chile

DIRECTOR DE ARTE Y DIAGRAMACIÓN:
IGNACIO A. SÁEZ ARANEDA

CONSEJO EDITORIAL:
Dra. M° BEATRIZ PIDERIT MORENO / Departamento de Teoría y Diseño de la Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío - Bío, Concepción, Chile
Dr. RODRIGO GARCÍA ALVARADO / Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
Dra. NINA HORMAZÁBAL / Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile
Dr. WALDO BUSTAMANTE / Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile
Dr. ERNESTO KUCHEN / Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat, San Juan, Argentina
Dra. CRISTINA ENGEL DE ALVAREZ / Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil
Dr. OLAVO ESCORCIA OYOLA / Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
Dr. ALEXANDER GONZÁLEZ CASTAÑO / Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia
Dr. CARLOS RUBIO-BELLIDO / Universidad de Sevilla, Sevilla, España
Dra. MARÍA DEL PILAR MERCADER MOYANO / Universidad de Sevilla, Sevilla, España
Dr. VICENTE FLORES ALÉS / Universidad de Sevilla, Sevilla, España
Dr. FLAVIO CELIS D'AMICO / Universidad de Alcalá, Madrid, España
Dr. ERNESTO ECHEVERRÍA VALIENTE / Universidad de Alcalá, Madrid, España

TRADUCCIONES:
KEVIN WRIGHT

PORTADA:
HERNAN BARRIA CHATEAU
/ Acuarela Dos torres y un sendero, Azocar Catrón, 2016

DIRECCIÓN:
Avda. Collao 1202
CP: 4081112. Concepción, Chile
TEL.(56-41)3111409

Revista **HS** indexada en Scopus, SciELO, ERIHPLUS, Emerging Source Citation Index de Clarivate Analytics, Latindex Catálogo 2.0, Avery Index, DOAJ, Dialnet, Redib, EBSCO, Rebiun, JornalTOcs y ARLA.
HS se adhiere a la Declaración de San Francisco Sobre la Evaluación de la Investigación (DORA).

Los criterios expuestos en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no reflejan necesariamente la opinión de la dirección de la revista.

Revista Hábitat Sustentable es editada por el Facultad de Arquitecturas Construcción y Diseño de la Universidad del Bío-Bío, es financiada por el Fondo de Publicaciones Periódicas de la Vicerrectoría Académica, la Dirección General de Investigación, Desarrollo e Innovación y la Dirección de Postgrado de la Universidad del Bío-Bío junto al Programa de Información Científica Concurso Fondos de Publicación de Revistas Científicas 2018 Proyecto Código: FP180007

04 EDITORIAL
Maureen Trebilcock-Kelly , Rafael Eduardo López-Guerrero

10 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL ENTORNO UNIVERSITARIO PARA LA PLANIFICACIÓN DE INFRAESTRUCTURA VERDE
Walter Ávila-Ruiz, Carlos Salazar-Briones, José Ruiz-Gibert, Juan Saiz-Rodríguez, Marcelo Lomelí-Banda

24 IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PASIVO DE DESHUMIDIFICACIÓN BASADO EN LA TECNOLOGÍA DEL ATRAPANIEBLAS EN VILLA MARÍA DEL TRIUNFO - LIMA, PERÚ
Milagros Delgado-Peña, Alonzo Cardenas-Vera-Pinto, Richard Valdivia-Sisniegas

42 DISEÑO DE SISTEMA INDIRECTO DE FACHADA VERDE PARA MEJORAR EL CONFORT TÉRMICO EN VIVIENDAS MULTIFAMILIARES
Analucia Espinoza-Abarca, Alis Tasayco-Huanca, Victor Miranda-Alfaro

56 OPTIMIZACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO DE UNA CASA ECOLOGICA: MODELAMIENTO EN OPEN FOAM DE MUROS SANDWICH CON AISLANTE DE ICHU (STIPA ICHU)
Henry Javier-Ninahuaman, Kenny Montalvo-Morales, Jose Rojas-Guillén, Grimaldo Quispe-Santivañez

70 CHAKIÑAN: RECUPERACIÓN DE INFRAESTRUCTURA ANCESTRAL Y GESTIÓN DEL TERRITORIO VIVO EN LA COMUNIDAD DE LAS LAGUNAS, SARAGURO
Flor Lozano-Guamán, Angel Lozano-Guamán

96 EVALUACIÓN SOCIOESPACIAL DE LA POBREZA ENERGÉTICA Y SU DIMENSIÓN DE GÉNERO EN ÁREAS VULNERABLES DE GRANADA
Susana Clavijo-Núñez, Antonio Aguilar-Aguilera, María De-la-Hoz-Torres, Antonio Serrano-Jiménez,David Bienvenido-Huertas

108 FIELD-VALIDATED PARAMETRIC ANALYSIS OF OUTDOOR THERMAL COMFORT IN PARKING ENVIRONMENTS IN TIRUCHIRAPPALLI, INDIA
Amalan-Sigmund Kaushik-S., Gopalakrishnan Padmanaban, Subbaiyan Gnanasambandam

126 SHADING THE GLASS FAÇADE: TEXTILE MEMBRANE STRATEGIES FOR EARLY-STAGE DESIGN FOR ENERGY EFFICIENCY OF OFFICE BUILDINGS IN HOT–HUMID CLIMATES
Chandrasekaran Chockalingam, Madhu Mathi Anbu, Mase Noguchi

142 HERMETICIDAD AL AIRE DE VIVIENDAS PRECARIAS EN BARRIOS INFORMALES DE LIMA
Martín Wieser, Ronald Mas, Enrique Barrantes, Enrique Mejía-Solis, Alessandra Gonzales, Jimena Valdivia, Luis-Ricardo Chirinos-García

156 EVALUACIÓN TÉRMICA COMPARATIVA DE UNA ESTRUCTURA DE SOMBREADO VEGETAL Y UNA MALLA DE SOMBREADO ARTIFICIAL
Nelson Arias-Jiménez, Rodrigo Figueroa-San-Martín, Diego Cárdenas-Merino

Editorial
Maureen Trebilcock-Kelly , Rafael Eduardo López-Guerrero
Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 04 -09
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.00

EDITORIAL

PANORAMA TECNOLÓGICO PARA LA SUSTENTABILIDAD DEL AMBIENTE CONSTRUIDO: UNA VISIÓN EDITORIAL

La industria de la arquitectura, ingeniería y construcción (AEC) atraviesa un cambio de paradigma impulsado por la necesidad crítica de mitigar el cambio climático. Actualmente, el sector de la edificación es responsable de aproximadamente el 34% del consumo de energía global y del 37% de las emisiones de CO2 relacionadas con la energía (Ahmed et al., 2026; Oliveira et al., 2026). Ante este escenario, la sustentabilidad ya no puede ser un objetivo periférico o un mero cumplimiento normativo; debe constituir el núcleo del diseño, la construcción y la operación, gestionada a través de tecnologías emergentes que permitan una precisión y eficiencia sin precedentes (Manzoor et al., 2025).

Una de las transformaciones más significativas ocurre en la fase de diseño mediante la optimización multi-objetivo. El diseño de edificios sustentables es inherentemente complejo debido a la interacción de factores como el clima local, las propiedades de la envolvente y el comportamiento del usuario. Tradicionalmente, las simulaciones detalladas de desempeño térmico o lumínico han sido costosas en términos computacionales y de tiempo. Sin embargo, la literatura reciente destaca el uso de modelos subrogados (surrogate models) basados en Machine Learning, los cuales permiten aproximar el comportamiento de simulaciones complejas a una fracción del costo temporal (Cruz et al., 2024; Mihalakakou et al., 2025). Esta capacidad facilita la exploración de espacios de diseño masivos para encontrar soluciones óptimas que equilibren funciones a menudo contrapuestas, como el confort térmico, la eficiencia energética y el costo de ciclo de vida (Cruz et al., 2024).

El enfoque de la eficiencia energética ha evolucionado de análisis estáticos hacia modelos dinámicos de ciclo de vida. El aprendizaje automático se aplica ahora en todas las fases del ciclo edilicio, desde la concepción y la construcción hasta la operación y el retrofit (Kaya et al., 2025). En este contexto, algoritmos como las Redes Neuronales Artificiales y las Máquinas de Soporte de Vectores se han consolidado como herramientas robustas para predecir el consumo de energía y las condiciones de confort, superando las limitaciones de los métodos estadísticos tradicionales (Ahmed et al., 2026; Kaya et al., 2025). Asimismo, el acoplamiento de técnicas de simulación con algoritmos metaheurísticos, como los algoritmos genéticos y la optimización por enjambre de partículas, permite reducir sustancialmente tanto las emisiones de gases de efecto invernadero como los costos operativos (Mihalakakou et al., 2025).

En el ámbito de la gestión energética operativa, la Inteligencia Artificial (IA) juega un papel revolucionario en el control en tiempo real. Tecnologías como las Redes Neuronales Transformer, que utilizan mecanismos de auto-atención para capturar dependencias temporales complejas en los datos de sensores, han demostrado ser altamente efectivas para el pronóstico de carga a corto y mediano plazo (Ahmed et al., 2026). Estos sistemas integrados pueden lograr reducciones de hasta un 50% en la utilización de energía, optimizando sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) sin sacrificar el bienestar del ocupante (Ahmed et al., 2026; Qiu et al., 2025). La convergencia de estos modelos con el Internet de las Cosas (IoT) y las redes inteligentes (smart grids) permite que los edificios dejen de ser consumidores pasivos para convertirse en participantes activos y flexibles en la red eléctrica (Bibri & Huang, 2025).

La envolvente del edificio, como mediadora fundamental entre el interior y el exterior, es otro foco de innovación tecnológica disruptiva. Las envolventes adaptativas y las fachadas inteligentes, que integran sistemas fotovoltaicos, sistemas de doble piel y materiales avanzados como aerogeles, vidrios electrocrómicos o termocrómicos, tienen el potencial de reducir las cargas térmicas de forma dinámica (Tahmasbi et al., 2025). Complementariamente, el uso de materiales de cambio de fase (PCM) y tecnologías de enfriamiento radiativo pasivo contribuyen a estabilizar las temperaturas internas, permitiendo ahorros energéticos significativos y facilitando el camino hacia los edificios de energía cero (Qiu et al., 2025; Tahmasbi et al., 2025). Incluso elementos de infraestructura verde, como los techos verdes, están siendo optimizados mediante modelos de aprendizaje profundo para maximizar no solo el ahorro energético, sino también la retención de agua de lluvia y la biodiversidad urbana (Mihalakakou et al., 2026).

La sostenibilidad del ambiente construido exige también una transición ineludible hacia la economía circular. Tecnologías de la Industria 4.0 introducen el concepto de "Edificios como Bancos de Materiales" (BAMB), donde el Modelado de Información de Construcción (BIM) se utiliza para rastrear y gestionar los componentes edilicios a lo largo de su vida útil (Oliveira et al., 2026). La integración de Blockchain y Pasaportes de Materiales asegura la trazabilidad y facilita la reutilización y el reciclaje al final de la vida útil, minimizando los residuos de construcción y demolición (Oliveira et al., 2026). Además, se han desarrollado sistemas robóticos operados por Deep Learning para la clasificación de residuos con una pureza promedio del 97%, haciendo viable económicamente la recuperación de recursos en la industria (Oliveira et al., 2026).

En una escala urbana y sistémica, el uso de Gemelos Digitales (Digital Twins) emerge como una herramienta poderosa. Estas réplicas virtuales permiten la monitorización predictiva del carbono y la optimización del entorno construido dentro del marco de las ciudades inteligentes (Bibri & Huang, 2025). Los Gemelos Digitales facilitan la creación de distritos de energía positiva y refuerzan la resiliencia ante desastres climáticos mediante el análisis de Big Data y simulaciones de escenarios futuros (Bibri & Huang, 2025). La resiliencia, de hecho, se ha vuelto un pilar central del diseño contemporáneo; las herramientas de diseño paramétrico y generativo deben integrar no solo métricas técnicas, sino también perspectivas de identidad cultural y necesidades sociales para asegurar que las viviendas sean equitativas y coherentes con su contexto (Kumar et al., 2026).

A pesar de estas promesas, persisten desafíos significativos para la adopción masiva de estas tecnologías. Los altos costos iniciales de inversión y la falta de marcos regulatorios estandarizados siguen siendo barreras críticas (Manzoor et al.,

2025). Asimismo, existe una necesidad imperativa de mayor transparencia y ética en el manejo de datos; la comunidad investigadora debe promover la disponibilidad de códigos y bases de datos abiertos para evitar los sesgos en los modelos de IA y asegurar la replicabilidad de los hallazgos científicos (Cruz et al., 2024; Oliveira et al., 2026).

En conclusión, la integración de IA, Machine Learning, Digital Twins y procesos avanzados de simulación no es simplemente una opción de vanguardia, sino una necesidad para crear un hábitat verdaderamente sustentable. Estas tecnologías proporcionan las herramientas necesarias para transitar de una construcción fragmentada a una gestión holística, circular y resiliente del ambiente construido. Invitamos a la comunidad científica a continuar explorando estas fronteras tecnológicas, manteniendo siempre el rigor científico y el compromiso ético que la crisis ambiental global nos demanda.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abu Jadayil, W., Alkhedher, M., Shwaheen, G., & Ramadan, M. (2026). Sustainable and efficient use of integrated technology solutions in energy management. *Energy Reports, 15*, 109319. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2026.109319

Ahmed, N., Ding, Y., Canti, G., & Anglani, N. (2026). Sustainable building's energy management with artificial intelligence and machine learning: A decadal scoping review (2014–2024). *Energy Reports, 15*, 109082. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2026.109082

Bibri, S. E., & Huang, J. (2025). Artificial intelligence and digital twins for environmentally sustainable smart buildings: A comprehensive systematic review. *Environmental Science and Ecotechnology, 28*, 100628. https://doi.org/10.1016/j.ese.2025.100628

Cruz, A. S., Caldas, L. R., Mendes, V. M., Mendes, J. C., & Bastos, L. E. G. (2024). Multi-objective optimization based on surrogate models for sustainable building design: A systematic literature review. *Building and Environment, 266*, 112147. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112147

Kaya, G. N., Beyhan, F., Ilerisoy, Z. Y., & Cudzik, J. (2025). Evaluation of machine learning applications in building life cycle processes for energy efficiency: A systematic review. *Energy Reports, 13*, 4900–4916. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.04.034

Kumar, R., Dekin, A., Prince, M., Froese, T., & Mukhopadhyaya, P. (2026). Integrated building form and structural strategies for sustainable and resilient residential buildings. *Sustainable Cities and Society: Advances, 2*, 100075. https://doi.org/10.1016/j.scsadv.2026.100075

Manzoor, B., Antwi-Afari, M. F., & Alotaibi, K. S. (2025). Green buildings and digital technologies: A pathway to sustainable development. *Green Technologies and Sustainability, 3*, 100243. https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100243

Mihalakakou, G., Giannadakis, A., Malefaki, S., Souliotis, M., Georgiou, P., Romaios, A., Antzoulatou, A., Nikolakopoulos, P., & Paravantis, J. A. (2025). Coupling simulation-based and machine learning methodologies for energy optimization and environmental impact mitigation in buildings. *Journal of Building Engineering, 112*, 113809. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113809

Mihalakakou, G., Romeos, A., Malefaki, S., Souliotis, M., Paravantis, J. A., Georgiou, P., & Giannadakis, A. (2026). From simulation to surrogates: optimizing green roofs for sustainable urban performance. *Sustainable Cities and Society, 145*, 107439. https://doi.org/10.1016/j.scs.2026.107439

Oliveira, J., Schreiber, D., & Jahno, V. D. (2026). Sustainability in civil construction through industry 4.0 and BIM technologies. *Automation in Construction, 182*, 106729. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106729

Qiu, L., Li, H., Wang, Z., Yang, Y., Lazarus, G. A., Chen, Y., & Feng, Y. (2025). Pathways to decarbonizing buildings: Harnessing energy efficiency and sustainable technologies. *Thermal Science and Engineering Progress, 66*, 103991. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103991

Tahmasbi, F., Khdair, A. I., Aburumman, G. A., Tahmasebi, M., Thi, N. H., & Afrand, M. (2025). Energy-efficient building façades: A comprehensive review of innovative technologies and sustainable strategies. *Journal of Building Engineering, 99*, 111643. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111643

Editorial
Maureen Trebilcock-Kelly , Rafael Eduardo López-Guerrero
Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 04 -09
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.00

EDITORIAL

TECHNOLOGICAL OUTLOOK FOR THE BUILT ENVIRONMENT'S SUSTAINABILITY: AN EDITORIAL VIEW

The architecture, engineering, and construction (AEC) industry is going through a paradigm shift driven by the critical need to mitigate climate change. Currently, the building sector is responsible for approximately 34% of global energy consumption and 37% of energy-related CO_2 emissions (Ahmed et al., 2026; Oliveira et al., 2026). Faced with this scenario, sustainability can no longer be a peripheral objective or a mere regulatory compliance requirement; it must constitute the core of design, construction, and operation, managed through emerging technologies that provide unprecedented precision and efficiency (Manzoor et al., 2025).

One of the most significant transformations occurs in the design phase through multi-objective optimization. The design of sustainable buildings is inherently complex due to interactions among factors such as the local climate, the properties of the envelope, and user behavior. Traditionally, detailed thermal or light performance simulations have been costly both computationally and time-consuming. However, recent literature highlights the use of Machine Learning-based surrogate models, which enable the approximation of complex simulations' behavior in a fraction of the time and cost (Cruz et al., 2024; Mihalakakou et al., 2025). This capability facilitates the exploration of massive design spaces to find optimal solutions that balance often-conflicting functions such as thermal comfort, energy efficiency, and life-cycle cost (Cruz et al., 2024).

The energy-efficiency approach has evolved from static analyses to dynamic life-cycle models. Machine learning is now applied in all phases of the building cycle, from conception and construction to operation and retrofit (Kaya et al., 2025). In this context, algorithms such as Artificial Neural Networks and Vector Support Machines have established themselves as robust tools for predicting energy consumption and comfort conditions, overcoming the limitations of traditional statistical methods (Ahmed et al., 2026; Kaya et al., 2025). The coupling of simulation techniques with metaheuristic algorithms, such as genetic algorithms and particle swarm optimization, also produces substantial reductions in both greenhouse gas emissions and operating costs (Mihalakakou et al., 2025).

In the field of operational energy management, Artificial Intelligence (AI) plays a revolutionary role in real-time control. Technologies such as Transformer Neural Networks, which use self-attention mechanisms to capture complex temporal dependencies in sensor data, have proven highly effective for short- and medium-term load forecasting (Ahmed et al., 2026). These integrated systems can achieve up to 50% reductions in energy use, optimizing heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems without compromising occupant well-being (Ahmed et al., 2026; Qiu et al., 2025). The convergence of these models with the Internet of Things (IoT) and smart grids enables buildings to move from passive consumers to active, flexible participants in the electricity grid (Bibri & Huang, 2025).

The building envelope, as a fundamental mediator between interior and exterior, is another focus of disruptive technological innovation. Adaptive envelopes and smart facades, which integrate photovoltaic systems, double-skin systems, and advanced materials such as aerogels, electrochromic or thermochromic glasses, have the potential to dynamically reduce thermal loads (Tahmasbi et al., 2025). In addition, the use of phase change materials (PCMs) and passive radiative cooling technologies helps stabilize indoor temperatures, producing significant energy savings and facilitating the path to zero-energy buildings (Qiu et al., 2025; Tahmasbi et al., 2025). Even green infrastructure elements, such as green roofs, are being optimized using deep learning models to maximize not only energy savings but also rainwater retention and urban biodiversity (Mihalakakou et al., 2026).

The sustainability of the built environment also requires an inescapable transition to the circular economy. Industry 4.0 technologies introduce the concept of "Buildings as Material Banks" (BAMB), where Building Information Modeling (BIM) is used to track and manage building components throughout their useful life (Oliveira et al., 2026). The integration of Blockchain and Material Passports ensures traceability and facilitates reuse and recycling at the end of the useful life, minimizing construction and demolition waste (Oliveira et al., 2026). In addition, robotic systems powered by Deep Learning have been developed to classify waste with an average purity of 97%, making resource recovery in industry economically viable (Oliveira et al., 2026).

At the urban and systemic scales, Digital Twins emerge as a powerful tool. These virtual replicas allow predictive carbon monitoring and optimization of the built environment within the framework of smart cities (Bibri & Huang, 2025). Digital Twins facilitate the creation of positive energy districts and strengthen resilience to climate disasters through Big Data analysis and simulations of future scenarios (Bibri & Huang, 2025). Resilience, in fact, has become a central pillar of contemporary design; parametric and generative design

tools must integrate not only technical metrics but also cultural identity perspectives and social needs to ensure that housing is equitable and coherent with its context (Kumar et al., 2026).

Despite these promises, significant challenges remain for the mass adoption of these technologies. High initial investment costs and lack of standardized regulatory frameworks remain critical barriers (Manzoor et al., 2025). There is also an urgent need for greater transparency and ethical practices in data management; the research community must promote the availability of open-source code and datasets to avoid biases in AI models and ensure the replicability of scientific findings (Cruz et al., 2024; Oliveira et al., 2026).

In conclusion, the integration of AI, Machine Learning, Digital Twins, and advanced simulation processes is not simply a cutting-edge option but a necessity for creating a truly sustainable habitat. These technologies provide the necessary tools to move from a fragmented construction to a holistic, circular, and resilient management of the built environment. We invite the scientific community to continue exploring these technological frontiers, always maintaining the scientific rigor and ethical commitment that the global environmental crisis demands of us.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

Abu Jadayil, W., Alkhedher, M., Shwaheen, G., & Ramadan, M. (2026). Sustainable and efficient use of integrated technology solutions in energy management. *Energy Reports, 15*, 109319. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2026.109319

Ahmed, N., Ding, Y., Canti, G., & Anglani, N. (2026). Sustainable building's energy management with artificial intelligence and machine learning: A decadal scoping review (2014–2024). *Energy Reports, 15*, 109082. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2026.109082

Bibri, S. E., & Huang, J. (2025). Artificial intelligence and digital twins for environmentally sustainable smart buildings: A comprehensive systematic review. *Environmental Science and Ecotechnology, 28*, 100628. https://doi.org/10.1016/j.ese.2025.100628

Cruz, A. S., Caldas, L. R., Mendes, V. M., Mendes, J. C., & Bastos, L. E. G. (2024). Multi-objective optimization based on surrogate models for sustainable building design: A systematic literature review. *Building and Environment, 266*, 112147. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112147

Kaya, G. N., Beyhan, F., Ilerisoy, Z. Y., & Cudzik, J. (2025). Evaluation of machine learning applications in building life cycle processes for energy efficiency: A systematic review. *Energy Reports, 13*, 4900–4916. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.04.034

Kumar, R., Dekin, A., Prince, M., Froese, T., & Mukhopadhyaya, P. (2026). Integrated building form and structural strategies for sustainable and resilient residential buildings. *Sustainable Cities and Society: Advances, 2*, 100075. https://doi.org/10.1016/j.scsadv.2026.100075

Manzoor, B., Antwi-Afari, M. F., & Alotaibi, K. S. (2025). Green buildings and digital technologies: A pathway to sustainable development. *Green Technologies and Sustainability, 3*, 100243. https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100243

Mihalakakou, G., Giannadakis, A., Malefaki, S., Souliotis, M., Georgiou, P., Romaios, A., Antzoulatou, A., Nikolakopoulos, P., & Paravantis, J. A. (2025). Coupling simulation-based and machine learning methodologies for energy optimization and environmental impact mitigation in buildings. *Journal of Building Engineering, 112*, 113809. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113809

Mihalakakou, G., Romeos, A., Malefaki, S., Souliotis, M., Paravantis, J. A., Georgiou, P., & Giannadakis, A. (2026). From simulation to surrogates: optimizing green roofs for sustainable urban performance. *Sustainable Cities and Society, 145*, 107439. https://doi.org/10.1016/j.scs.2026.107439

Oliveira, J., Schreiber, D., & Jahno, V. D. (2026). Sustainability in civil construction through industry 4.0 and BIM technologies. *Automation in Construction, 182*, 106729. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106729

Qiu, L., Li, H., Wang, Z., Yang, Y., Lazarus, G. A., Chen, Y., & Feng, Y. (2025). Pathways to decarbonizing buildings: Harnessing energy efficiency and sustainable technologies. *Thermal Science and Engineering Progress, 66*, 103991. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103991

Tahmasbi, F., Khdair, A. I., Aburumman, G. A., Tahmasebi, M., Thi, N. H., & Afrand, M. (2025). Energy-efficient building façades: A comprehensive review of innovative technologies and sustainable strategies. *Journal of Building Engineering, 99*, 111643. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111643

Editorial
Maureen Trebilcock-Kelly , Rafael Eduardo López-Guerrero
Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 04 -09
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.00

EDITORIAL

PANORAMA TECNOLÓGICO PARA A SUSTENTABILIDADE DO AMBIENTE CONSTRUÍDO: UMA VISÃO EDITORIAL

A indústria da arquitetura, engenharia e construção (AEC) atravessa uma mudança de paradigma impulsionada pela necessidade crítica de mitigar as mudanças climáticas. Atualmente, o setor da edificação é responsável por aproximadamente 34% do consumo global de energia e por 37% das emissões de CO_2 associadas à energia (Ahmed et al., 2026; Oliveira et al., 2026). Diante desse cenário, a sustentabilidade já não pode ser um objetivo periférico ou um mero cumprimento normativo; ela deve constituir o núcleo do projeto, da construção e da operação, sendo gerida por meio de tecnologias emergentes que proporcionem precisão e eficiência sem precedentes (Manzoor et al., 2025).

Uma das transformações mais significativas ocorre na fase de projeto, por meio da otimização multiobjetivo. O projeto de edifícios sustentáveis é inerentemente complexo devido à interação entre fatores como o clima local, as propriedades da envoltória e o comportamento do usuário. Tradicionalmente, as simulações detalhadas de desempenho térmico ou lumínico têm sido dispendiosas em termos computacionais e de tempo. Contudo, a literatura recente destaca o uso de modelos substitutos (*surrogate models*) baseados em *Machine Learning*, que permitem aproximar o comportamento de simulações complexas a uma fração do custo temporal (Cruz et al., 2024; Mihalakakou et al., 2025). Essa capacidade facilita a exploração de espaços de projeto em larga escala, em busca de soluções ideais que equilibrem funções muitas vezes contrapostas, como o conforto térmico, a eficiência energética e o custo do ciclo de vida (Cruz et al., 2024).

A abordagem da eficiência energética evoluiu das análises estáticas para modelos dinâmicos de ciclo de vida. O aprendizado de máquina é atualmente aplicado em todas as fases do ciclo edilício, desde a concepção e a construção até a operação e o *retrofit* (Kaya et al., 2025). Nesse contexto, algoritmos como as Redes Neurais Artificiais e as Máquinas de Vetores de Suporte consolidaram-se como ferramentas robustas para prever o consumo de energia e as condições de conforto, superando as limitações dos métodos estatísticos tradicionais (Ahmed et al., 2026; Kaya et al., 2025). Da mesma forma, o acoplamento de técnicas de simulação a algoritmos meta-heurísticos, como os algoritmos genéticos e a otimização por enxame de partículas, permite reduzir substancialmente tanto as emissões de gases de efeito estufa quanto os custos operacionais (Mihalakakou et al., 2025).

No âmbito da gestão energética operacional, a Inteligência Artificial (IA) desempenha um papel revolucionário no controle em tempo real. Tecnologias como as Redes Neurais *Transformer*, que utilizam mecanismos de autoatenção para capturar dependências temporais complexas nos dados de sensores, mostraram-se altamente eficazes para a previsão de carga de curto e médio prazo (Ahmed et al., 2026). Esses sistemas integrados podem alcançar reduções de até 50% no consumo de energia, otimizando os sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC) sem sacrificar o bem-estar dos ocupantes (Ahmed et al., 2026; Qiu et al., 2025). A convergência desses modelos com a Internet das Coisas (IoT) e as redes inteligentes (*smart grids*) permite que os edifícios deixem de ser consumidores passivos e se tornem participantes ativos e flexíveis na rede elétrica (Bibri & Huang, 2025).

A envoltória do edifício, como mediadora fundamental entre o interior e o exterior, é outro foco de inovação tecnológica disruptiva. As envoltórias adaptativas e as fachadas inteligentes, que integram sistemas fotovoltaicos, sistemas de dupla pele e materiais avançados, como aerogéis, vidros eletrocrômicos ou termocrômicos, têm potencial para reduzir as cargas térmicas de forma dinâmica (Tahmasbi et al., 2025). De modo complementar, o uso de materiais de mudança de fase (PCM) e de tecnologias de resfriamento radiativo passivo contribui para estabilizar as temperaturas internas, permitindo economias energéticas significativas e facilitando o caminho rumo aos edifícios de energia zero (Qiu et al., 2025; Tahmasbi et al., 2025). Até mesmo elementos de infraestrutura verde, como os telhados verdes, vêm sendo otimizados por meio de modelos de aprendizado profundo para maximizar não apenas a economia energética, mas também a retenção de águas pluviais e a biodiversidade urbana (Mihalakakou et al., 2026).

A sustentabilidade do ambiente construído exige também uma transição incontornável rumo à economia circular. Tecnologias da Indústria 4.0 introduzem o conceito de "Edifícios como Bancos de Materiais" (BAMB), no qual a Modelagem da Informação da Construção (BIM) é utilizada para rastrear e gerir os componentes edilícios ao longo de sua vida útil (Oliveira et al., 2026). A integração de *Blockchain* e Passaportes de Materiais assegura a rastreabilidade e facilita a reutilização e a reciclagem ao final da vida útil, minimizando os resíduos de construção e demolição (Oliveira et al., 2026). Além disso, foram desenvolvidos sistemas robóticos operados por *Deep Learning* para a triagem de resíduos, com uma pureza média de 97%, tornando economicamente viável a recuperação de recursos na indústria (Oliveira et al., 2026).

Em uma escala urbana e sistêmica, o uso de Gêmeos Digitais (*Digital Twins*) desponta como uma ferramenta poderosa. Essas réplicas virtuais permitem o monitoramento preditivo do carbono e a otimização do ambiente construído no âmbito das cidades inteligentes (Bibri & Huang, 2025). Os Gêmeos Digitais facilitam a criação de distritos de energia positiva e reforçam a resiliência frente a desastres climáticos por meio da análise de *Big Data* e de simulações de cenários futuros (Bibri & Huang, 2025). A resiliência, de fato, tornou-se um pilar central do projeto contemporâneo; as ferramentas de projeto paramétrico e generativo devem integrar não apenas métricas técnicas, mas também perspectivas de identidade cultural e necessidades sociais, a fim de assegurar que as habitações sejam equitativas e coerentes com seu contexto (Kumar et al., 2026).

Apesar dessas promessas, persistem desafios significativos para a adoção em larga escala dessas tecnologias. Os altos custos iniciais de investimento e a ausência de marcos regulatórios padronizados continuam sendo barreiras críticas (Manzoor et al., 2025). Da mesma forma, há uma necessidade imperativa de maior transparência e ética no tratamento de dados; a comunidade científica deve promover a disponibilização de códigos e bases de dados abertos, a fim de evitar vieses nos modelos de IA e assegurar a replicabilidade dos achados científicos (Cruz et al., 2024; Oliveira et al., 2026).

Em conclusão, a integração de IA, *Machine Learning*, *Digital Twins* e processos avançados de simulação não é apenas uma opção de vanguarda, mas uma necessidade para criar um habitat verdadeiramente sustentável. Essas tecnologias fornecem as ferramentas necessárias para transitar de uma construção fragmentada para uma gestão holística, circular e resiliente do ambiente construído. Convidamos a comunidade científica a continuar explorando essas fronteiras tecnológicas, mantendo sempre o rigor científico e o compromisso ético que a crise ambiental global nos exige.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abu Jadayil, W., Alkhedher, M., Shwaheen, G., & Ramadan, M. (2026). Sustainable and efficient use of integrated technology solutions in energy management. *Energy Reports, 15*, 109319. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2026.109319

Ahmed, N., Ding, Y., Canti, G., & Anglani, N. (2026). Sustainable building's energy management with artificial intelligence and machine learning: A decadal scoping review (2014–2024). *Energy Reports, 15*, 109082. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2026.109082

Bibri, S. E., & Huang, J. (2025). Artificial intelligence and digital twins for environmentally sustainable smart buildings: A comprehensive systematic review. *Environmental Science and Ecotechnology, 28*, 100628. https://doi.org/10.1016/j.ese.2025.100628

Cruz, A. S., Caldas, L. R., Mendes, V. M., Mendes, J. C., & Bastos, L. E. G. (2024). Multi-objective optimization based on surrogate models for sustainable building design: A systematic literature review. *Building and Environment, 266*, 112147. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112147

Kaya, G. N., Beyhan, F., Ilerisoy, Z. Y., & Cudzik, J. (2025). Evaluation of machine learning applications in building life cycle processes for energy efficiency: A systematic review. *Energy Reports, 13*, 4900–4916. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.04.034

Kumar, R., Dekin, A., Prince, M., Froese, T., & Mukhopadhyaya, P. (2026). Integrated building form and structural strategies for sustainable and resilient residential buildings. *Sustainable Cities and Society: Advances, 2*, 100075. https://doi.org/10.1016/j.scsadv.2026.100075

Manzoor, B., Antwi-Afari, M. F., & Alotaibi, K. S. (2025). Green buildings and digital technologies: A pathway to sustainable development. *Green Technologies and Sustainability, 3*, 100243. https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100243

Mihalakakou, G., Giannadakis, A., Malefaki, S., Souliotis, M., Georgiou, P., Romaios, A., Antzoulatou, A., Nikolakopoulos, P., & Paravantis, J. A. (2025). Coupling simulation-based and machine learning methodologies for energy optimization and environmental impact mitigation in buildings. *Journal of Building Engineering, 112*, 113809. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113809

Mihalakakou, G., Romeos, A., Malefaki, S., Souliotis, M., Paravantis, J. A., Georgiou, P., & Giannadakis, A. (2026). From simulation to surrogates: optimizing green roofs for sustainable urban performance. *Sustainable Cities and Society, 145*, 107439. https://doi.org/10.1016/j.scs.2026.107439

Oliveira, J., Schreiber, D., & Jahno, V. D. (2026). Sustainability in civil construction through industry 4.0 and BIM technologies. *Automation in Construction, 182*, 106729. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106729

Qiu, L., Li, H., Wang, Z., Yang, Y., Lazarus, G. A., Chen, Y., & Feng, Y. (2025). Pathways to decarbonizing buildings: Harnessing energy efficiency and sustainable technologies. *Thermal Science and Engineering Progress, 66*, 103991. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103991

Tahmasbi, F., Khdair, A. I., Aburumman, G. A., Tahmasebi, M., Thi, N. H., & Afrand, M. (2025). Energy-efficient building façades: A comprehensive review of innovative technologies and sustainable strategies. *Journal of Building Engineering, 99*, 111643. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111643

Maureen Trebilcock-Kelly
Doctora en Arquitectura Sustentable
Editora Responsable Hábitat Sustentable, Profesora Titular,
Departamento Diseño y Teoría de la Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
https://orcid.org/0000-0002-1984-0259
mtrebilc@ubiobio.cl



Rafael Eduardo López-Guerrero
Doctorado en Ciencias de la Ingeniería
Co-Editor Hábitat Sustentable, Profesor Asistente,
Departamento de Ciencias de la Construcción, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño,
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
https://orcid.org/0000-0002-5941-0421
rlopez@ubiobio.cl



Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 10 - 23
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.01

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL ENTORNO UNIVERSITARIO PARA LA PLANIFICACIÓN DE INFRAESTRUCTURA VERDE

Recibido 07/03/2026
Aceptado 24/04/2026

THERMAL CHARACTERIZATION OF THE UNIVERSITY ENVIRONMENT FOR GREEN INFRASTRUCTURE PLANNING

CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DO AMBIENTE UNIVERSITÁRIO PARA O PLANEJAMENTO DE INFRAESTRUTURA VERDE

Walter Ávila-Ruiz
Magíster en Ingeniería
Estudiante de Doctorado de la Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, México
https://orcid.org/0009-0000-3450-1194
walter.avila@uabc.edu.mx

Carlos Salazar-Briones (autor correspondencia)
Doctor en Ciencias
Profesor investigador de la Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, México
https://orcid.org/0000-0002-5237-5539
csalazar86@uabc.edu.mx

José Ruiz-Gibert
Doctor en Ciencias
Profesor investigador de la Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, México
https://orcid.org/0000-0003-4532-7413
mizael.ruiz@uabc.edu.mx

Juan Saiz-Rodríguez
Doctor en Ciencias
Profesor investigador del Departamento de Ingeniería Civil y Minas
Universidad de Sonora
Hermosillo, México
https://orcid.org/0000-0002-0046-7298
alejandro.saiz@unison.mx

Marcelo Lomelí-Banda
Doctor en Ciencias
Profesor investigador de la Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Baja California
Mexicali, México
https://orcid.org/0000-0003-0171-9394
lomeli.marcelo@uabc.edu.mx

CC BY SA

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 10 - 23
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.01

RESUMEN

El incremento de las temperaturas urbanas, asociado al cambio climático y a la expansión de la infraestructura gris, ha intensificado el fenómeno de isla de calor urbana (ICU), lo que ha afectado el confort térmico en espacios exteriores. Este estudio caracterizó el entorno térmico del campus de la Universidad Autónoma de Baja California en Mexicali, una de las ciudades más calurosas del mundo, con el objetivo de identificar oportunidades para la planificación de infraestructura verde (IV). La metodología incluyó la generación de un ortomosaico de alta resolución mediante un vehículo aéreo no tripulado para el cálculo del índice NGRDI, mediciones in situ de temperatura superficial (LST) con termómetros infrarrojos y el análisis geoespacial de ambas variables. Los resultados mostraron temperaturas más elevadas en superficies impermeables, como el concreto y el asfalto, mientras que las áreas arboladas presentaron valores más bajos. No obstante, se identificaron zonas verdes con bajo vigor vegetal y capacidad de enfriamiento limitada, lo que evidencia la necesidad de fortalecer las estrategias de IV.

Palabras clave
islas de calor urbanas, vegetación, NGRDI, infraestructura verde, planeación

ABSTRACT

The increase in urban temperatures, driven by climate change and the expansion of gray infrastructure, has intensified the urban heat island (UHI) phenomenon, affecting thermal comfort in outdoor spaces. This study characterized the campus thermal environment at the Autonomous University of Baja California in Mexicali, one of the world's hottest cities, to identify opportunities for green infrastructure (GI) planning. The methodology included generating a high-resolution orthomosaic using an unmanned aerial vehicle to calculate the NGRDI index, in situ measurements of land surface temperature (LST) using infrared thermometers, and geospatial analysis of both variables. The results showed higher temperatures on impervious surfaces such as concrete and asphalt, while tree-covered areas presented lower values. However, some green areas with low vegetation vigor showed limited cooling capacity, highlighting the need to strengthen GI strategies.

Keywords
urban heat islands, vegetation, NGRDI, green infrastructure, planning

RESUMO

O aumento das temperaturas urbanas, associado às mudanças climáticas e à expansão da infraestrutura cinza, tem intensificado o fenômeno da ilha de calor urbana (ICU), afetando o conforto térmico em espaços externos. Este estudo caracterizou o ambiente térmico do campus da Universidade Autônoma da Baixa Califórnia em Mexicali, uma das cidades mais quentes do mundo, com o objetivo de identificar oportunidades para o planejamento de infraestrutura verde (IV). A metodologia incluiu a geração de um ortomosaico de alta resolução por meio de um veículo aéreo não tripulado para o cálculo do índice NGRDI, medições in situ da temperatura da superfície (LST) com termômetros infravermelhos e a análise geoespacial de ambas as variáveis. Os resultados mostraram temperaturas mais elevadas em superfícies impermeáveis, como o concreto e o asfalto, enquanto as áreas arborizadas apresentaram valores mais baixos. No entanto, foram identificadas zonas verdes com baixo vigor vegetal e capacidade limitada de resfriamento, o que evidencia a necessidade de fortalecer as estratégias de infraestrutura verde.

Palavras-chave
ilhas de calor urbanas, vegetação, NGRDI, infraestrutura verde, planejamento

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 10 - 23
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.01

INTRODUCCIÓN

La aceleración de la urbanización a nivel global, particularmente en países en vías de desarrollo, ha generado una fuerte concentración poblacional en las ciudades, donde actualmente habita aproximadamente el 55 % de la población mundial (United Nations, 2018; Valavanidis, 2024). Este proceso, en combinación con el cambio climático, ha intensificado el fenómeno de isla de calor urbana (ICU), que deteriora las condiciones ambientales del entorno construido y afecta de manera directa la salud de la población y el confort térmico en espacios exteriores. Los efectos adversos del sobrecalentamiento urbano se manifiestan tanto en el bienestar psicológico como en la percepción del calor, el estado emocional y la capacidad de concentración, así como en impactos fisiológicos asociados, tales como quemaduras solares y otros trastornos relacionados con la exposición térmica (Rony & Alamgir, 2023). En este contexto, el confort térmico en espacios exteriores se ha convertido en un factor de creciente relevancia para la calidad de vida urbana.

Las ICU constituyen un fenómeno ambiental caracterizado por un incremento de la temperatura media en las áreas urbanas en comparación con las zonas rurales circundantes (Garzón et al., 2024). Este fenómeno es consecuencia directa de las actividades humanas y de la transformación del paisaje natural, donde predominan materiales artificiales que alteran el balance térmico original de la superficie terrestre, incrementándose la absorción y retención de calor (Oke, 1982).

Debido al aumento de las temperaturas urbanas y al agravamiento del fenómeno de ICU, diversos estudios han señalado que el confort térmico en espacios exteriores urbanos es un elemento clave para el bienestar de la población. En los procesos de diseño urbano, se ha enfatizado la necesidad de considerar el impacto térmico del entorno construido y de promover investigaciones orientadas a mejorar la habitabilidad exterior, particularmente a escala micro climática (Mandjoupa et al., 2025). La ICU se caracteriza por la cuantificación de indicadores que se presentan en la temperatura del aire, específicamente a partir de la zona más baja de la atmósfera, hasta la altura de los árboles o edificios (Arnfield, 2003; Stewart, 2011). Además del fenómeno de la Isla de Calor Urbano (ICU), la temperatura superficial terrestre (Land Surface Temperature – LST por sus siglas en inglés) constituye una variable fundamental para el análisis del balance de energía superficie-atmósfera. Mientras que la ICU se caracteriza a partir de la temperatura del aire, la LST representa la temperatura de la superficie y es una de las principales variables utilizadas para evaluar este fenómeno desde una perspectiva superficial (Schwarz et al., 2012; Krishnan et al., 2020). En este sentido, es importante distinguir entre la Isla de Calor Urbano atmosférica (Urban Heat Island, UHI), asociada a la temperatura del aire dentro del dosel urbano, y la Isla de Calor Urbano Superficial (ICUS o Surface Urban Heat Island, SUHI), derivada del análisis de la LST (Voogt & Oke, 2003). Esta última permite caracterizar las variaciones térmicas de la superficie mediante técnicas de teledetección, que proporcionainformación espacialmente continua del comportamiento térmico urbano.

La literatura especializada indica que para que un espacio urbano presente condiciones adecuadas de confort térmico debe cumplir, al menos, con tres criterios fundamentales: la configuración morfológica del entorno construido, la orientación espacial de sus componentes y la presencia de vegetación (Yahia & Johansson, 2014). Estudios como los de Wu et al. (2024) indican que al aumentar un 1% en la cobertura vegetal reduce la temperatura superficial de 0.099–0.1 °C en entornos urbanos, donde se ha observado que la sombra generada por los árboles puede aportar hasta el 80% del efecto total de enfriamiento en espacios abiertos (Shashua-Bar & Hoffman, 2000), que consolidan la vegetación como un elemento clave en la regulación micro climática urbana (Declet-Barreto et al., 2013).

La vegetación juega un papel importante para la mitigación de altas temperaturas superficiales, ya que algunas propiedades como la evapotranspiración, reducen la temperatura del ambiente. No obstante, al presentarse daño o estrés en la vegetación, el enfriamiento ambiental podría verse reducido (Speak, 2015).

Existen diversos índices que describen la salud de la vegetación, siendo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI por sus siglas en inglés) el más utilizado en la literatura (Huang et al., 2021). Comúnmente este índice se obtiene mediante el uso cámaras multiespectrales montadas en Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), también conocido como drones. Sin embargo, estos equipos sueles ser costosos, limitándose su adquisición (Stamford et al., 2023). Como alternativa, se pueden utilizar índices basados únicamente en bandas RGB (Rojo/Verde/Azul) para identificar y diferenciar vegetación y/o cultivos de suelos u otras superficies, así como para evaluar la salud de la vegetación.

Estudios como los de Macedo et al., (2025), concluyen que uno de los índices más fiables para la detección de salud de la vegetación basados en bandas RGB es el Índice de Diferencia Normalizado Verde/Rojo (Normalized Green Red Difference Index - NGRDI por sus siglas en inglés), siendo un índice más accesible de estimar. En su estudio, tuvieron como objetivo la detección de maleza entre los viñedos en el periodo de ciclo de cultivos se utilizaron imágenes RGB obtenidas a partir de VANT, evaluándose diversos índices de vegetación, siendo el NGRDI el índice que mostró mejores resultados, diferenciándose de manera solida las clases de vid y suelo, y detectándose

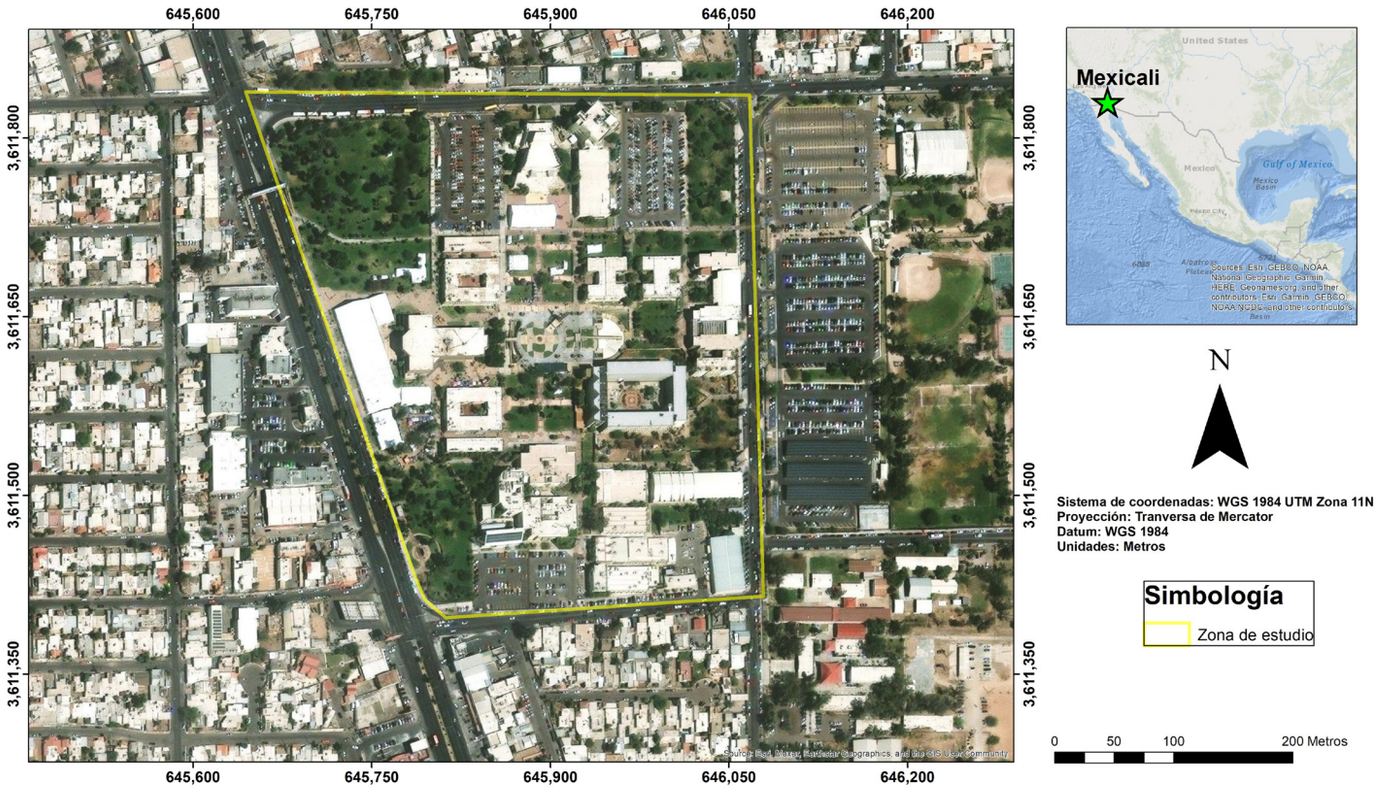


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

maleza de manera más precisa en comparación a otros índices.

También, Lee & Yu (2019), realizaron una investigación para proponer un método para la detección automática de árboles con poca salud y muertos, en el que, se utilizó el NGRDI como índice de salud de vegetación, obteniendo resultados con un nivel de confianza superior al 80 % en la detección de árboles muertos, lo que demuestra que el NGRDI también es un índice que indica la salud de la vegetación.

Por ello, el presente estudio tiene como objetivo analizar la relación entre la temperatura superficial terrestre (LST) y las condiciones de la vegetación mediante el índice NGRDI en el campus universitario. A partir de esta relación, se busca identificar áreas con alto estrés térmico y bajo desempeño vegetal, con el fin de aportar criterios para la planificación, diseño y gestión de infraestructura verde orientada a la mitigación de alta LST y la mejora del confort térmico.

ZONA DE ESTUDIO

La unidad central de la Universidad Autónoma de Baja California, campus Mexicali se encuentra ubicada en la ciudad de Mexicali, Baja California, México, con coordenadas UTM 645893 Este y 3611631 Norte en el sistema de coordenadas WGS84 zona 11N, (Figura 1). El campus cuenta con una extensión de aproximadamente de 14.4 Ha, de las que el 24 % corresponde a áreas verdes (4.3 Ha), sin contemplar pequeñas áreas como jardineras. Este sitio cuenta con extensiones de áreas verdes claves para el bienestar ambiental, que aportan sombra, a la comunidad universitaria (Gutiérrez Boneo, 2025), sin embargo, las condiciones climatológicas de la ciudad pueden limitar el estado de salud de la vegetación, al reducir su capacidad en la disminución de la LST.

CLIMA DE LA CIUDAD Y PROBLEMATICAS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL

La ciudad se caracteriza por tener un clima desértico cálido, al presentar temperatura promedios entre los 41°-42° C entre los meses de julio y agosto (Ayuntamiento de Mexicali, 2024), sin embargo, dentro de los periodos de la canícula, las temperaturas pueden superar los 50° C, siendo de 52. 7° C la temperatura más alta registrada históricamente en la ciudad el 7 de agosto de 2025 (Heras, 2025), convirtiéndola en la ciudad con la mayor temperatura registrada en México y siendo una de las ciudades más calurosas del mundo. Además de las características climatológicas de la región, el crecimiento avanzado de infraestructura gris contribuye en el aumento de temperatura de la superficie lo que aumenta el efecto de ICU (Yang et al., 2021).

El Ayuntamiento de Mexicali estableció el marco normativo local mediante el Reglamento de áreas verdes para el municipio de Mexicali (Ayuntamiento

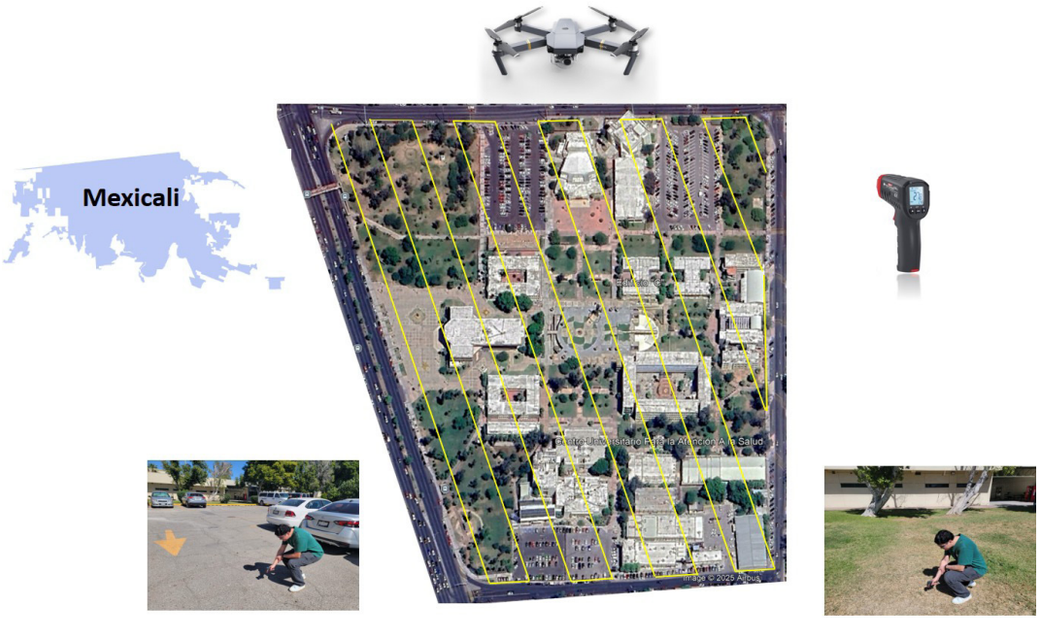


Figura 2. Metodología de trabajo. Fuente: Elaboración de los autores.

de Mexicali, 2005). En su diseño original, el Artículo 11 estipulaba que la construcción de centros comerciales y obras con estacionamiento al aire libre para más de nueve automóviles requería la plantación de un árbol por cada seis cajones. Sin embargo, tras la reforma publicada en el Periódico Oficial del Estado de Baja California en 2015, dicha exigencia se duplicó a un árbol por cada tres cajones de estacionamiento, facultando a la autoridad a negar los permisos de construcción correspondientes en caso de incumplimiento (Ayuntamiento de Mexicali, 2005; reformado en 2015). A pesar de la existencia de este mecanismo punitivo, la mayoría de los estacionamientos en plazas comerciales y espacios públicos exhiben un desacato a la norma. Como consecuencia, estas superficies quedan expuestas directamente a la radiación solar, lo que intensifica el efecto de isla de calor microurbana y eleva el estrés térmico de los usuarios.

No obstante, estas regulaciones solo establecen la plantación de árboles, sin embargo, no incorpora criterios que contribuyan eficientemente en la disminución de la temperatura e ICU.

METODOLOGÍA

De manera general, el presente proyecto se desarrolló en tres etapas metodológicas (Figura 2). En la primera, se generó una imagen de alta resolución (ortomosaico) mediante el uso de un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) para el cálculo del Índice de Diferencia Normalizada Rojo-Verde (NGRDI) y la caracterización espacial de la condición vegetal dentro del campus universitario. En la segunda etapa, se obtuvieron datos de temperatura superficial del suelo (LST) mediante mediciones in situ con termómetros infrarrojos, siguiendo un protocolo estandarizado para garantizar la consistencia de los registros. Finalmente, ambas variables fueron integradas en un entorno de análisis geoespacial para evaluar su relación y grado de correlación, permitiendo identificar patrones espaciales asociados al estrés térmico y al desempeño vegetal.

VUELO FOTOGRAMÉTRICO MEDIANTE EL USO DE VANT

El vuelo fotogramétrico se realizó al utilizar un VANT marca DJI, modelo Mavic Pro y el uso de la aplicación DroneDeploy. Para la configuración del plan de vuelo, cuyos parámetros empleados se muestran en la tabla 1, con el objetivo de obtener una imagen de alta resolución (ortomosaico) del campus universitario utilizándose el programa Agisoft Metashape versión 1.8.0 y con este insumo, también calcular el NGRDI.

Tabla 1. Parámetros de configuración de vuelo fotogramétrico. Fuente: Elaboración de los autores.

Configuración de vuelo fotogramétrico	
Superficie de vuelo	15 hectáreas
Tiempo de vuelo	13:55 minutos
Altura de vuelo	80 metros
Ángulo de posición de cámara	90°
Porcentaje de traslape entre fotografías	80%

CÁLCULO DE NGRDI

Para el cálculo de NGRDI, se realizó una composición de las bandas verde y roja derivadas del vuelo fotogramétrico, utilizándose la siguiente ecuación (Ecuación 1).

$$NRGDI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED} \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

Para realizar esta composición de bandas, se utilizó el programa ArcGIS versión 10.5 y su herramienta Raster Calculator. De acuerdo con la literatura el resultado de esta composición de bandas el índice NGRDI presenta rangos entre -1 y 1, cuyos valores negativos se relacionan a superficies sin cobertura vegetal y cuerpos de agua, mientras que valores cercanos a 0 indican suelos desnudos o salud vegetal deficiente. Por otra parte, valores positivos cercanos a 1 indican vegetación densa y saludable (Jannoura et al., 2015).

ADQUISICIÓN DE DATOS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL

Para la adquisición de datos de temperatura superficial, se realizó un levantamiento in situ, se utilizaron termómetros infrarrojos marca UNI-T modelo UT306S, se realizaron mediciones a una distancia de 0.10 m con respecto a la superficie, que abarcó la superficie total de campus universitarios y sus diversas coberturas de suelo con la finalidad de garantizar adquisición de datos precisos, para generar una superficie de temperatura tipo raster utilizándose el programa ArcGIS versión 10.5. La actividad de adquisición de datos se llevó a cabo el día 12 de mayo del 2025, entre las horas 1:15pm-2:15pm.

EVALUACION DE CORRELACIÓN ENTRE NGRDI Y TEMPERATURA SUPERFICIAL.

Para evaluar la relación estadística entre las variables de NGRDI y temperatura superficial, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (r). Este coeficiente cuantifica la relación lineal continua entre dos variables numéricas y es utilizado comúnmente en estudios de percepción remota (Rahimi et al., 2025).

El coeficiente de Pearson se calcula mediante la siguiente expresión (Ecuación 2):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \qquad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:
r: Coeficiente de correlación de Pearson.
xi: Corresponde a los valores de NGRDI.
yi: Corresponde a los de la temperatura superficial.
$\bar{x}$ y $\bar{y}$: Representan las medias de cada variable.
n: Número total de observaciones.

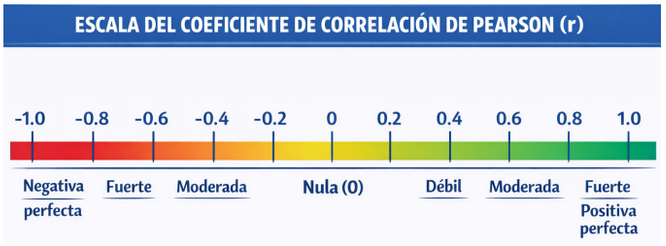


Figura 3. Escala de coeficiente de correlación de Pearson (r). Fuente: Elaboración de los autores.

Los valores del coeficiente r oscilan entre -1 y 1 (Figura 3).

Para el caso de estudio, los valores negativos indican una relación inversa, es decir, a mayor salud de la vegetación (mayor NGRDI), menor temperatura superficial, mientras que valores positivos indican una relación directa. Otra variable considerada en el análisis fue el coeficiente de determinación (R^2), que corresponde al cuadrado del coeficiente de correlación r y representa la proporción de la varianza de la variable dependiente explicada por la variable independiente (Duke University, 2002). En este estudio, la variable dependiente corresponde a la temperatura superficial, mientras que la variable independiente es el índice NGRDI.

RESULTADOS

VUELO FOTOGRAMÉTRICO Y GENERACIÓN DE ORTOMOSAICO

Se obtuvieron y procesaron un total de 297 imágenes aéreas del campus universitario a una altura de vuelo de 70m sobre el nivel de suelo y un traslape ente fotografías del 80%, y mediante el uso del programa Agisoft Metashape, se generó un ortomosaico con una resolución espacial de 5cm/pixel (Figura 4), con esta imagen, se identifica con mayor claridad los diversos materiales que se encuentran en la superficie del campus.

EVALUACIÓN DE SALUD DE VEGETACIÓN POR NGRDI

Mediante la composición de las bandas espectrales RGB se pudo determinar el estado de salud de la vegetación dentro del campus universitario, demostrado en valores de -0.33 a 0.24, donde los valores negativos representan vegetación en malas condiciones y valores positivos representan vegetación más saludable (Figura 5).

Dentro de las áreas verdes del campus se identificaron zonas con valores negativos de NGRDI, principalmente asociadas a superficies cubiertas por pasto. La validación mediante observación de campo indicó condiciones

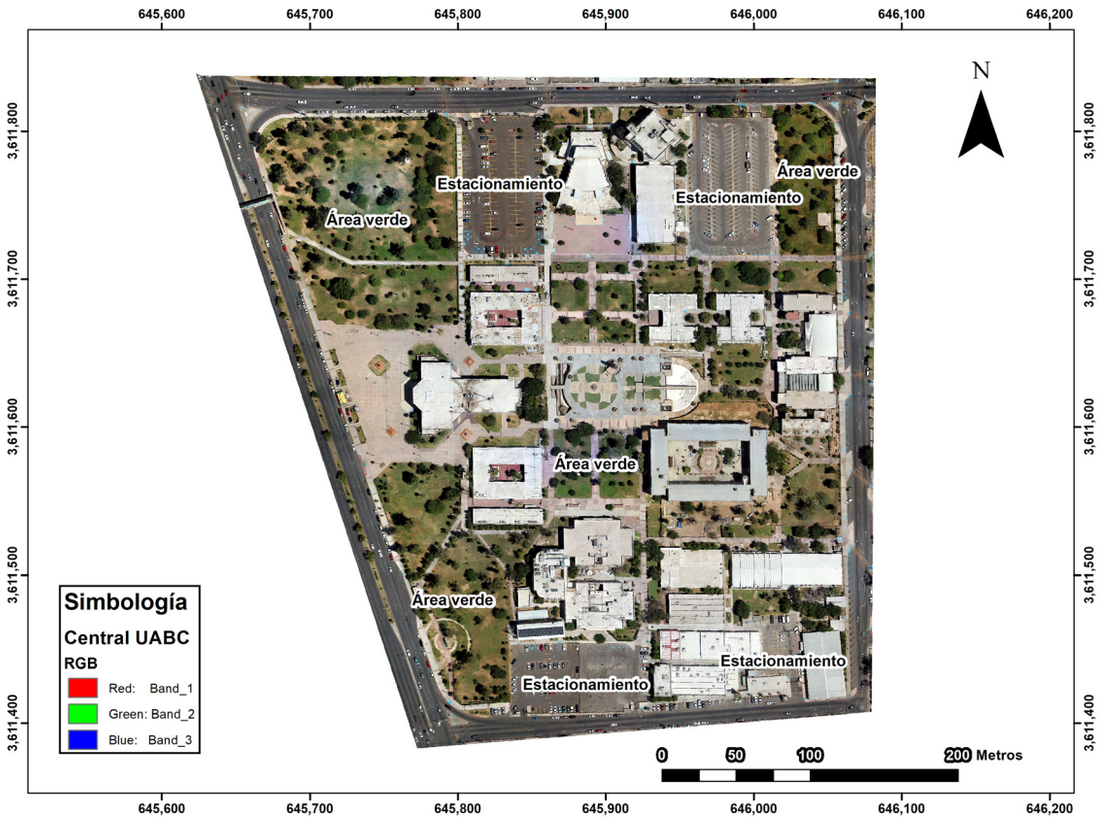


Figura 4. Ortomosaico del campus universitario, resolución espacial de 5cm/pixel. Fuente: Elaboración de los autores.

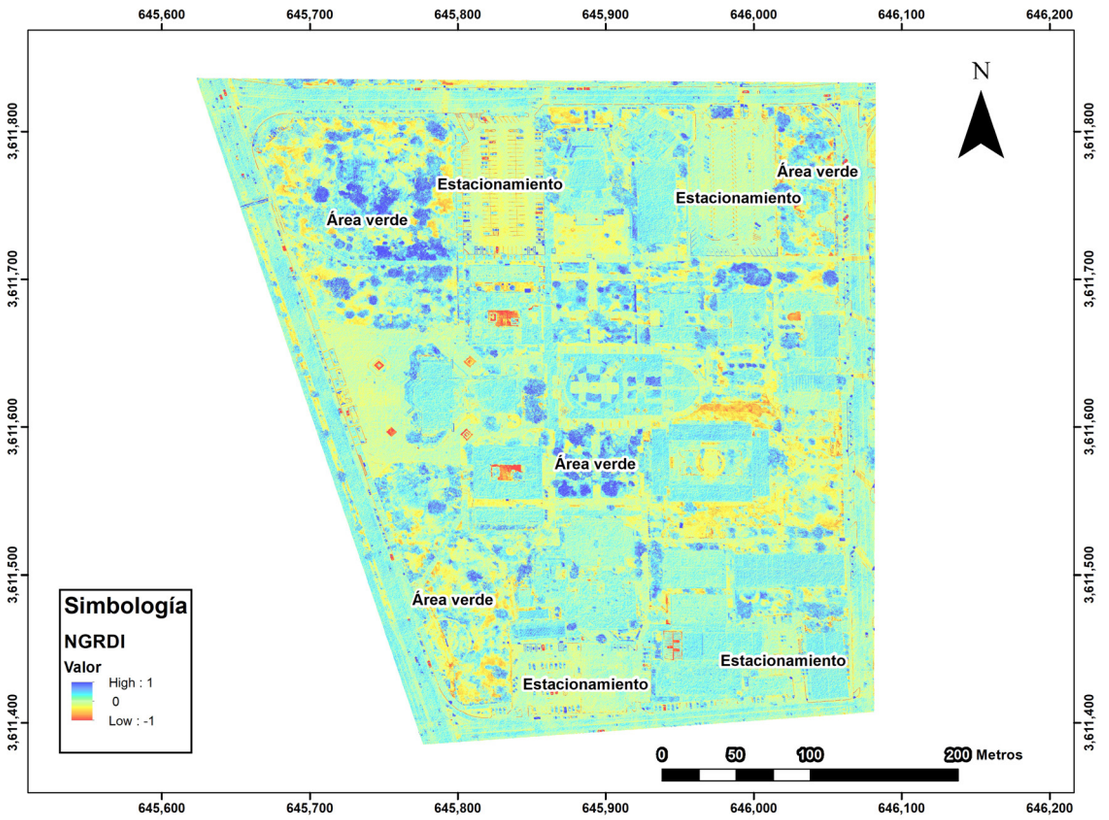


Figura 5. Mapa de NGRDI del campus universitario. Fuente: Elaboración autores.

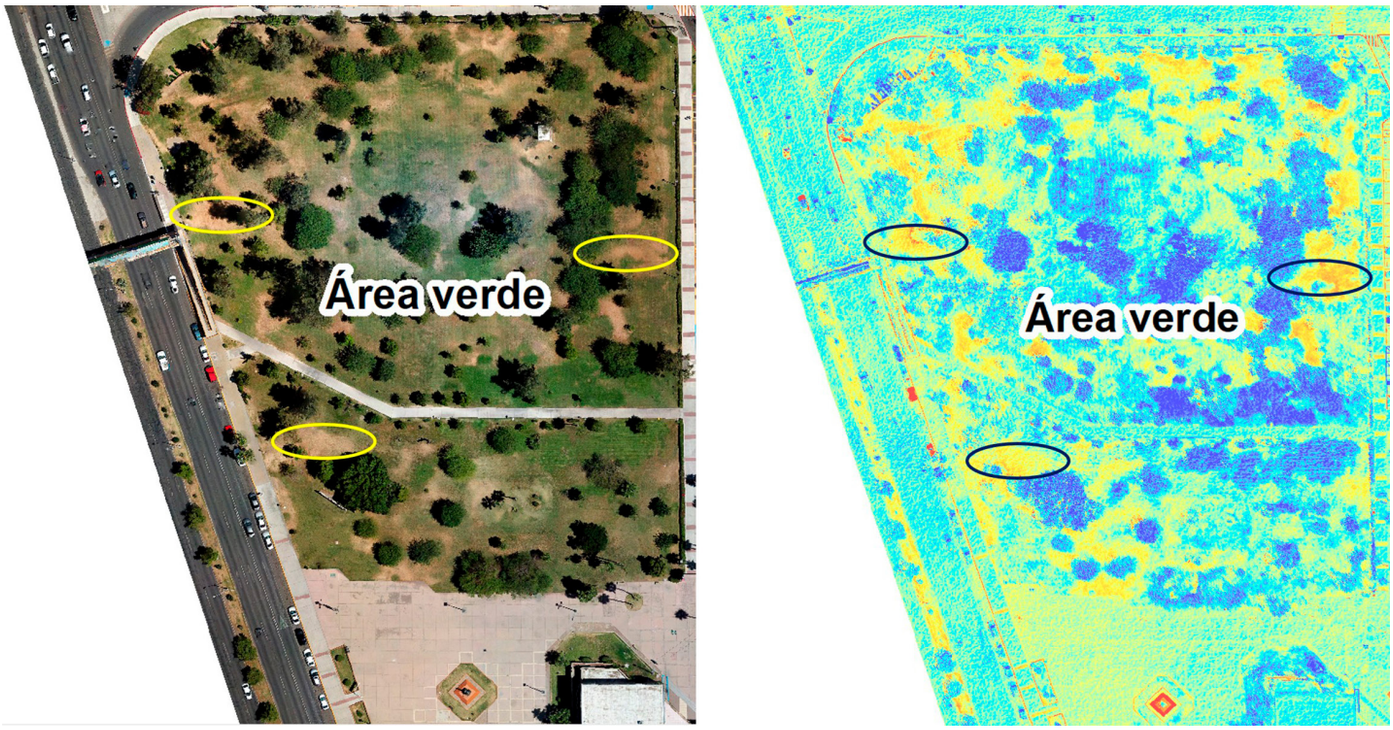


Figura 6. Ejemplo de NGRDI negativo en vegetación y verificación visual. Fuente: Elaboración de los autores.

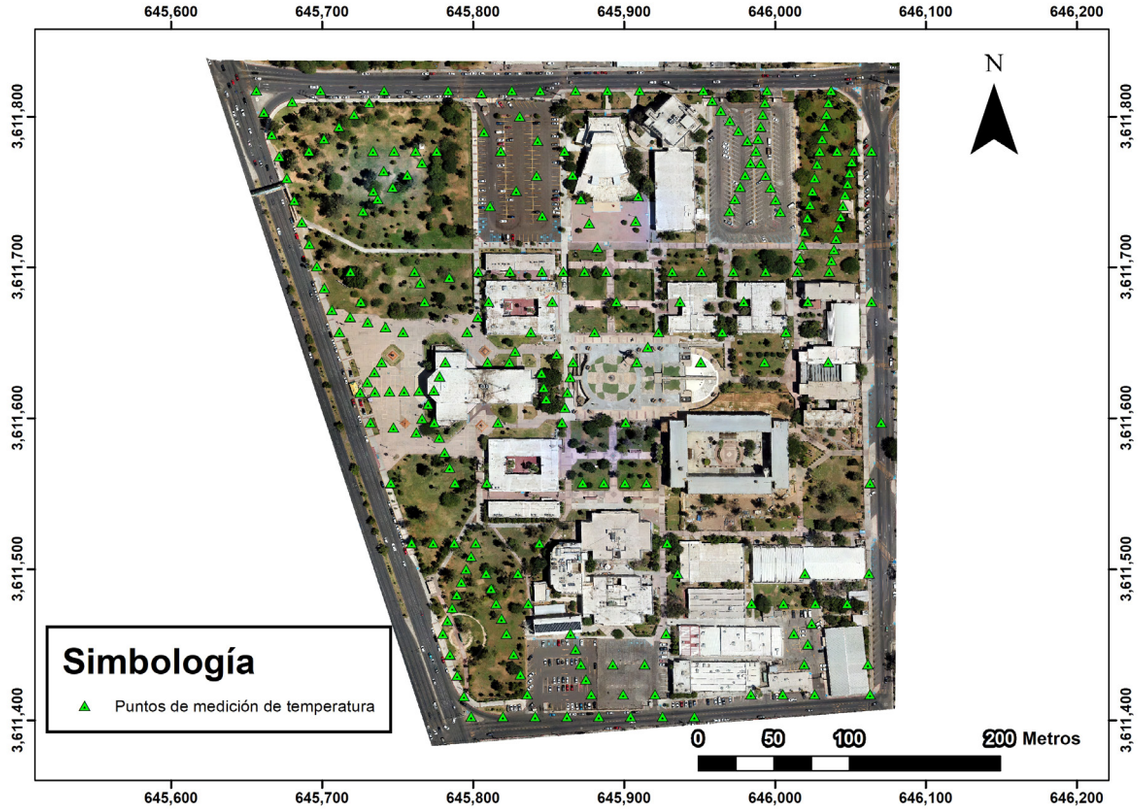


Figura 7. Distribución de puntos de medición de temperatura. Fuente: Elaboración de los autores..

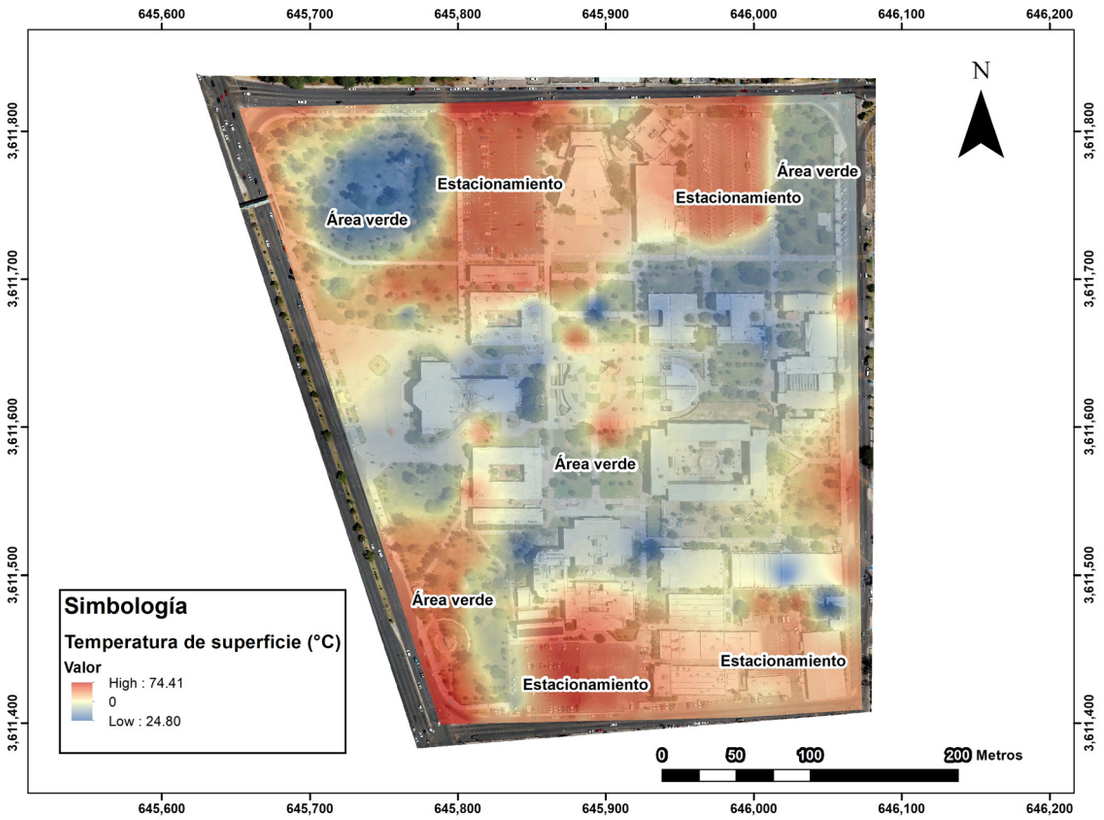


Figura 8. Mapa de temperaturas superficiales generado mediante los datos adquirido el día 15 de mayo de 2025. Fuente: Elaboración de los autores.

de bajo vigor vegetativo en estas áreas. Estas áreas presentaron temperaturas superficiales relativamente más altas en comparación con aquellas dominadas por cobertura arbórea. La coincidencia espacial entre valores negativos de NGRDI y mayores temperaturas superficiales sugiere un menor vigor vegetativo y una limitada capacidad de estas superficies para contribuir a la mitigación térmica (Figura 6).

GENERACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE

Se obtuvieron un total de 246 puntos de temperatura superficial del campus universitario (Figura 7), cuyos datos fueron utilizados para generar una superficie raster de temperatura superficial, asimismo, se utilizó el método de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW por sus siglas de inglés), obteniendo como resultado una superficie cuyos valores mínimos de temperatura rondaban los 24.8°C y máximos de 72.4°C, tal como se muestra en la Figura 8.

Los valores mínimos de temperatura se presentaron dentro de las áreas verdes, específicamente donde se encontraban las sombras de los árboles, se obtuvieron diferencias de temperatura entre 5°C y 6°C en comparación a las áreas verdes que se encontraban expuestas directamente a la luz solar, lo que reafirma la importancia de los árboles para la mitigación a las altas temperaturas, especialmente en ubicaciones geográficas de climas áridos y semi áridos.

Si bien, el método IDW es utilizado en análisis espacial y ha sido considerado como un método efectivo para la interpolación de temperatura (Lau & Hsu, 2025), su precisión depende fuertemente de la distribución espacial de los puntos de muestreo, pudiendo presentarse resultados imprecisos cuando éstos son irregulares, especialmente en contextos ambientales donde la densidad de datos es heterogénea (Ohlert et al., 2023). Además, los valores extremos de la superficie interpolada se restringen en los puntos medidos, lo que limita la detección de máximos y mínimos reales (Longley et al., 2005). Para el caso de estudio, la heterogeneidad de los puntos se vio limitada debido a la complicación de acceso a zonas del campus universitario y presencia de elementos que dificultaban la adquisición de datos.

CORRELACIÓN ENTRE NGRDI Y SUPERFICIE DE TEMPERATURA

El coeficiente de correlación de Pearson (r) entre el NGRDI y la temperatura superficial fue de −0.122, lo que indica una relación inversa débil entre la presencia de vegetación y la temperatura de la superficie. Aunque la vegetación contribuye a la reducción de la temperatura superficial, los resultados sugieren que su influencia

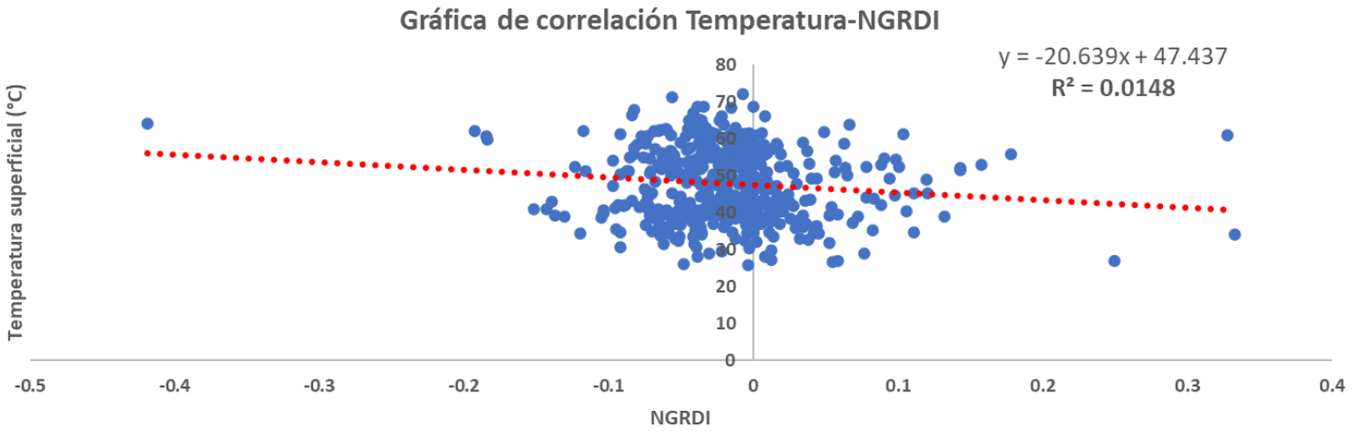


Figura 9. Análisis comparativo de la correlación entre la temperatura superficial y NGRDI. Fuente: Elaboración de los autores.

no es un factor dominante para explicar la variabilidad térmica dentro del campus universitario. El coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.0148 (Figura 9), lo que indica que únicamente el 1.48% de la variabilidad térmica observada puede ser explicado por las variaciones en el NGRDI.

Diversos estudios han documentado una relación negativa entre los índices de vegetación, como el NGRDI, y la temperatura de la superficie terrestre (Anand et al., 2025; Dheeraj et al., 2025). Este comportamiento se explica principalmente por los efectos de sombreado de los árboles y los procesos de evapotranspiración, los que influyen en la regulación del almacenamiento térmico de la superficie (Yin et al., 2024). No obstante, en el área de estudio se observa una correlación débil entre ambas variables. Este resultado podría estar asociado con la elevada cobertura de superficies impermeables, como asfalto y concreto., así como con la presencia de vegetación con bajo vigor y áreas de suelo desnudo. Adicionalmente, las condiciones climáticas semi áridas características de la región pueden limitar la capacidad de la vegetación para inducir procesos efectivos de enfriamiento ambiental (Dashti & Khajah, 2024).

DISCUSIÓN

Un hallazgo relevante de esta investigación es la identificación de zonas con bajo desempeño vegetal y alto estrés térmico dentro del campus universitario, particularmente en las áreas suroeste y centro-este, donde se registraron valores negativos de NGRDI cercanos a −1, asociados a vegetación en condiciones deficientes o ausente. Estas zonas coinciden espacialmente con superficies dominadas por materiales impermeables, como estacionamientos, los que presentaron las temperaturas superficiales más elevadas, que alcanzaron hasta 71.4 °C. Este comportamiento evidencia el papel determinante de la infraestructura gris en la acumulación de calor, influenciado además por propiedades como el albedo, que regula la absorción de radiación solar y contribuye al incremento de la temperatura superficial. En este contexto, diversos estudios (Franco et al., 2025; Zhao et al., 2025) han señalado que la implementación de superficies permeables en combinación con cobertura vegetal favorece la disipación de la energía térmica mediante procesos evaporativos y de evapotranspiración. Sin embargo, los resultados obtenidos también ponen de manifiesto que no toda la vegetación contribuye de manera efectiva al enfriamiento superficial. En entornos áridos como Mexicali, existe una disyuntiva entre la conservación del agua y la eficiencia térmica, ya que, aunque los programas de reforestación y normativas locales priorizan el uso de especies endémicas (Ayuntamiento de Mexicali, 2020), estas presentan adaptaciones fisiológicas orientadas a la reducción de la pérdida hídrica, lo que limita sus tasas de evapotranspiración y, por ende, su capacidad de enfriamiento. En consecuencia, la planificación de la infraestructura verde no debería centrarse únicamente en la incorporación de vegetación nativa, sino en una selección funcional que considere su desempeño térmico. Se propone, por tanto, priorizar especies que, dentro de la paleta vegetal permitida, presenten mayor eficiencia en el enfriamiento, con el fin de optimizar el equilibrio entre eficiencia hídrica y capacidad de mitigación térmica. Este enfoque permitiría transitar de una visión convencional de reforestación hacia una estrategia de diseño climático, orientada a responder simultáneamente al estrés hídrico y a las condiciones extremas de temperatura identificadas en el área de estudio.

CONCLUSIONES

Este estudio caracterizó el entorno térmico del campus de la UABC en Mexicali consideró variables como uso de suelo, materiales de superficie, temperatura superficial

y estado de la vegetación. Los resultados permitieron identificar patrones espaciales del comportamiento térmico dentro del campus y su interacción con el entorno urbano. Las temperaturas superficiales más elevadas se registraron en superficies impermeables, particularmente en concreto y asfalto, mientras que los valores más bajos se observaron en áreas verdes, especialmente bajo la sombra de los árboles. No obstante, aunque las zonas verdes mostraron una tendencia general de enfriamiento superficial, se identificaron áreas donde la vegetación no contribuyó significativamente a la reducción térmica, principalmente en zonas con césped deteriorado y bajos valores del índice NGRDI. Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado en la literatura, donde la falta de cobertura vegetal, salud deficiente de la vegetación y el incremento de infraestructura gris, incrementan la absorción del calor y reduce la capacidad de enfriamiento del entorno.

La tendencia es la esperada, sin embargo, la relación es débil debido a la salud y la configuración del espacio vegetal, por lo que una de las áreas de oportunidad seria intervenir en las zonas de baja salud con IV para subsanar el déficit de enfriamiento que aportan estas áreas actualmente.

Con respecto a la vegetación, el sombreado de los árboles es uno de los factores más importantes para el enfriamiento urbano, ya que disminuye la temperatura superficial entre 5 y 6 °C, que muestran mejores resultados en comparación con el césped, donde se identificaron sitios con bajo vigor. No obstante, la disponibilidad de agua y las condiciones climatológicas, como la temperatura y la radiación solar, condicionan la capacidad de enfriamiento de los árboles; por ende, se debe planificar estratégicamente la IV, al priorizar factores como la plantación de árboles endémicos de la región que presenten las mayores tasas de evapotranspiración. Por ello, es recomendable realizar estudios sobre las capacidades de enfriamiento de la vegetación endémica de estas regiones y, a su vez, desarrollar estudios enfocados en las implicaciones de diseño y gestión de la IV, que contemplen variables como la cobertura y uso de suelo, las propiedades de los materiales y las simulaciones de microclima. Esto permitirá determinar variables de confort térmico, las que describen el estado físico y el bienestar psicológico que experimenta el individuo en su entorno, contribuyendo así a mejorar su calidad de vida.

LIMITACIONES

El presente estudio se basa en un análisis térmico realizado en un momento específico del tiempo, lo que limita la evaluación de la variabilidad estacional de la temperatura superficial. No obstante, el levantamiento de información se realizó durante el mes de mayo de 2025, período en el que la ciudad de Mexicali presenta condiciones térmicas elevadas que pueden superar los 40 °C, permitiendo caracterizar el comportamiento térmico del campus bajo condiciones de calor significativo. Es posible que durante los períodos de mayor intensidad térmica del verano las temperaturas superficiales sean aún más elevadas. Asimismo, las condiciones climáticas semi áridas pueden generar estrés hídrico en la vegetación, lo que podría influir en su capacidad de enfriamiento. En este sentido, futuros estudios podrían incorporar análisis temporales más amplios para comprender con mayor detalle la dinámica térmica y el papel de la vegetación en la mitigación de la isla de calor urbana.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, C.S.B.; Curación de datos, J.M.R.G, J.A.S.R.; Análisis formal, C.S.B., J.M.R.G.; Investigación, W.A.R.; Metodología, W.A.R., C.S.B.; Software. W.A.R., J.M.R.G., J.A.S.R; Validación, J.M.R.G., J.A.S.R.; Visualización, M.A.L.B.; Escritura – borrador original, W.A.R., C.S.B.; Escritura – revisión y edición, C.S. B, M.A.L.B.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada para la formación académica de uno de los autores. Esta investigación no contó con ningún otro financiamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anand, V., Kaur, S., Rajput, V. D., Minkina, T., Mandzhieva, S., Kumar, S., Sharma, A., & Kumar, S. (2025). Analyzing the spatial relationship between land surface temperature and normalized difference vegetation index using remote sensing and GIS. *Discover Geoscience*, *3*(1), 65. https://doi.org/10.1007/s44288-025-00167-w

Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, *23*(1), 1–26. https://doi.org/10.1002/joc.859

Ayuntamiento de Mexicali. (2005). *Reglamento de áreas verdes para el municipio de Mexicali, Baja California*. Gobierno Municipal de Mexicali. https://www.ordenjuridico.gob.mx/Estatal/BAJA%20CALIFORNIA/Municipios/Mexicali/REG01.pdf

Ayuntamiento de Mexicali. (2020). *Guía de forestación para el municipio de Mexicali, baja California*. Gobierno Municipal de Mexicali. https://www.scribd.com/document/610318541/2021-Guia-Municipal-de-Forestacion-para-el-Municipio-de-Mexicali-2021

Ayuntamiento de Mexicali. (2024). *Atlas de Riesgos del Municipio de Mexicali, B.C. [Actualización 2023].* Universidad Autónoma de Baja California [UABC]. Unidad Municipal de Protección Civil. http://www.mexicali.gob.mx/transparencia/administracion/atlas/pdf/0.pdf

Dashti, A., & Khajah, M. (2024). Urban green areas and their impact on land surface temperature in semi-arid environments: a case study in Kuwait. *GeoJournal*, *89*, 86. https://doi.org/10.1007/s10708-024-11079-6

Declet-Barreto, J., Brazel, A. J., Martin, C. A., Chow, W. T., & Harlan, S. L. (2013). Creating the park cool island in an inner-city neighborhood: heat mitigation strategy for Phoenix, AZ. *Urban Ecosystems*, 16(3), 617-635. https://doi.org/10.1007/s11252-012-0278-8

Dheeraj, V. P., Rai, A. K., Yadav, A. K., Sonkar, S., Maurya, A., Chaudhary, A., & Chaudhary, P. (2025). Spatiotemporal analysis and correlation of surface temperature, vegetation cover, and water index using remote sensing and GIS techniques in Ambedkar Nagar, India. *Discover Environment*, 3(1), 232. https://doi.org/10.1007/s44274-025-00438-w

Duke University. (2002). *STA102: Correlation and regression – The coefficient of determination*. Department of Statistical Science, Duke University.

Jannoura, R., Brinkmann, K., Uteau, D., Bruns, C., & Joergensen, R. G. (2015). Monitoring of crop biomass using true colour aerial photographs taken from a remote controlled hexacopter. *Biosystems Engineering*, 129, 341-351. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.11.007

Franco, E., Ghisi, E., Vaz, I. C. M., & Thives, L. P. (2025). Permeable Pavements: An Integrative Review of Technical and Environmental Contributions to Sustainable Cities. *Water*, *17*(22), 3323. https://doi.org/10.3390/w17223323

Gutiérrez Boneo, M. M. (10 de junio de 2025). *El cuidado de áreas verdes: Clave para el bienestar ambiental*. Gaceta UABC. Universidad Autónoma de Baja California. https://gaceta.uabc.mx/el-cuidado-de-areas-verdes-clave-para-el-bienestar-ambiental

Garzón, J., Molina Sánchez, I., & Jiménez Cleves, G. (2024). Evaluación del fenómeno de la isla de calor urbano en Cartago, Colombia: tendencias de factores ambientales en los últimos 20 años. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI*. https://doi.org/10.26507/paper.3712

Heras, A. (8 de agosto de 2025). *Mexicali, BC, rompe récord de temperatura con 52.7 grados Celsius.* La Jornada. https://www.jornada.com.mx/noticia/2025/08/08/estados/mexicali-bc-rompe-record-de-temperatura-con-527-grados-celsius

Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, *32*(1), 1-6. https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1

Krishnan, P., Meyers, T. P., Hook, S. J., Heuer, M., Senn, D., & Dumas, E. J. (2020). Intercomparison of in situ sensors for ground-based land surface temperature measurements. *Sensors*, 20(18), 5268. https://doi.org/10.3390/s20185268

Lau, T.-K., & Hsu, H.-C. (2025). Urban Heat Island Effect and Unequal Temperature-Related News Attention in Taiwan's Major Cities. *Urban Science*, *9*(10), 417. https://doi.org/10.3390/urbansci9100417

Lee, S., & Yu, B.-H. (2019). Automatic detection of dead tree from UAV imagery. *Coordinates, 15*(4), 36-39. https://mycoordinates.org/pdf/apr19.pdf

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2005). *Geographical information systems and science*. John Wiley & Sons.

Macedo, F. L., Nóbrega, H., de Freitas, J. G., & Pinheiro de Carvalho, M. A. A. (2025). Assessment of vegetation indices derived from UAV imagery for weed detection in vineyards. *Remote Sensing*, *17*(11), 1899. https://doi.org/10.3390/rs17111899

Mandjoupa, L. K., Behera, P., Roman, K. K., Azam, H., & Denis, M. (2025). Street-Level Sensing for Assessing Urban Microclimate (UMC) and Urban Heat Island (UHI) Effects on Air Quality. *Environments, 12*(6), 184. https://doi.org/10.3390/environments12060184

Ohlert, P. L., Bach, M., & Breuer, L. (2023). Accuracy assessment of inverse distance weighting interpolation of groundwater nitrate concentrations in Bavaria (Germany). *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(4), 9445-9455. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22670-0

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108*(455), 1–24. https://doi.org/10.1002/qj.49710845502

Rahimi, E., Dong, P., & Jung, C. (2025). Global NDVI-LST correlation: Temporal and spatial patterns from 2000 to 2024. *Environments*, *12*(2), 67. https://doi.org/10.3390/environments12020067

Rony, M. K. K., & Alamgir, H. M. (2023). High temperatures on mental health: Recognizing the association and the need for proactive strategies—A perspective. *Health Science Reports,* 6(12), e1729. https://doi.org/10.1002/hsr2.1729

Schwarz, N., Schlink, U., Franck, U., & Großmann, K. (2012). Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators—An application for the city of Leipzig (Germany). *Ecological indicators*, *18*, 693-704. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.01.001

Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy Buildings* 31(3), 221-235. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00018-3

Speak, A. (2015). 12-Influence of vegetation damage on urban cooling effects in F. Pacheco-Torgal, J.A. Labrincha, L.F. Cabeza, C.-G. Granqvist (Eds.), E*co-Efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs* (pp. 325-347). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-380-5.00012-1

Stamford, J. D., Vialet-Chabrand, S., Cameron, I., & Lawson, T. (2023). Development of an accurate low cost NDVI imaging system for assessing plant health. *Plant Methods, 19*(1), 9. https://doi.org/10.1186/s13007-023-00981-8

Stewart, I. D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31(2), 200–217. https://doi.org/10.1002/joc.2141

United Nations. (16 de mayo de 2018). *2018 Revision of World Urbanization Prospects*. United Nations, Department of Economic and Social Affairrs. https://www.un.org/en/desa/2018-revision-world-urbanization-prospects

Valavanidis, A. (2024). *Half of the Global Population Lives in MegaCities. Megacities are hotspots for slums, GHG emissions, toxic air pollution, climate change, deteriorating water and soil quality.* https://www.researchgate.net/publication/379655450_Half_of_the_Global_Population_Lives_in_MegaCities_Megacities_are_hotspots_for_slums_GHG_emissions_toxic_air_pollution_climate_change_deteriorating_water_and_soil_quality

Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment,* 86(3), 370-384. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8

Wu, B., Zhang, Y., Wang, Y., He, Y., Wang, J., Wu, Y., Lin, X., & Wu, S. (2024). Mitigation of urban heat island in China (2000–2020) through vegetation-induced cooling. *Sustainable Cities and Society*, 112, 105599. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105599

Yahia, M. W., & Johansson, E. (2014). Landscape interventions in improving thermal comfort in the hot dry city of Damascus, Syria—The example of residential spaces with detached buildings. *Landscape and Urban Planning*, 125, 1-16. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.014

Yang, J., Ren, J., Sun, D., Xiao, X., Xia, J. C., Jin, C., & Li, X. (2021). Understanding land surface temperature impact factors based on local climate zones. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102818. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102818

Yin, Y., Li, S., Xing, X., Zhou, X., Kang, Y., Hu, Q., & Li, Y. (2024). Cooling benefits of urban tree canopy: A systematic review. *Sustainability,* 16(12), 4955. https://doi.org/10.3390/su16124955

Zhao, J., Lu, J., Ge, J., Fan, Y., Wang, H., Gu, M., Xue, Y., Zhao, Y., Lv, G., Lin, H., Zhao, K., & Luo, X. (2025). Influences of permeable pavements with different hydraulic properties on evaporative cooling and outdoor thermal environment: Field experiments. *Building and Environment*, 270, 112525. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112525

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 24 - 41
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.02

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PASIVO DE DESHUMIDIFICACIÓN BASADO EN LA TECNOLOGÍA DEL ATRAPANIEBLAS EN VILLA MARÍA DEL TRIUNFO – LIMA, PERÚ

Recibido 08/12/2025
Aceptado 19/05/2026

IMPLEMENTATION OF A PASSIVE DEHUMIDIFICATION SYSTEM BASED ON FOG CATCHER TECHNOLOGY IN VILLA MARÍA DEL TRIUNFO – LIMA, PERÚ

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA PASSIVO DE DESUMIDIFICAÇÃO BASEADO EM TECNOLOGIA DE CAPTURA DE NÉVOA EM VILLA MARÍA DEL TRIUNFO – LIMA, PERÚ

Milagros Delgado-Peña
Arquitecta
Egresada Carrera de Arquitectura, Facultad de Ingeniería
Universidad Tecnológica del Perú
Lima, Perú
https://orcid.org/0009-0004-4678-0919
U17205052@utp.edu.pe

Alonzo Cardenas-Vera-Pinto (Autor de Correspondencia)
Arquitecto
Egresado Carrera de Arquitectura, Facultad de Ingeniería
Universidad Tecnológica del Perú
Lima, Perú
https://orcid.org/0009-0006-5707-4475
U17102967@utp.edu.pe

Richard Valdivia-Sisniegas
Magíster de Estudios Avanzados en Arquitectura y Desarrollo Sostenible
Docente y Asesor del programa de Titulación, Carrera de Arquitectura
Universidad Tecnológica del Perú
Lima, Perú
https://orcid.org/0000-0003-0783-6831
C19165@utp.edu.pe

CC BY SA

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 24 - 41
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.02

RESUMEN

En Lima (Perú), las viviendas ubicadas en entornos de alta humedad relativa enfrentan condiciones desfavorables para la habitabilidad, lo que favorece la condensación superficial y el deterioro constructivo cuando la HR interior supera el 65%. En este contexto, la investigación evalúa la eficiencia del prototipo de deshumidificación pasiva DESHUME en un entorno de alta saturación hídrica, como las lomas de Villa María del Triunfo (692 m.s.n.m.), registrando condiciones de 14,04 °C y 100% de HR. La metodología cuasiexperimental in situ partió del análisis de precedentes meteorológicos (2020-2024) y de las características técnicas de los materiales. La validación se realizó mediante el monitoreo de variables higrotérmicas interiores y exteriores durante 72 h, en módulos a escala 1:2 y 1:1, incorporando en su diseño la tecnología del atrapanieblas y el efecto Venturi para la remoción de masa de agua. Lo que resulta en la reducción promedio de 0,20 g/m³ de HR interior en invierno respecto al módulo referencial, lo que demuestra al sistema como un regulador higrotérmico viable para sectores vulnerables de alta humedad.

Palabras clave
humedad, niebla, ventilación, vivienda en la costa

ABSTRACT

In Lima (Peru), homes in high-relative-humidity environments face unfavorable living conditions, with surface condensation and structural deterioration when indoor RH exceeds 65%. In this context, this research evaluates the efficiency of the DESHUME passive dehumidification prototype in a highly saturated environment, such as the hills of Villa María del Triunfo (692 meters above sea level), where temperatures reached 14.04°C, and RH was 100%. The quasi-experimental, in situ methodology was based on the analysis of meteorological records (2020-2024) and the materials' technical characteristics. Validation was carried out by monitoring indoor and outdoor hygrothermal variables for 72 hours in 1:2 and 1:1-scale modules, incorporating fog-collecting technology and the Venturi effect in their design to remove water mass. This resulted in an average reduction of 0.20g/m³ in indoor RH in winter compared to the reference module, demonstrating the system's viability as a hygrothermal regulator for vulnerable high-humidity sectors.

Keywords
humidity, fog, ventilation, coastal housing

RESUMO

Em Lima (Peru), as habitações em ambientes com alta umidade relativa enfrentam condições desfavoráveis à habitabilidade, o que favorece a condensação superficial e a deterioração estrutural quando a umidade relativa interna é superior a 65%. Neste contexto, esta pesquisa avalia a eficiência do protótipo de desumidificação passiva DESHUME em um ambiente de alta saturação hídrica: as colinas de Villa María del Triunfo (692 m acima do nível do mar), onde foram registradas temperaturas de 14,04 °C e umidade relativa de 100%. A metodologia quase experimental in situ baseou-se na análise de dados meteorológicos anteriores (2020-2024) e nas características técnicas dos materiais. A validação foi realizada por meio do monitoramento de variáveis higrotérmicas internas e externas durante 72 horas, em módulos nas escalas 1:2 e 1:1, incorporando-se ao projeto a tecnologia de coletores de névoa e o efeito Venturi para a remoção da massa de água. O resultado foi uma redução média de 0,20 g/m³ na umidade relativa do ar interna no inverno em comparação com o módulo de referência, o que demonstra que o sistema é um regulador higrotérmico viável para áreas vulneráveis com alta umidade.

Palavras-chave
umidade, névoa, ventilação, habitação em áreas costeiras

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Lima Metropolitana (Perú) se ubica en el desierto costero del oeste sudamericano, escenario donde la intersección del océano Pacífico y la Cordillera de los Andes favorece la formación del ecosistema de Lomas, debido a los bancos de nieblas que se forman en las áreas costeras. La presencia de neblina desde los 400 a 1000m.s.n.m en este entorno es responsable de la alta humedad relativa (HR) de hasta el 100% (Moat et al., 2021). Durante el invierno, de junio a septiembre, esta saturación afecta a los asentamientos urbanos consolidados en estas zonas periféricas, cuya expansión alcanzó las 1,408.32 ha entre los años 2005 y 2017 (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2021). Esta situación climática se manifiesta en el A.H. Ficus del Pedregal, Sector de José Carlos Mariátegui, Villa María del Triunfo (VMT); ubicado próximo al límite georreferenciado como punto 10 (N 8659517, E 290903) (MINAM, 2019), donde se registra una HR del 100% (SENAMHI, s.f. a). Al superar el estándar recomendado del 65% de humedad relativa en los espacios ocupados de una vivienda (American National Standards Institute [ANSI] / American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. 62.1, 2025), se propicia la proliferación de moho y bacterias, así como la degradación de la calidad del aire, lo que representa un riesgo para la salud de los habitantes al aumentar la prevalencia de afecciones respiratorias crónicas (Campos-Vásquez et al., 2025). Esta problemática del entorno, no solo afecta la habitabilidad de población debido a las condiciones meteorológicas, sino que se ve acentuada por la vulnerabilidad de la autoconstrucción, evidenciada por un predominio de materiales de baja durabilidad en las viviendas, como techos de fibra de cemento o planchas de calamina, pisos de tierra y muros de OSB o triplay (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, [MVC], s.f.). Materiales altamente higroscópicos que tienden a absorber excesivamente la humedad del ambiente. Por ende, este entorno desfavorable representa un riesgo inminente para la durabilidad de los materiales; y no garantiza un adecuado aislamiento ni confort higrotérmico (Tejeda Martínez, 2018). Frente a esta problemática, investigaciones recientes han propuesto estrategias para el control de la humedad interior mediante sistemas pasivos o híbridos; como la integración de componentes arquitectónicos innovadores como baldosas impresas en 3D (Posani et al., 2025). Asimismo, otros enfoques plantean sistemas híbridos de ventilación con recuperación de energía para la deshumidificación (Chen et al., 2023). Sin embargo, estos sistemas requieren configuraciones constructivas avanzadas, que dificultan su implementación práctica en las viviendas. En paralelo, como alternativa sustentable, la captación de agua atmosférica mediante la tecnología del atrapanieblas ha sido ampliamente estudiada en la literatura. Los modelos bidimensionales convencionales (fog nets), mediante las mallas Raschel en laderas, han demostrado altas eficiencias de recolección en ecosistemas áridos (Ismail & Go, 2021; Qadir et al., 2018). Recientemente se han explorado innovaciones geométricas, como los cilindros atrapanieblas para mayor resistencia al viento (Kanooni & Kohan, 2024) y los fog harps de hilos verticales que mejoran el drenaje (Shi et al., 2018). No obstante, pese a los avances comprobados en su rendimiento, estos dispositivos se instalan predominantemente como infraestructuras autónomas y externas al espacio habitable. Persiste, por tanto, una ausencia en la literatura respecto a la integración de esta tecnología directamente a la edificación. En consecuencia, la investigación evalúa la regulación de la humedad absoluta (HA) expresada en (g/m^3) mediante un sistema pasivo de deshumidificación que integra la tecnología del atrapanieblas y el efecto Venturi, aplicado a un módulo de vivienda típica emplazada en la zona de estudio.

METODOLOGÍA

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo experimental, con un diseño cuasi-experimental y método de evaluación comparativa in situ, orientado a un alcance descriptivo y comparativo. El objetivo del proyecto es reducir la humedad interna en una vivienda mediante la implementación de un sistema pasivo de deshumidificación. Primero se identificaron las áreas con mayor concentración de niebla, para definir la zona de estudio. Posteriormente, una vez emplazados, se utilizaron fichas de registro fotográfico para determinar las características de las viviendas. Además, se efectuó un análisis de los datos meteorológicos del periodo invernal de los últimos cinco años, así como un estudio del desempeño térmico de los materiales. De este modo, se emplearon principios de ventilación y captación, como el efecto Venturi, los captadores de viento y la tecnología del atrapanieblas. Asimismo, para determinar el rango de habitabilidad y evaluar el impacto del prototipo, los parámetros de confort higrotérmico se establecieron de acuerdo con el estándar internacional ANSI/ASHRAE 62.1-2025, al ser el instrumento normativo para la evaluación de espacios acondicionados de manera natural. En el se establece el límite de aceptabilidad de la humedad relativa interior, en 65%. De manera complementaria, el desempeño térmico de la envolvente constructiva se analizó de acuerdo con los lineamientos de la Norma Técnica Peruana EM.110. Con ello, se diseñó el modelado en AutoCAD (2D), y SketchUp (3D). Consecutivamente, la efectividad del prototipo se evaluó mediante la comparación de dos maquetas a escala 1:2, una referencial y otra intervenida con el prototipo en 1:1. La escala de los módulos se justificó por razones de viabilidad logística y rigor metodológico, estas proporciones permitieron el traslado manual, el ensamblaje en campo y un mejor control en la experimentación. Por otra parte, se mantuvo el prototipo en escala 1:1 estrictamente por las características físicas

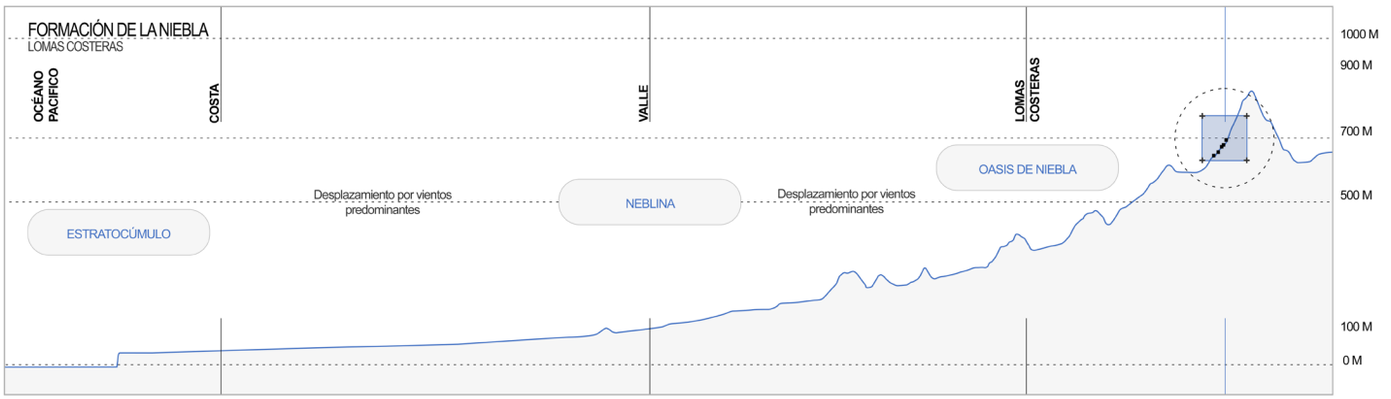


Figura 1. Formación de niebla costera. Fuente: PNUD (2018).

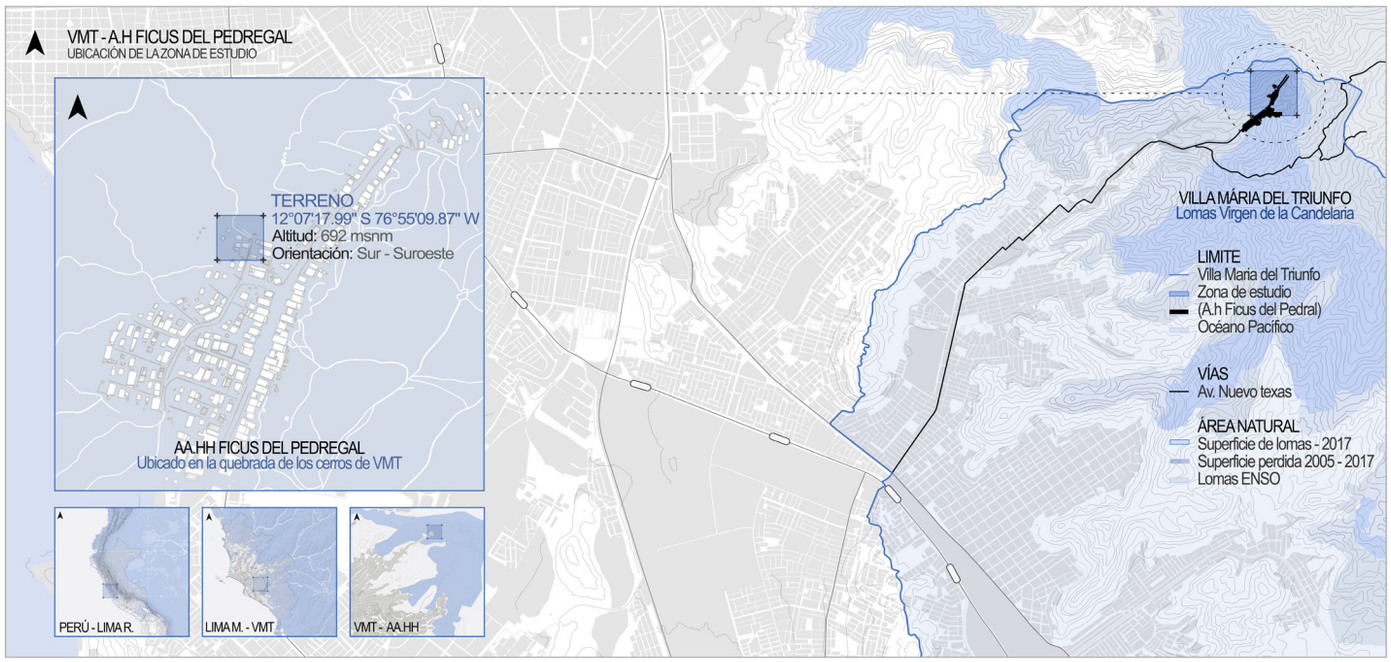


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio - A.H. Ficus del Pedregal, VMT. Fuente: Elaboración de los Autores.

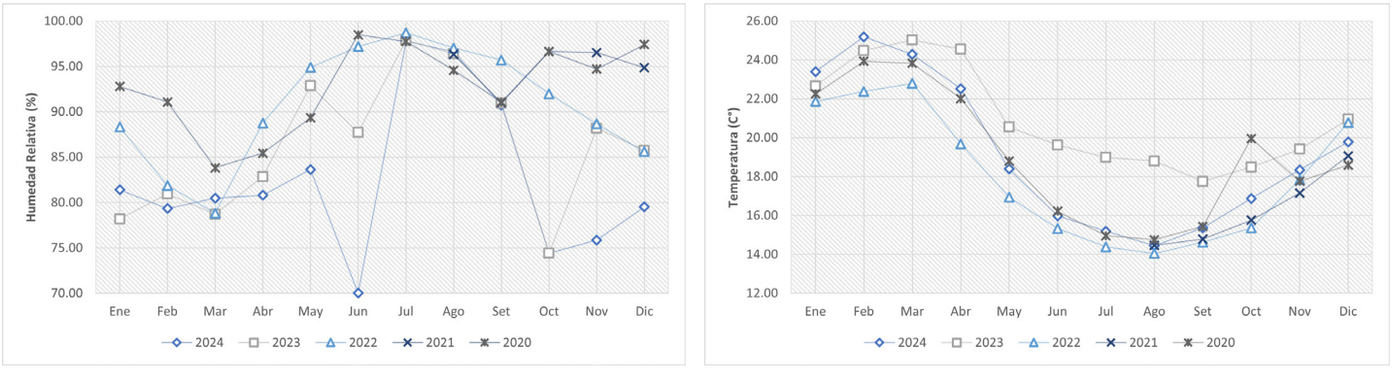
y constructivas de la malla Raschel. Posteriormente, se emplearon instrumentos de medición digitales, como higrómetros y anemómetros; para recopilar archivos CSV con los datos de HR (%), temperatura (°C) y velocidad de viento (m/s), que incidieron en las condiciones interiores de ambas maquetas. Finalmente, se aplicaron ecuaciones de cálculo higrotérmico para obtener los valores de HA (g/m^3), y determinar la eficiencia del prototipo.

FORMACIÓN DE NIEBLA COSTERA

La Corriente de Humboldt y el afloramiento de las aguas frías del océano Pacífico por la radiación, influyen en la condensación y formación de la niebla costera (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2018). Al ser transportado por los vientos del sur y suroeste hacia las estribaciones de los Andes a altitudes de 400 a 1000 msnm, que crean bancos u oasis de niebla (Moat et al., 2021) y registran porcentajes del 100% HR (SENAMHI, s.f. a) (Figura 1). La humedad entendida como la cantidad de vapor de agua presente en el aire, puede condensarse en gotas cuando alcanza la saturación (Tejeda Martínez, 2018), se expresa en humedad relativa o absoluta.

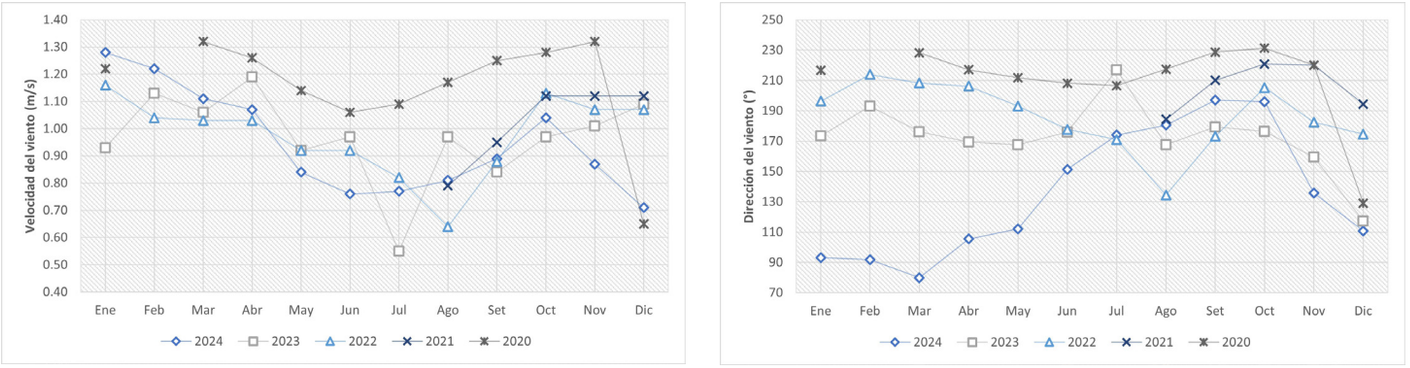
IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La investigación consideró cuatro criterios para el emplazamiento del proyecto DESHUME: 1) Proximidad a una loma costera, 2) Humedad presente en la atmósfera, 3) Altitud oscilante de 400 a 1000m.s.n.m, y 4) Orientación perpendicular respecto a los vientos predominantes. Por ello, la zona urbana seleccionada corresponde al A.H. Ficus del Pedregal, Sector de



a) b)

Figura 3. (a) Humedad relativa promedio; (b) Temperatura promedio – (2020-2024). Fuente: SENAMHI (s.f. b)



a) b)

Figura 4. (a) Velocidad del viento promedio; (b) Dirección del viento promedio – (2020-2024). Fuente: SENAMHI (s.f. b).

José Carlos Mariátegui, próximo a las Lomas Virgen de la Candelaria, en el distrito de VMT (MINAM, 2019) (Figura 2). El área de estudio, ubicada a 692m.s.n.m. (12°07'17.99" S; 76°55'09.87" W), se orienta hacia los vientos predominantes y presenta bancos de niebla que alcanzan una HR del 100% durante el invierno.

PRECEDENTES DE DATOS METEOROLÓGICOS

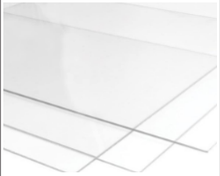
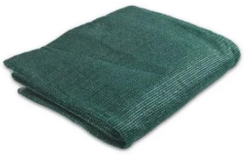
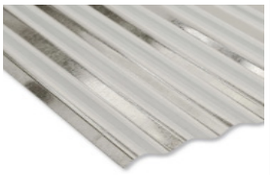
Para determinar las características que influyen en la formación de la niebla y la humedad, se recopilaron datos meteorológicos de 5 años (2020-2024). Obtenidos de la Estación Meteorológica Automática de VMT, 112233; emplazada a 292m.s.n.m, en las coordenadas 12°9'59"S y 76°55'12"W (SENAMHI, s.f. b). La estación realizó un monitoreo continuo de las variables de humedad relativa (%), temperatura del aire (°C), velocidad del viento (m/s) y dirección del viento (°); y se anotaron los datos con una frecuencia horaria continua en archivos CSV. Los registros obtenidos fueron procesados en valores promedios mensuales, que posteriormente se contrastaron interanualmente, obteniéndose un valor promedio final.

HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA

Los datos de HR (%) registrados durante el invierno del 2020 al 2024, indican que los valores en el ambiente superan los estándares, que alcanzan hasta 100% (Figura 3, a). Asimismo, en estos meses de junio a septiembre, el registro de temperaturas promedio mensual en los cinco años evaluados, evidencia que las temperaturas más bajas, corresponden al mes de agosto, con un valor de 14,04°C (Figura 3, b).

VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO

En los meses de invierno del periodo analizado, se registró un crecimiento progresivo en los valores de velocidad promedio, que alcanzaron máximos de 5.5m/s y mínimos de 0.00m/s, con un promedio de 0.89m/s (Figura 4, a). La dirección del viento es medida en grados respecto al norte verdadero (0°). En este sentido, la dirección predominante durante el invierno del 2020 al 2024, fue del sur - suroeste, con un promedio de (≈186.25°) (Figura 4, b).

Propiedades	Triplay	Acrílico	Malla Raschel	Calamina metálica
Materiales empleados				
Sistema constructivo	Muro	Vano	-	Cubierta
Dimensión (m)	2.44x1.221[1]	1.83x1.221[1]	4.20 x 1.001[1]	3.60x0.801
Conductividad Térmica (λ)	0.14 W/°Cm2[2]	0.200 W/° Cm2[2]	-	0.14 W/°Cm2[2]
Resistencia Térmica (R)	0.28 m²°C/W	0.17 m²°C/W	-	0.21 m²°C/W
Transmitancia Térmica (U)	3.57 W/m°C	5.88 W/m°C	-	4.76 W/m°C
Contiene Humedad (%)	5-8	-	-	-
Composición del Film	Papel kraft+resina fenólica	-	HPPE-UV	Acero galvanizado+Zinc
Cobertura de superficie (%)	100	100	50	-
Permanencia al vapor de agua (μ)	50	-	-	-
Impermeabilidad al agua (Aprobado / Rechazado)	Baja	Aprobado	-	Aprobado

1 Formato comercial estándar, 2 Obtenido de la Norma Técnica EM. 110
Tabla 1. Características técnicas de los materiales. Fuente: Elaboración de los Autores.

PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES

Mediante fichas de registro fotográfico se recopilaron las propiedades constructivas de las viviendas. Posteriormente, se realizó un análisis de las características térmicas de los materiales (Tabla 1) para determinar su capacidad aislante y considerar estas condicionantes en los módulos (1:2), y garantizar una mayor eficiencia del prototipo (1:1). Por ello, se evaluó el desempeño (Ecuación 1) y capacidad de aislamiento (Ecuación 2) frente a los aspectos climáticos predominantes de la zona de estudio. Se identificó a la ciudad de Lima en la Zona Bioclimática 1: Desértico Costero. Después, se clasificaron los materiales por sistema constructivo y se evaluó su cumplimiento respecto a los valores máximos permitidos de transmitancia térmica, según la Norma Técnica EM.110 (MVCS, 2016).

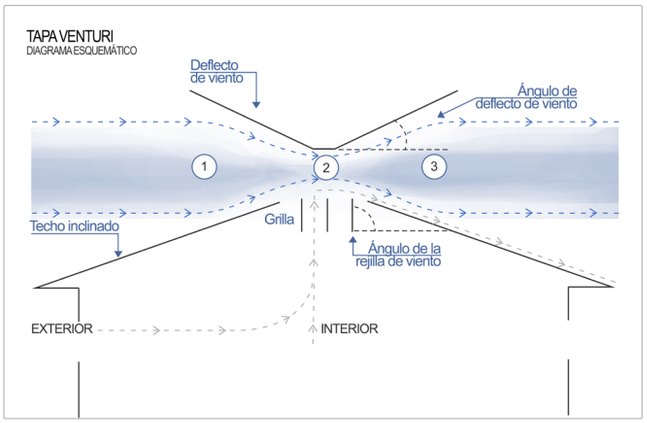
$$U = 1 / Rt. \quad \text{(Ecuación 1)}$$

$$Rt = e / \lambda \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Las propiedades higrotérmicas del triplay evidencian una baja resistencia al paso del vapor (μ≈30-50), facilitan la difusión de humedad hacia el interior de sus fibras. Está permeabilidad, combinada con una HR superior al 65%, genera condiciones críticas para patologías como el hinchamiento por absorción y la proliferación de colonias fúngicas. Por tanto, esta envolvente requiere un recubrimiento de barniz, para contrarrestar la capacidad absorbente del tablero de madera. Asimismo, la calamina metálica, pese a su resistente a la corrosión por su revestimiento de zinc (90g/m²), posee una alta transmitancia y conductividad térmica, permitiendo pasar el frio o calor al interior sin capacidad de generar un colchón térmico. Esto evidencia que la materialidad predominante en las viviendas presenta un desempeño deficiente como aislantes ante las condicionantes del entorno, que influye en los niveles de humedad interior.

CONFIGURACIÓN DEL PROTOTIPO

La ventilación natural o pasiva se sustenta en dos principios que movilizan el aire mediante fuerzas naturales dentro de un ambiente (Saber et al., 2021). Siendo uno de ellos, la ventilación cruzada generada por el viento (Al-Shamkhee et al., 2022). Por ello, en el diseño de sistemas pasivos de ventilación, el efecto Venturi posibilita generar el movimiento del aire, sin recurrir a mecanismos mecánicos (Venturi, 1797). Adicionalmente, el principio de Bernoulli, informa que la presión de un fluido disminuye a medida que su velocidad aumenta (Suárez et al., 2021). Según este fundamento, diversos estudios demuestran que, para garantizar la continuidad del flujo del aire, la reducción en la sección transversal en un conducto (efecto Venturi), es capaz de acelerar el viento local lo suficiente para generar una zona de presión negativa que induce la succión continua del aire (Zhang et al., 2021), maximizándose las tasas de ventilación



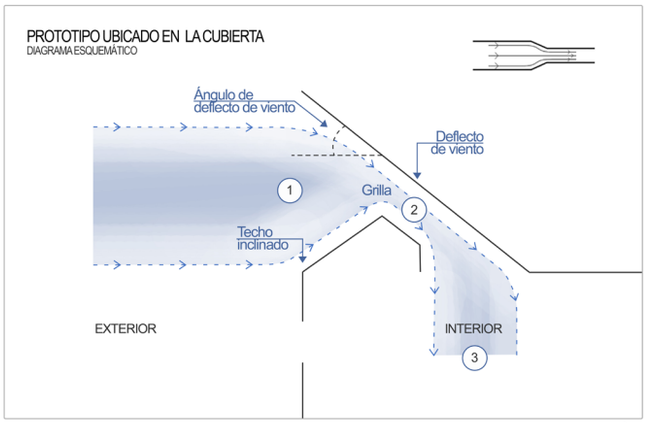
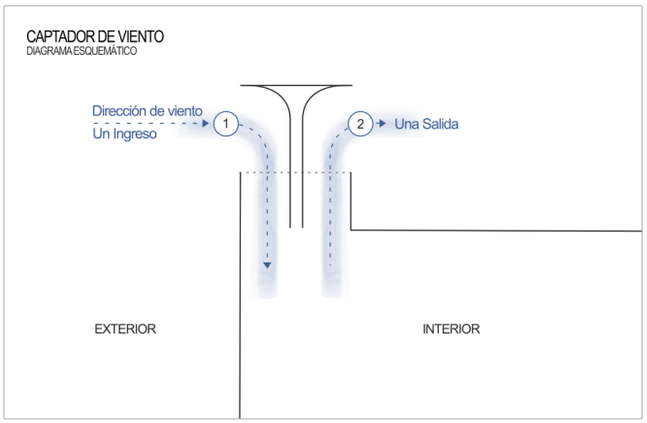


Figura 5. (a) Diagrama esquemático del efecto Venturi. Fuente: Zhang et al., 2021; (b) Diagrama esquemático del prototipo. Fuente: Elaboración de los Autores.



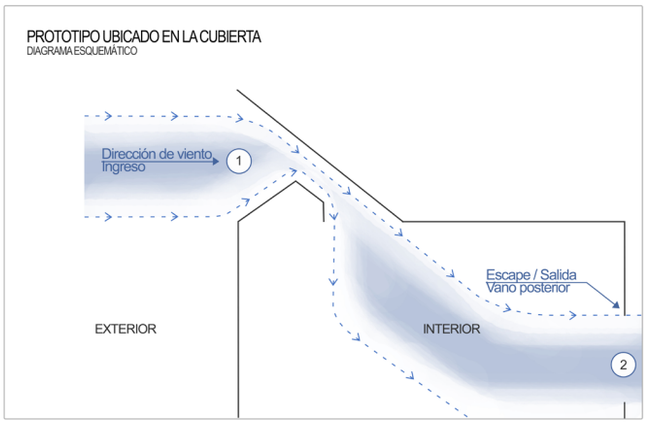


Figura 6. (a) Diagrama esquemático captador de viento. Fuente: Ortego Fernández (2020); (b) Diagrama esquemático del prototipo. Fuente: Elaboración de los Autores.

natural (Blocken et al., 2011) (Figura 5, a). Este principio se adaptó al diseño, para favorecer el ingreso del aire externo, incentivando la circulación interna. De este modo, el conducto del prototipo comprende tres secciones sucesivas, (i) una sección de entrada, con un ángulo de convergencia de 73° donde el aire ingresa a alta presión; (ii) una sección de garganta o núcleo, donde la reducción de dimensiones concentra el flujo y generando una zona de baja presión; y (iii) una sección de salida con un ángulo de divergencia de 52°, donde el conducto recupera sus dimensiones y el flujo retorna a condiciones de alta presión (Figura 5, b). La relación entre los ángulos de convergencia y divergencia, así como entre la altura y el ancho del ducto, resultó crucial para optimizar el movimiento natural del aire.

El emplazamiento del prototipo se determinó en función del aprovechamiento de la dirección de los vientos predominantes. Por lo que, se adaptaron los fundamentos del captador de viento (Figura 6, a) (Ortego Fernández, 2020), teniendo un diseño que busca la captura y redireccionamiento de corrientes de aire exterior dentro del módulo de vivienda, mediante un conducto que facilita su ingreso y distribución. De esta manera, la configuración del prototipo permite capturar e introducir a la vivienda el flujo de aire exterior para incentivar una circulación interna y generar una ventilación cruzada, que promueva la remoción de la humedad interior (Figura 6, b).

El diseño del prototipo no solo pretende evitar la acumulación de humedad mediante la ventilación, sino

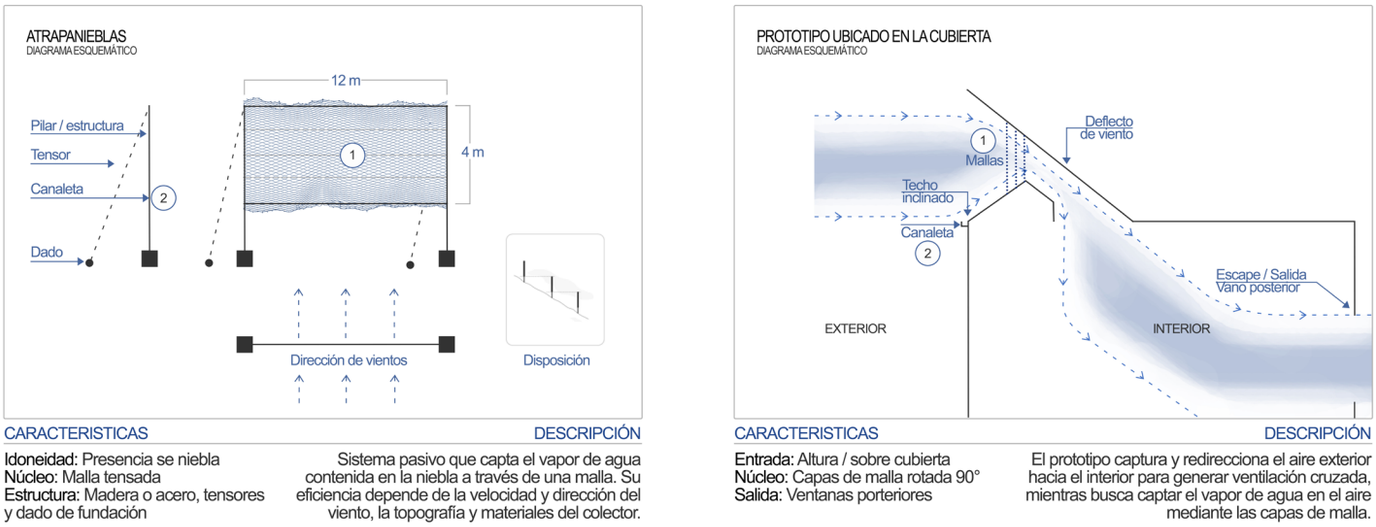


Figura 7. (a) Diagrama esquemático del atrapanieblas. Fuente: Di Bitonto (2019); (b) Diagrama esquemático del prototipo. Fuente: Elaboración de los Autores.

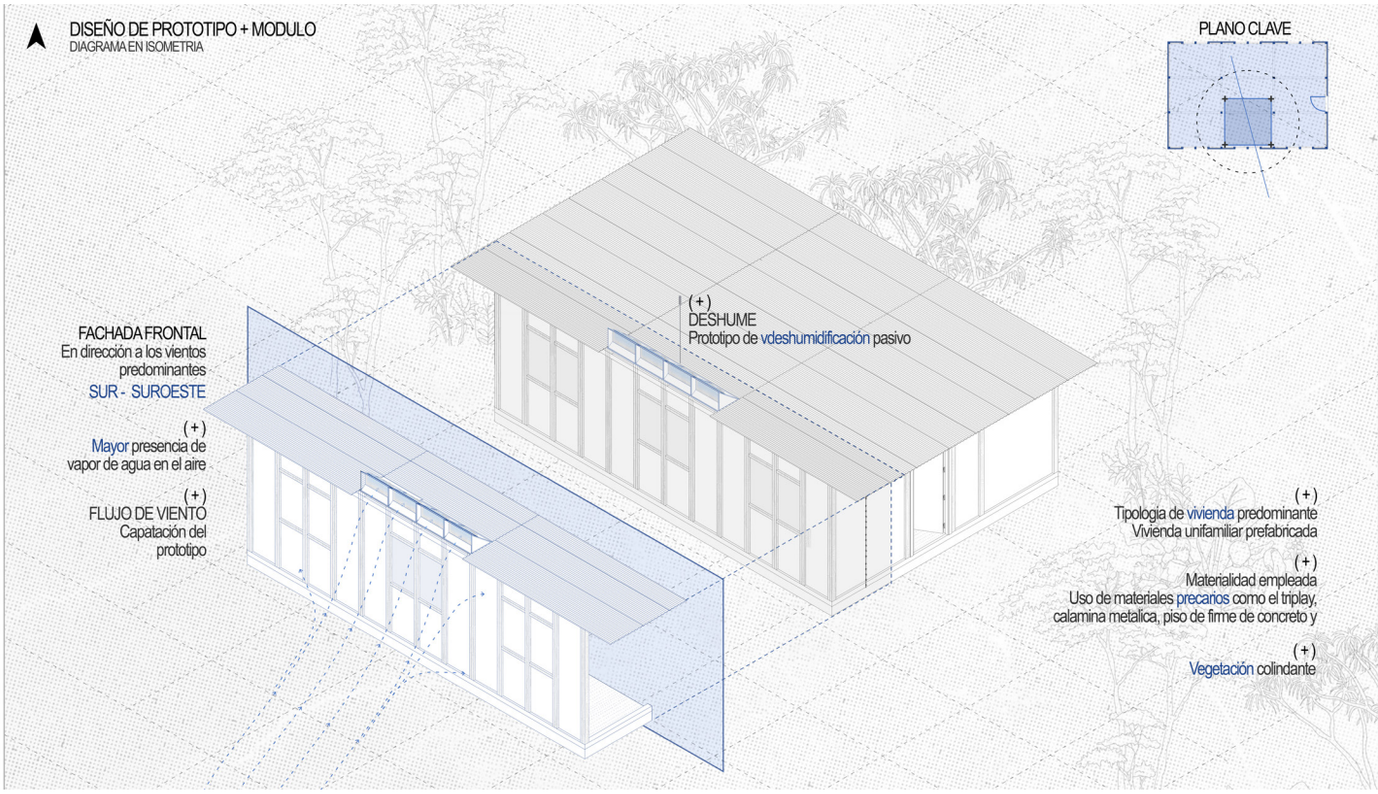


Figura 8. Implementación de prototipo en una vivienda. Fuente: Elaboración de los Autores.

que también busca capturar el aire proveniente del exterior, con una HR cercana al 100%, introduciéndolo con niveles reducidos, tras ser filtrado mecánicamente por las mallas, obteniendo así un sistema deshumidificador pasivo (Tejeda Martínez, 2018). Por lo tanto, se incorpora la tecnología del atrapanieblas bidimensional (Qadir et al., 2018), reconocida como una solución pasiva eficaz para la captación hídrica en ecosistemas áridos y lomas costeras. El principio físico se basa en la intercepción directa de la niebla que está compuesta por microscópicas gotas de agua en suspensión, con diámetros de 1 a 30 micrones (Márquez Robles, 1993).

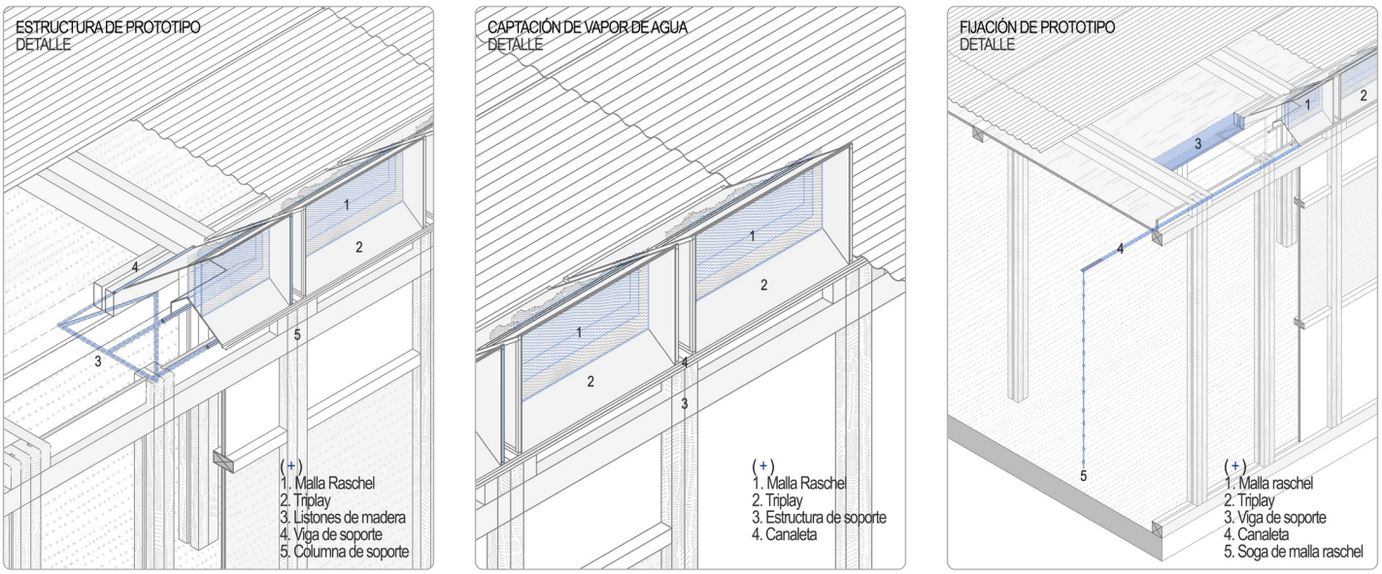


Figura 9. (a) Detalle de fijación; (b) Detalle de captación; (c) Detalle de redireccionamiento del agua captada. Fuente: Elaboración de los Autores.

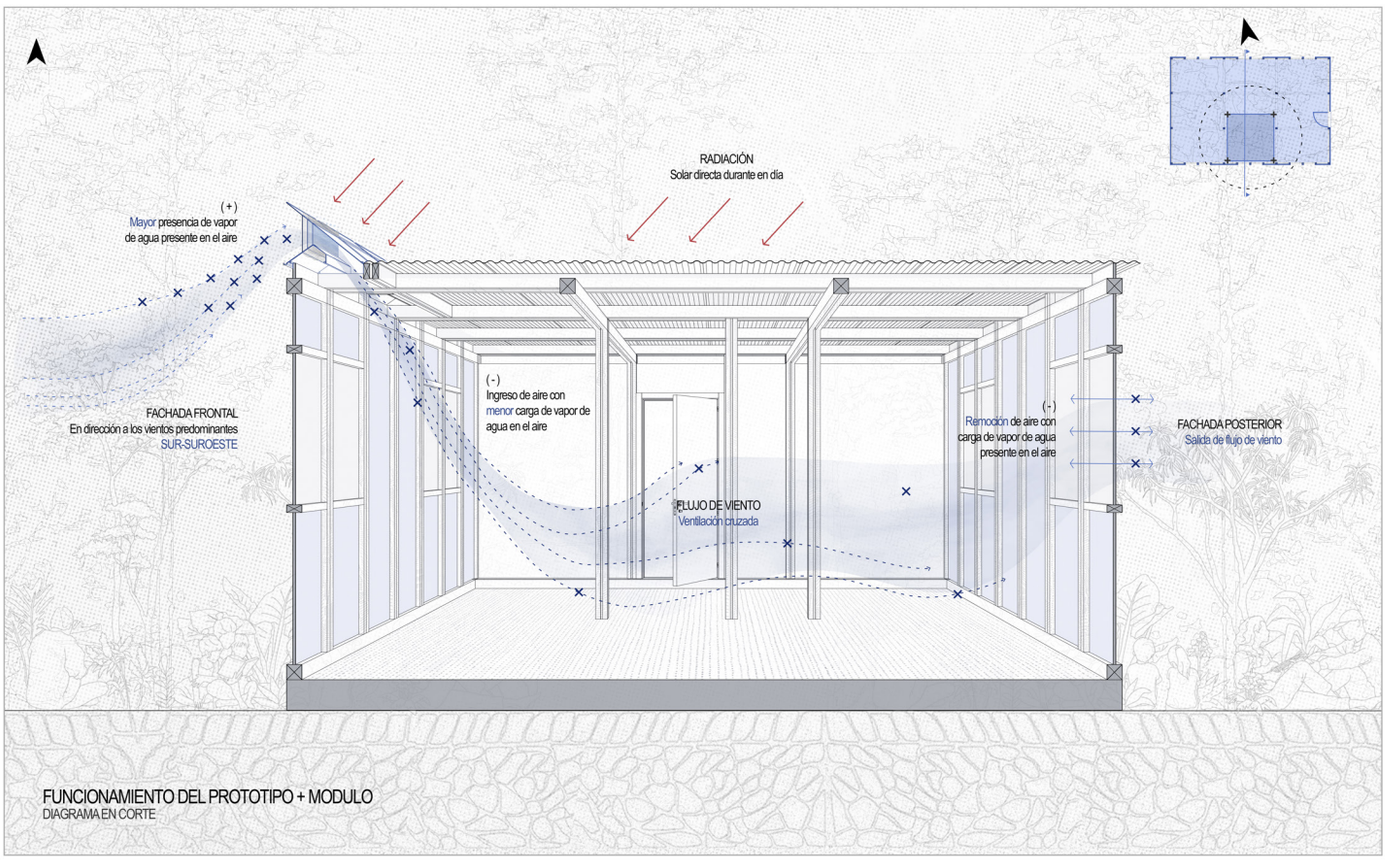


Figura 10. Funcionamiento de prototipo DESHUME en una vivienda. Fuente: Elaboración de los Autores.

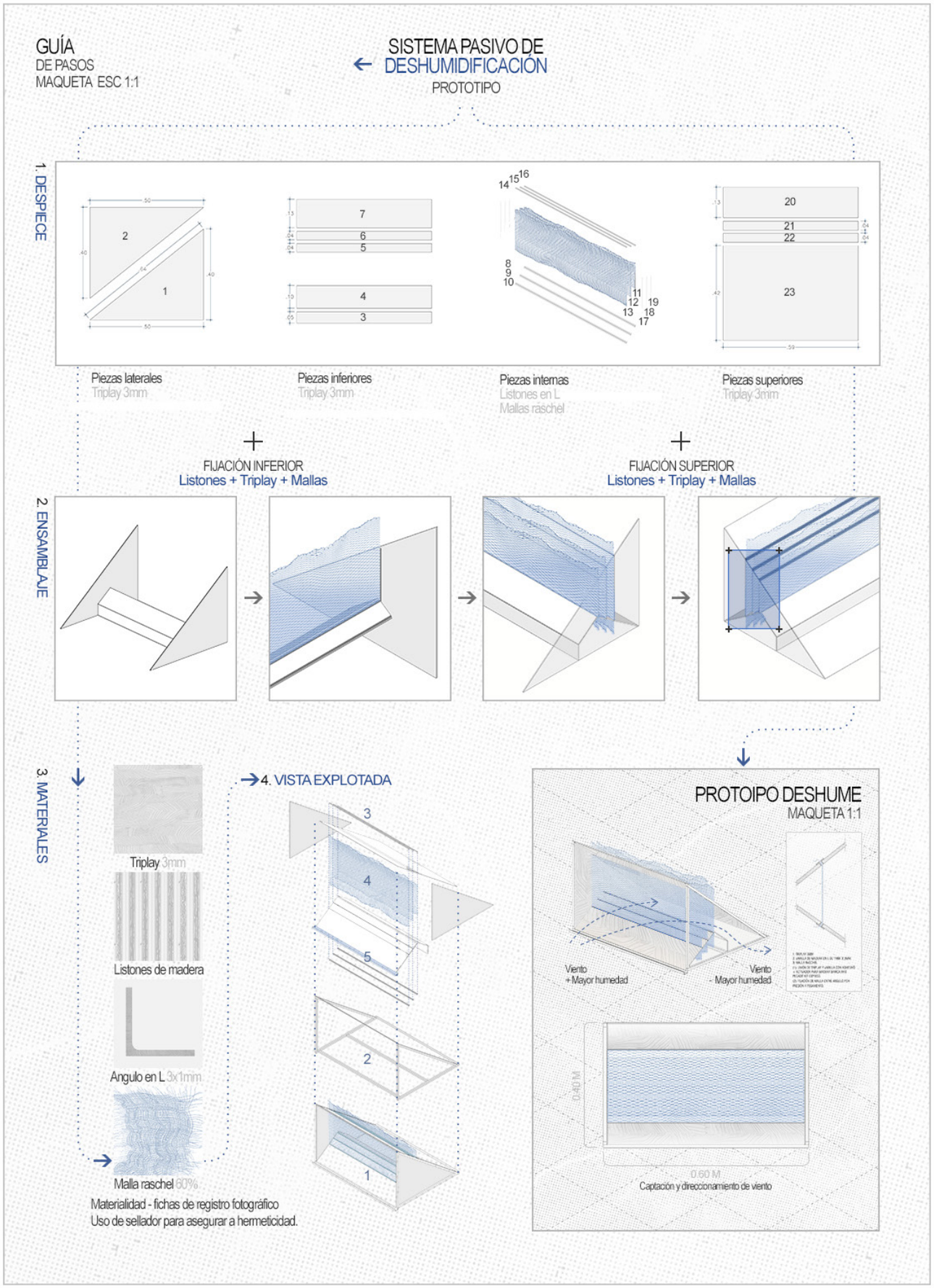


Figura 11. Ensamblado del prototipo. Fuente: Elaboración de los Autores.



Figura 12. Registro fotográfico de ensamblado del Prototipo. Fuente: Elaboración de los Autores.

Cuando el viento empuja esta masa saturada contra una superficie porosa instalada perpendicularmente, las gotas impactan en los filamentos, coalesciendo y cayendo por gravedad (Ismail & Go, 2021) (Figura 7, a). Así, la malla actúa como un filtro físico que extrae la masa de agua líquida del flujo de aire antes de su ingreso, reduciendo activamente su humedad absoluta. La eficiencia de esta remoción hídrica es directamente proporcional al tamaño de la superficie captadora, evaluándose en litros recolectados por metro cuadrado al día (L/m2/día) (Ghiasi, Aslani & Alisoltani, 2025). Lo que hace posible captar como mínimo 1 L/m2/día de malla instalada. (Vásquez-Ramírez, Cieza-León & Cieza-León, 2020). En este sentido, para maximizar el impacto del flujo de aire ante la menor área de abertura frontal en el prototipo (0.24m²), y deshumidificar un volumen interior de 1.82m³; el diseño compensa esta limitación al densificar el área neta de captación. El núcleo consta de tres capas de malla Raschel de polietileno en paralelo, separadas cada 4cm, y alternadas en sentido horizontal y vertical para evitar traslapes (Figura 7, b). Esta configuración densifica la superficie captadora de humedad en un área reducida, considerando la orientación a los vientos, la sombra óptima de 50%-60% (Regalado & Ritter, 2016), y reduce su desgaste ante factores como la radiación. Finalmente, el agua captada se redirecciona en caída por gravedad por medio de una canaleta externa. De esta manera, se aprovecha y potencia la tecnología del atrapanieblas para desarrollar un prototipo que integra de forma eficiente las variables de viento, área de superficie y humedad.

DISEÑO DE PROTOTIPO + MÓDULO

Se proyectó un módulo de vivienda de 5.50×8.80 m en la que se replicaron las características de las tipologías de la zona de estudio (Figura 8). El prototipo se instaló en la fachada perpendicular a los vientos predominantes, sobre las estructuras de madera (Figura 9, a), las que actúan como soporte para garantizar su correcta instalación y funcionamiento. Esta disposición permite que las tres capas de malla intercepten el vapor de agua en el flujo del viento (Figura 9, b); redireccionando en agua captada hacia una canaleta (Figura 9, c) y a su vez la presión generada por el efecto Venturi permite que el flujo de aire ingrese al interior de la vivienda. De este modo, el prototipo facilita la ventilación natural y reduce la acumulación de humedad interior, permitiendo finalmente su salida a través de los vanos posteriores (Figura 10).

ENSAMBLADO DEL PROTOTIPO

El ensamblado del prototipo en escala 1:1 (Figura 11) comprendió el despiece de sus componentes, según los materiales seleccionados y la lógica constructiva del

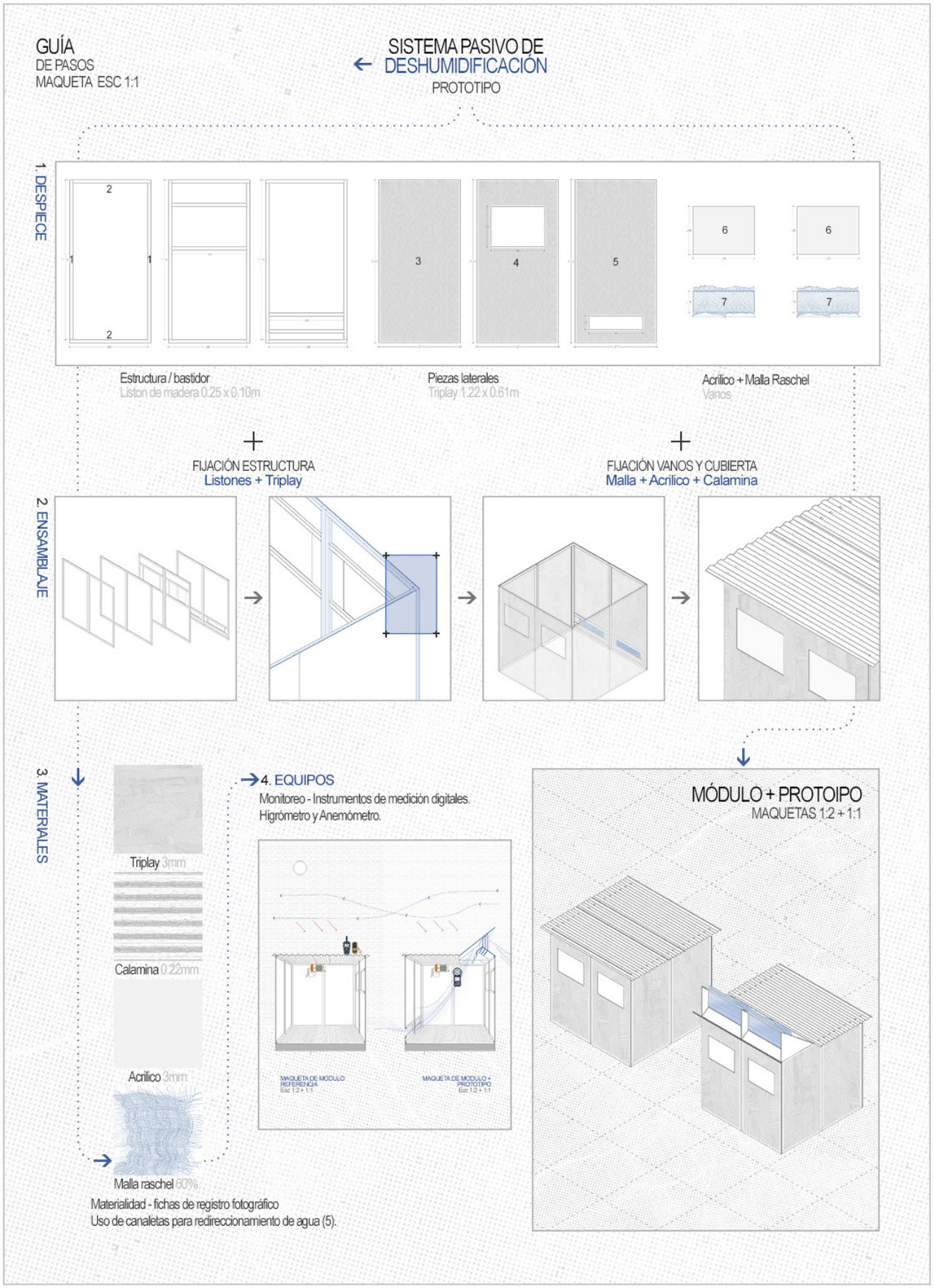


Figura 13. Ensamblado del módulo. Fuente: Elaboración de los Autores.



Figura 14. Registro fotográfico de ensamblado del módulo. Fuente: Elaboración de los Autores.

sistema. Para este proceso se empleó un kit de adhesivo y activador para madera, que permitió una fijación rápida y eficiente. Se inicio, uniendo las piezas laterales (1) y (2) con las inferiores (3) y (4). Posteriormente, se fijaron los tres pares de ángulos inferiores en L (8, 9 y 10) en un extremo de las piezas (4) y (7), y en ambos extremos de las piezas (5) y (6). Luego, se colocaron las mallas de forma sucesiva: (11) entre (4–5), (12) entre (5–6) y (13) entre (6–7). Las piezas que ejercen presión sobre cada malla se adhirieron simultáneamente a los laterales (1) y (2), que garantizan su fijación. En la siguiente etapa se tensaron y fijaron las mallas Raschel (11, 12 y 13) en los laterales (1) y (2), mediante varillas de 3×1mm, (17, 18 y 19) en ambos lados, quedando prensadas entre éstas y las piezas laterales. Seguidamente, se adhirieron los tres pares de ángulos superiores en L (14, 15 y 16) en los extremos de las piezas (20) y (23), y en ambos extremos de las piezas (21) y (22). A continuación, se dispusieron las mallas en secuencia: (13) entre (20–21), (12) entre (21–22) y (11) entre (22–23), y se aseguró a los laterales (1) y (2). Finalmente, las uniones se sellaron con adhesivo Sikaflex-11FC, que aseguraron la hermeticidad del prototipo (Figura 12).

ENSAMBLADO DEL MÓDULO

Posteriormente, a partir de una sección de la fachada frontal de la vivienda, se elaboraron dos maquetas a escala 1:2; optimizando el control experimental en términos de recursos, dimensiones y factibilidad constructiva, garantizando la representatividad de los módulos ante las condiciones climáticas del área de estudio. El ensamblaje inició con la disposición de 16 listones de madera (1) y (2), conformando 8 bastidores de 1.22×0.61m, cada uno estructurado por dos listones de ambas tipologías. A continuación, planchas de triplay de 1.22×0.61m (3)(4)(5) fueron fijadas sobre los 8 bastidores: dos piezas completas conformaron un muro lateral. En el muro frontal se hizo un vano de 0.30×0.40m en cada pieza (4); y finalmente, en el muro posterior, un vano inferior de 0.10×0.40m (5) en una sola pieza. Los vanos frontales se recubrieron con planchas de acrílico de 3mm (6), y el posterior con una capa de malla Raschel (7). Después, se unieron los muros, sellando posibles aberturas con adhesivo Sikaflex-11FC, para garantizar mayor hermeticidad. Para la cubierta se empleó calamina metálica de 0.22mm, fijada a la estructura mediante clavos; adicionalmente, las aberturas restantes fueron selladas para evitar filtraciones. De esta manera se completa el ensamblado del módulo y prototipo (Figura 13) (Figura 14).

MONITOREO Y RECOPILACIÓN DE DATOS

Durante el monitoreo, los módulos a escala 1:2 permanecieron sin ocupación humana para prescindir de variables como la fuente de humedad por actividades internas. Esta

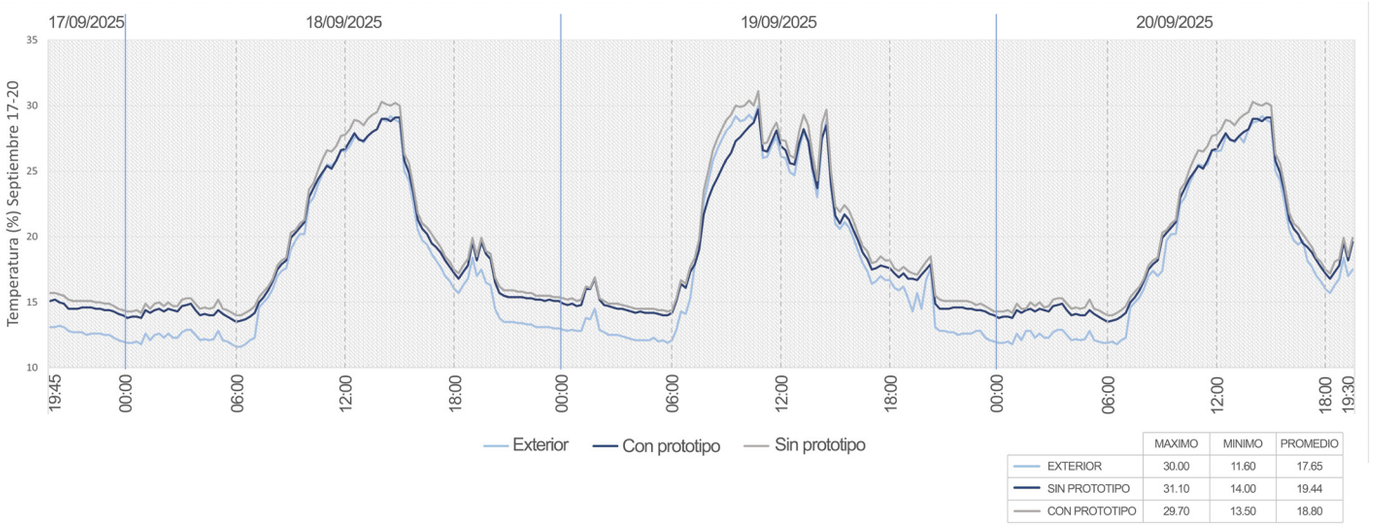


Figura 15. Registro de temperatura - VMT, 2025. Fuente: Elaboración de los Autores.

delimitación permitió aislar el desempeño del sistema DESHUME frente a las condiciones climáticas externas, y su interacción con los materiales de la envolvente, sin interferencias antropogénicas. Asimismo, la recopilación de datos se dio después de instalar en campo las maquetas a escala 1:2, en la que solo una incorporó el prototipo en 1:1. Se instalaron equipos de medición en el interior y exterior, registrándose datos de HR, temperatura y velocidad del viento en intervalos de 15 minutos, durante un periodo continuo de 3 días. La temperatura y HR fueron registradas mediante un higrómetro Elitech GSP-6 en el interior, y un Benetech GT1368 en el exterior. Así mismo, la velocidad del viento se registró con un anemómetro Wintact WT87B en el interior a 1m de altura y a 0.50m del muro frontal, y con un Benetech GM816 en el exterior. Los instrumentos operaron bajo su respectiva calibración de fábrica, presentándose márgenes de error técnicos muy reducidos: el higrómetro interior posee una exactitud de ±0.5°C y ±3% de HR; el higrómetro exterior presenta un margen de ±1.5°C y ±5.0% de HR; y ambos anemómetros registran un margen de error de velocidad operativa de ±5%. Para garantizar la representatividad de las condiciones higrotérmicas, el anemómetro interior se ubicó a 1.00m de altura, considerando criterios de confort y ventilación (Zhai et al., 2015), que determinan un rango de 1.00m a 1.10m como idóneo para evaluar el flujo de aire en la zona de ocupación humana (nivel del torso o cabeza). Asimismo, el instrumento se distanció a 0.50m del muro frontal para evitar el sesgo de medición que pudiera generar la transferencia térmica y la capa límite de la envolvente. Finalmente, la medición exterior se realizó a 1.20m SNPT, en una zona despejada para registrar el flujo de aire ambiental sin obstrucciones.

ANALISIS DE DATOS

Posteriormente, se realizó un cálculo higrotérmico, mediante la aproximación de Magnus-Tetens (Vaisala, 2013) a partir de la temperatura (°C) y la humedad relativa (%), para obtener la humedad absoluta (g/m³). Primero se calculó la presión de vapor de saturación Pws en hPa (Ecuación 3) y después la presión de vapor real Pw en hPa (Ecuación 4).

$$P_{ws}(T) = A \cdot 10^{\frac{m \cdot T}{T + T_n}} \quad (\text{hPa}) \qquad \text{(Ecuación 3)}$$

$$P_w = P_{ws} \cdot \frac{RH}{100} \quad (\text{en hPa}) \qquad \text{(Ecuación 4)}$$

Asimismo, para determinar la HA (Ecuación 5) se requirió convertir la temperatura de °C a K (Ecuación 6) y la presión de vapor real Pw de hPa a Pa (Ecuación 7) obteniendo valores en g/m³. Esta información permitió comparar los datos recogidos del módulo referencial frente al intervenido y, a su vez, validar la efectividad del sistema DESHUME.

$$\boxed{A = C \cdot \frac{P_w}{T}} \quad (\text{g/m}^3) \qquad \text{(Ecuación 5)}$$

$$T_K = T(^\circ\text{C}) + 273.15 \qquad \text{(Ecuación 6)}$$

$$1\ \text{hPa} \times 100\ \text{Pa} \qquad \text{(Ecuación 7)}$$

Después, con los datos de temperatura, velocidad de viento y HA, se elaboraron tablas comparativas entre las 3 instancias de medición.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La temperatura exterior presentó una variación amplia entre 12°C y 30°C, con promedio de 17.7°C, mientras que la temperatura interna del módulo intervenido registró un promedio de 18.8°C, ligeramente menor que en el

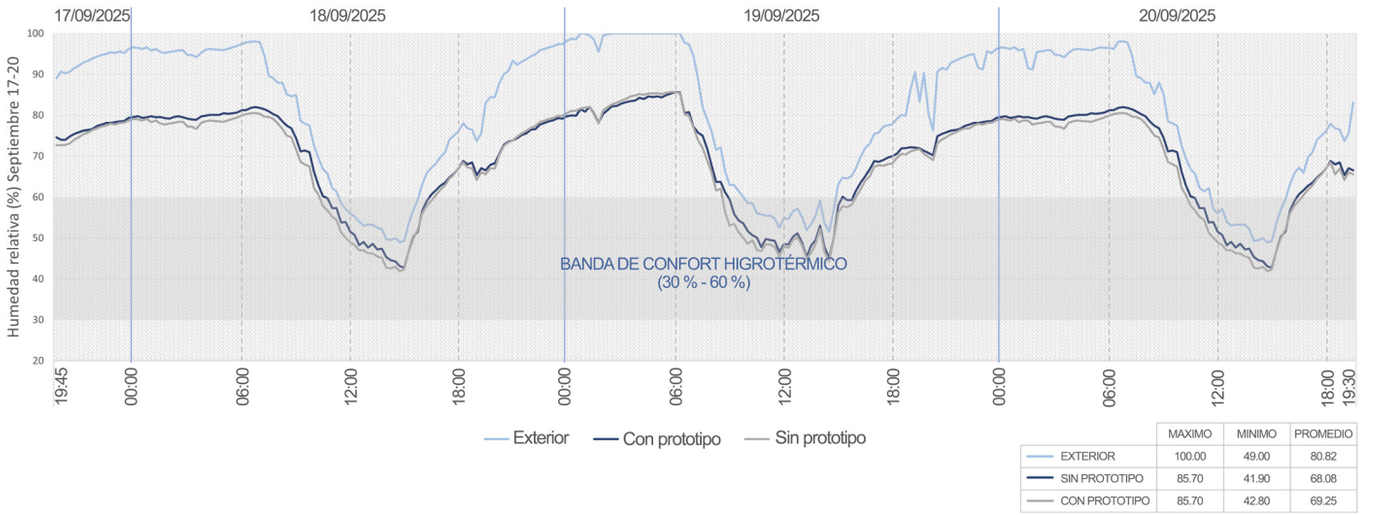


Figura 16. Registro de Humedad relativa - VMT, 2025. Fuente: Elaboración de los Autores.

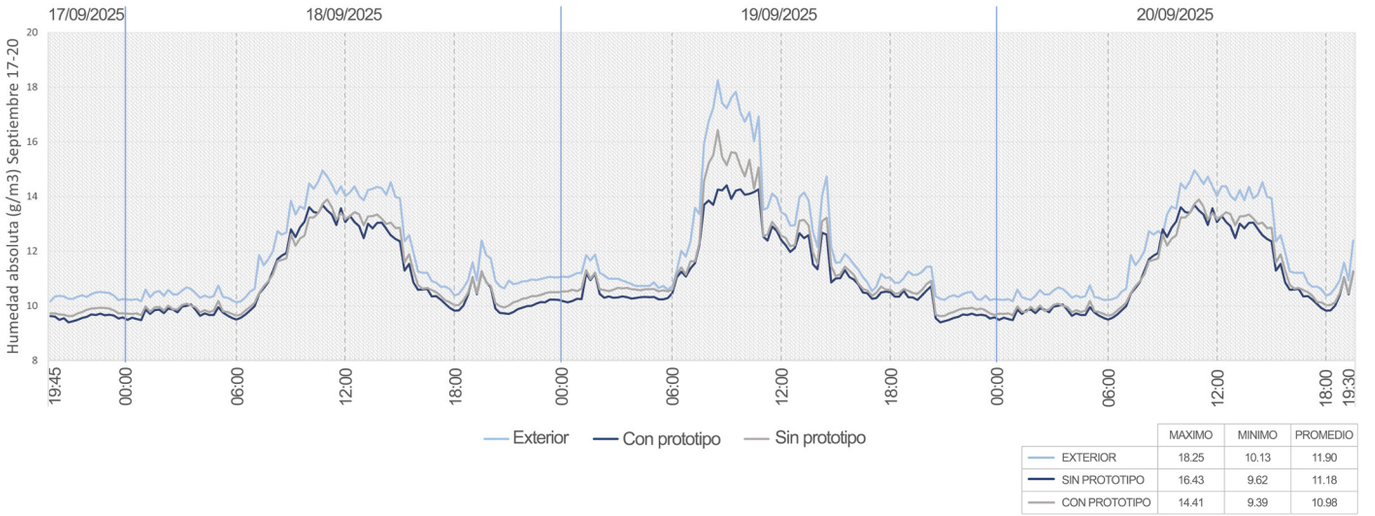


Figura 17. Registro de Humedad absoluta - VMT, 2025. Fuente: Elaboración de los Autores.

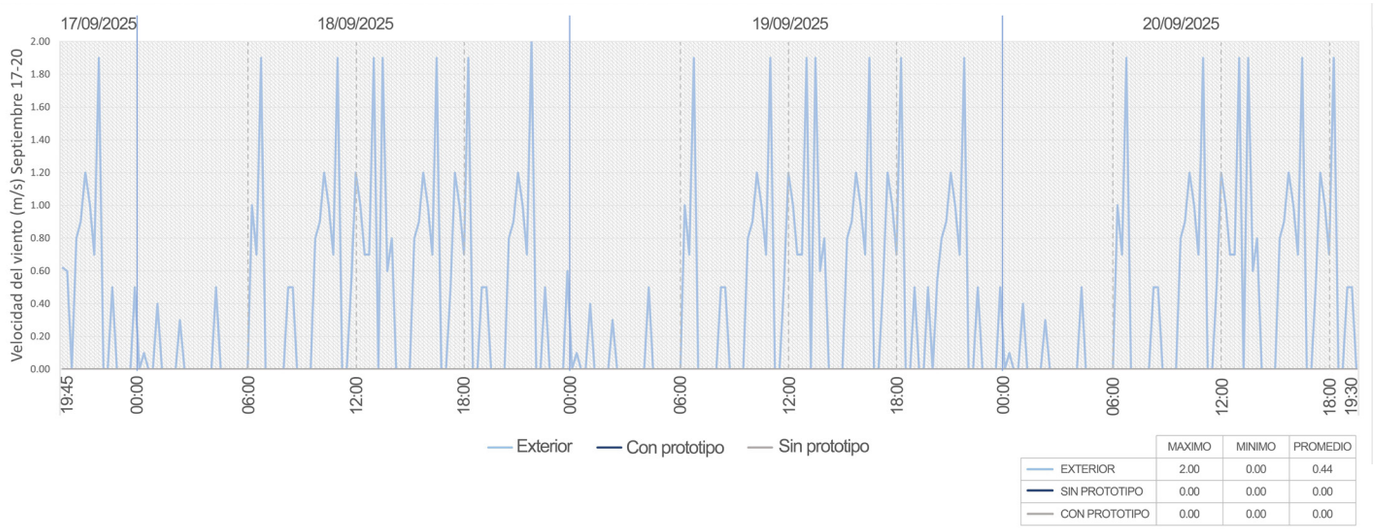
referencial, con 19.4°C, evidenciando un leve efecto de amortiguamiento térmico. Las temperaturas nocturnas oscilaron entre 13.5°C y 15.2°C en el prototipo, y entre 14.2°C y 15.7°C en el referencial (Figura 15).

Al comparar la banda de confort higrotérmico (30%-60%) basa en la norma ANSI/ASHRAE 62.1-2025 y el RNE EM.110, se observan intervalos donde los ambientes interiores logran condiciones cómodas (Figura 16). El tiempo de permanencia en el rango de confort durante el control fue de 3 días: Exterior (13.5h), Sin prototipo (19.75h) y Con prototipo (18.5h).

La HA en el exterior mostró valores superiores a los estándares, con un promedio de 12g/m³. El módulo intervenido con el prototipo DESHUME presentó una reducción leve a 10.98g/m³; mientras que el módulo referencial indicó 11.18g/m³. La variación más notoria se observó en las mañanas, con 14.41g/m³ con el prototipo, frente a 16.43g/m³ del módulo referencial, evidenciándose una reducción de 2.02g/m³ (Figura 17).

La velocidad del viento exterior promedio fue de 0.44m/s con picos de 2.1m/s, contrariamente al interior, en el que el anemómetro no registró un ingreso de flujo de aire (Figura 18).

Se evidenciaron variaciones entre las variables de humedad absoluta (g/m³), velocidad del viento (m/s) y temperatura (°C), que reflejan diferencias internas en ambos módulos. El prototipo registró un promedio de 10.98g/m³ de HA interior durante los días de estudio, que representan una reducción del 0.20g/m³ frente al módulo referencial



	MAXIMO	MINIMO	PROMEDIO
EXTERIOR	2.00	0.00	0.44
SIN PROTOTIPO	0.00	0.00	0.00
CON PROTOTIPO	0.00	0.00	0.00

Figura 18. Registro de velocidad de viento - VMT, 2025. Fuente: Elaboración de los Autores.

(11.18g/m³); presentan picos de captación de 2.02g/m³ (12.3%) en las horas diurnas y 0.23 g/m³ (2.4%) en las horas nocturnas. Aunque el anemómetro no registró viento interno medible, estas variaciones indican que el sistema funciona como un regulador pasivo de la carga de vapor, por condensación e intercepción en las mallas Raschel. La disminución de temperatura en el módulo con prototipo sugiere un leve intercambio con aire exterior más frío o una menor retención térmica. En conjunto, el prototipo demuestra eficacia parcial bajo condiciones de viento débil, momento en el cual destaca su potencial como dispositivo pasivo de control higrotérmico por captación, dependiendo de la geometría y de la disponibilidad del flujo de aire ambiental.

CONCLUSIONES

El prototipo respondió al objetivo principal, como estrategia pasiva de deshumidificación, a través de un sistema modular y de fácil ensamblaje; el cual ha sido concebido para su aplicación en viviendas sin requerir intervenciones importantes, en zonas con humedad elevada. Aunque la reducción de la HA fue mínima, (1.79%), el prototipo demostró una mejoría higrotérmica como un sistema pasivo, evidenciando su potencial como alternativa sostenible. Si bien se registró un leve aumento en la HR por el descenso de temperatura interior, el logro en la deshumidificación no se invalida, ya que se eliminó masa de agua. Se evidenció una reducción promedio del 0.20g/m3 de HA respecto al módulo referencial.

El rendimiento del sistema se valida al compararlo con la literatura relacionada: a diferencia del mecanismo de almacenamiento reactivo de otros sistemas pasivos que atenúan hasta 12% de HR a 23°C, en los que se reduce 2.47g/m3 de HA (Zhang, Yoshino & Hasegawa, 2012), DESHUME logra una remoción activa de HA (0.20g/m3) bajo temperaturas mínimas y condiciones de saturación crítica (100%HR), al superar la dependencia de la capacidad de amortiguamiento de los materiales de construcción. En adición, al compararlo con soluciones complejas, como el sistema híbrido (Chen et al., 2023), que reporta reducciones de 5g/m³, DESHUME logra una remoción consistente de HA con un sistema totalmente pasivo estableciéndose como una estrategia apropiada para la autoconstrucción. No obstante, su desempeño requiere futuros estudios sobre la durabilidad de la malla frente a la exposición de la radiación UV y la presión mecánica del viento, así como la variabilidad del rendimiento respecto a su orientación a los vientos predominantes.

Por otra parte, el efecto Venturi no contribuyó en la reducción de la HA, sino que predominó la retención de humedad establecida por las tres capas de malla. Esta estrategia fue una solución a la reducción de área de captación del atrapanieblas, y provocó una desaceleración del flujo de aire.

Entre las limitaciones se puede indicar que, los componentes del sistema no fueron evaluados de forma independiente (el captador geométrico sin la presencia de las mallas), por lo que no se puede desglosar la contribución específica de la forma aerodinámica frente a la retención mecánica del tejido. Asimismo, al no haber realizado simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), no es posible estimar con precisión la aportación de la geometría en el incremento de la presión dinámica.

Finalmente, se recomienda analizar la relación entre el volumen del módulo 1:2 (1.82m3) y las dimensiones de la abertura del prototipo 1:1, cuyo diseño geométrico permite manipular la presión y velocidad del aire que ingresa a la vivienda, así como la aceleración del paso del

viento. También, se sugiere evaluar el comportamiento del prototipo 1:1 en una vivienda real, durante un periodo más prolongado y en distintas estaciones, mediante sensores de presión diferencial o anemómetros más sensibles, además de considerar factores da carga higrotérmica antropogénica (respiración y cocción), para evaluar el desempeño del sistema ante fuentes internas de vapor.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, M.N.D.P.; Curación de datos, M.N.D.P. y A.L.C.V.P.; Análisis formal, M.N.D.P. y A.L.C.V.P.; Adquisición de financiación M.N.D.P. y A.L.C.V.P.; Investigación, M.N.D.P. y A.L.C.V.P.; Metodología, M.N.D.P. y A.L.C.V.P.; Administración de proyecto, M.N.D.P. y A.L.C.V.P.; Recursos, M.N.D.P. y A.L.C.V.P.; Software. M.N.D.P. y A.L.C.V.P.; Supervisión, R.H.V.S.; Validación, M.N.D.P. y A.L.C.V.P.; Visualización, M.N.D.P. y A.L.C.V.P; Escritura – borrador original, M.N.D.P. y A.L.C.V.P.; Escritura – revisión y edición, M.N.D.P. y A.L.C.V.P.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a las personas involucradas durante el proceso de experimentación por su participación, valiosa colaboración y apoyo desinteresado en el desarrollo de la investigación. Asimismo, extienden un sincero reconocimiento a la Universidad Tecnológica del Perú por el respaldo institucional brindado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al-Shamkhee, D., Al-Aasam, A. B., Al-Waeli, A. H. A., Abusaibaa, G. Y., & Moria, H. (2022). Passive cooling techniques for ventilation: an updated review. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, *7*(23), 1-16. https://doi.org/10.1051/rees/2022011

American National Standards Institute [ANSI] / American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2025). *ANSI/ASHRAE 62.1-2025: Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality (Includes ANSI/ASHRAE addenda listed in Appendix Q).* ANISI Webstore. https://webstore.ansi.org/standards/ashrae/ansiashrae622025-2598518?source=blog

Blocken, B., van Hooff, T., Aanen, L., & Bronsema, B. (2011). Computational analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: Venturi-effect versus wind-blocking effect. *Computers & Fluids*, *48*(1), 202–213. https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.04.012

Campos-Vásquez, N., Manturano-Chipana, R. K., & Rabanal-Chávez, E. H. (2025). Causas e Influencia de la humedad en la infraestructura de las edificaciones. *Ciencia y Tecnología*, *24*(2), 27-33. https://doi.org/10.70414/cyt.v24i2.126

Chen, Y., Ozaki, A., Lee, H., Choi, Y., & Arima, Y. (2023). Development of an intelligent envelope system with energy recovery ventilation for passive dehumidification in summer and solar collection in winter. *E3S Web of Conferences*, *396*, 03025. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339603025

Di Bitonto, M. G. (2019). *Oasis productivo: infraestructura de acceso al Parque Pan de Azúcar para la preservación del sector a través de agua de niebla* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile]. Repositorio. https://repositorio.uc.cl/handle/11534/26488

Ghiasi, B., Aslani, Z. H., & Alisoltani, T. (2025). Assessing the feasibility and sustainability of fog water harvesting as an alternative water resource. *Scientific reports*, *15*(1), 19254. https://doi.org/10.1038/s41598-025-03919-3

Ismail, Z., & Go, Y. I. (2021). Fog-to-Water for Water Scarcity in Climate Change Hazards Hotspots: Pilot Study in Southeast Asia. *Global Challenges*, 5(5), 2000036. https://doi.org/10.1002/gch2.202000036

Kanooni, A., & Kohan, M. R. (2024). Fog water harvesting with cylindrical brush. *Scientific Report*s, *14*(1),19679. https://doi.org/10.1038/s41598-024-70637-7

Márquez Robles, J. (1993). Atrapanieblas: una tecnología para la reforestación de las lomas costeras del Perú. *Ingeniería Industrial*, 7(007), 88–98. https://doi.org/10.26439/ing.ind1993.n007.3073

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (7 de diciembre de 2019). Decreto Supremo N.° 011-2019-MINAM: Establece el Área de Conservación Regional Sistema de Lomas de Lima. *Diario Oficial del Bicentenario El Peruano. Normas Legales, 5-11*. https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1834838-3

Ministerio del Ambiente[MINAM]. (15 de agosto de 2021). *Mapa de lomas costeras de Lima Metropolitana*. Sistema Nacional de Información Ambiental [SINIA]. https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-lomas-costeras-lima-metropolitana-2021

Moat, J., Orellana-García, A., Tovar, C., Arakaki, M., Arana, C., Cano, A., Faundez, L., Gardner, M., Hechenleitner, P., Hepp, J., Lewis, G., Mamani, J.-M., Miyasiro, M., & Whaley, O. Q. (2021). Seeing through the clouds – Mapping desert fog oasis ecosystems using 20 years of MODIS imagery over Peru and Chile. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *103*, 102468. https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102468

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, [MVCS]. (s.f.). GeoVivienda. Plataforma GIS del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. https://geo.vivienda.gob.pe/

Norma Técnica EM.110 (2016) [Ministerial Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento - MVCS]. Por la cual se establecen los parámetros técnicos de Confort Térmico y Lumínico con Eficiencia Energética. 27 de julio del 2016. https://www.gob.pe/es/i/2619729

Ortego Fernández, I. (2020). Torres de viento. Relectura contemporánea de sistemas energéticos pasivos [Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio UPM. https://oa.upm.es/57995/

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (16 de mayo de 2018). *Proyecto EbA Lomas: Retos y oportunidades en la conservación de las lomas de Lima Metropolitana*. https://www.undp.org/es/peru/publications/eba-lomas

Posani, M., Voney, V., Odaglia, P., Du, Y., Komkova, A., Brumaud, C., Dillenburger, B., & Habert, G. (2025). Low-carbon indoor humidity regulation via 3D-printed superhygroscopic building components. *Nature Communications*, *16*, 425. https://doi.org/10.1038/s41467-024-54944-1

Qadir, M., Jiménez, G. C., Farnum, R. L., Dodson, L. L., & Smakhtin, V. (2018). Fog water collection: Challenges beyond technology. *Water*, *10*(4), 372. https://doi.org/10.3390/w10040372

Regalado, C. M., & Ritter, A. (2016). The design of an optimal fog water collector: A theoretical analysis. Atmospheric *Research*, *178–179*, 45–54. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.006

Saber, E. M., Chaer, I., Gillich, A., & Ekpeti, B. G. (2021). Review of intelligent control systems for natural ventilation as passive cooling strategy for UK buildings and similar climatic conditions. *Energies, 14*(15), 4388. https://doi.org/10.3390/en14154388

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI]. (s.f. a). *Estaciones meteorológicas*. Datos/Datos Hidrometeorológicos. https://www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI]. (s.f. b). *Estadística de la calidad del aire: Estacion 112233.* https://www.senamhi.gob.pe/?p=calidad_del_aire-estadistica&e=112233

Shi, W., Anderson, M. J., Tulkoff, J. B., Kennedy, B. S., & Boreyko, J. B. (2018). Fog harvesting with vertical harps. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(14), 11979–11986. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.7b17488

Suárez, Á., Dutra, M., Monteiro, M., & Martí, A. C. (2021). El embrollo de Bernoulli: una investigación sobre las concepciones alternativas de los estudiantes en dinámica de fluidos. *Modelling in Science Education and Learning, 14* (2), 17–30. https://doi.org/10.4995/msel.2021.14835

Tejeda Martínez, A. (2018). *La humedad en la atmósfera. Bases físicas, instrumentos y aplicaciones*. Universidad de Colima. http://ww.ucol.mx/publicacionesenlinea/promocion.php?docto=466

Vaisala, O. (2013). Humidity Conversion Formulas*: Calculation formulas for humidity*. (Technical Reference B210973EN-F). https://www.hatchability.com/Vaisala.pdf

Venturi, J. B. (1797). *Recherches expérimentales sur le principe de la communication latérale du mouvement dans les fluides. Houel et Ducros*. Théophile Barrois. https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9611865z.textelmage

Vásquez-Ramírez, L., Cieza-León, L., & Cieza-León, D. (2020). Eficiencia de captación de agua con tres tipos de malla atrapanieblas en zonas rurales altoandinas de la sierra norte del Perú. *Revista Ingeniería UC*, 27(3), 319-327. https://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/

Zhai, Y., Zhang, Y., Zhang, H., Pasut, W., Arens, E., & Meng, Q. (2015). Human comfort and perceived air quality in warm and humid environments with ceiling fans. *Building and Environment*, 90, 178-185. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.00

Zhang, H., Yoshino, H., & Hasegawa, K. (2012). Assessing the moisture buffering performance of hygroscopic material by using experimental method. *Building and Environment*, 48, 27-34. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.012

Zhang, L., Tian, L., Shen, Q., Liu, F., Li, H., Dong, Z., Cheng, J., Liu, H., & Wan, J. (2021). Study on the influence and optimization of the Venturi effect on the natural ventilation of buildings in the Xichang Area. *Energies*, *14*(16), 5053. https://doi.org/10.3390/en14165053

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 42 - 55
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.03

DISEÑO DE SISTEMA INDIRECTO DE FACHADA VERDE PARA MEJORAR EL CONFORT TÉRMICO EN VIVIENDAS MULTIFAMILIARES

Recibido 17/12/2025
Aceptado 20/05/2026

DESIGN OF AN INDIRECT GREEN FAÇADE SYSTEM TO IMPROVE THERMAL COMFORT IN MULTIFAMILY HOUSING

DESENHO DE SISTEMA INDIRETO DE FACHADA VERDE PARA MELHORAR O CONFORTO TÉRMICO EM HABITAÇÕES MULTIFAMILIARES

Analucia Espinoza-Abarca
Bachiller en Arquitectura
Estudiante, Facultad de Arquitectura
Universidad Tecnológica del Perú
Lima, Perú
https://orcid.org/0009-0007-9240-5433
u20202371@utp.edu.pe

Alis Tasayco-Huanca (Autor de Correspondencia)
Bachiller en Arquitectura
Estudiante, Facultad de Arquitectura
Universidad Tecnológica del Perú
Lima, Perú
https://orcid.org/0009-0001-9807-6294
U20302943@utp.edu.pe

Victor Miranda-Alfaro
Doctor en Ingeniería Ambiental
Docente, Facultad de Ingeniería
Universidad Tecnológica del Perú
Lima, Perú
https://orcid.org/0000-0002-4857-8800
C26968@utp.edu.pe

CC BY SA

RESUMEN

El crecimiento urbano no planificado en Lima Norte ha intensificado las islas de calor urbano, que afectan el confort térmico en viviendas multifamiliares autoconstruidas. Este estudio evalúa el desempeño de un sistema indirecto de fachada verde como estrategia pasiva de mitigación térmica en una vivienda ubicada en San Martín de Porres. Se empleó un enfoque cuantitativo con un diseño cuasiexperimental, que combina la simulación térmica en SIMEDIF 2.0 y mediciones in situ con un termohigrómetro digital. Los resultados muestran una reducción de la temperatura interior de hasta 2 °C en mediciones reales y de hasta 3 °C en simulaciones, además de una disminución de la radiación solar incidente sobre la fachada. Se concluye que el sistema es constructivamente viable y mejora el confort térmico en contextos de autoconstrucción urbana.

Palabras clave
fachada verde indirecta, confort térmico, análisis térmico, estrategias pasivas, viviendas multifamiliares.

ABSTRACT

Unplanned urban growth in Northern Lima has intensified urban heat islands, affecting thermal comfort in self-built multifamily housing. This study evaluates the performance of an indirect green façade system as a passive thermal mitigation strategy in a dwelling located in San Martín de Porres. A quantitative approach with a quasi-experimental design was employed, combining thermal simulation in SIMEDIF 2.0 with in situ measurements using a digital thermo-hygrometer. The results show a reduction in indoor temperature of up to 2 °C in real measurements and up to 3 °C in simulations, as well as a decrease in incident solar radiation on the façade. It is concluded that the system is constructively viable and improves thermal comfort in urban self-built contexts.

Keywords
indirect green façade, thermal comfort, thermal analysis, passive strategies, multifamily housing

RESUMO

O crescimento urbano não planejado na região norte de Lima intensificou as ilhas de calor urbanas, afetando o conforto térmico em habitações multifamiliares autoconstruídas. Este estudo avalia o desempenho de um sistema indireto de fachada verde como estratégia passiva de mitigação térmica em uma habitação localizada em San Martín de Porres. Foi empregada uma abordagem quantitativa, com desenho quase experimental, que combina simulação térmica no SIMEDIF 2.0 e medições in situ realizadas com um termohigrômetro digital. Os resultados mostram uma redução da temperatura interna de até 2 °C nas medições reais e de até 3 °C nas simulações, além de uma diminuição da radiação solar incidente sobre a fachada. Conclui-se que o sistema é viável do ponto de vista construtivo e melhora o conforto térmico em contextos de autoconstrução urbana.

Palavras-chave
fachada verde indireta, conforto térmico, análise térmica, estratégias passivas, habitações multifamiliares

INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano acelerado y la alta densidad edificatoria han intensificado las islas de calor urbano (UHI), que elevan las temperaturas en zonas densamente urbanizadas por la reducción de áreas verdes y el predominio de superficies como concreto y asfalto, lo que afecta el confort ambiental y la calidad de vida (Faragallah & Ragheb, 2022; Soberón Forsberg & Obregón Párraga, 2016). En Lima, este fenómeno se encuentra asociado al reemplazo progresivo de áreas vegetadas por edificaciones y al crecimiento urbano continuo, factores que favorecen la acumulación de calor y afectan el confort ambiental. Asimismo, se han registrado diferencias térmicas de hasta 3.7 °C entre distritos asociadas a la escasa vegetación (Barros & Menacho Casimiro, 2014). En San Martín de Porres, este fenómeno se agrava por un crecimiento urbano no planificado, donde la expansión edificatoria predomina sobre las áreas verdes; el distrito dispone de solo 1.86 m² de áreas verdes por habitante, muy por debajo de lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), lo que favorece la acumulación de calor y reduce el confort térmico interior.

Frente a este escenario, las estrategias pasivas han ganado relevancia para mejorar el confort térmico en viviendas mediante la reducción de la ganancia de calor con soluciones de bajo consumo. Entre estas estrategias, la vegetación, aplicada mediante fachadas verdes directas (GF) o indirectas (SGF), atenúa la radiación solar, estabiliza el microclima y reduce la temperatura de muros y espacios interiores, disminuyéndose la necesidad de ventilación mecánica Marchioretto et al. (2023). Asimismo, una revisión sistemática sobre sistemas de vegetación vertical señala que estos contribuyen al desempeño térmico de las edificaciones mediante mecanismos de sombreado, aislamiento y enfriamiento evaporativo, lo que favorece la reducción de las ganancias de calor y mejora las condiciones de confort interior (Bustami et al., 2018). Mientras el GF se desarrolla directamente sobre el muro y puede retener humedad, el SGF utiliza una estructura separada que crea una cámara de aire ventilada, que protege el muro y resulta más adecuado para viviendas autoconstruidas por su bajo impacto estructural (El Menshawy et al., 2022).

Por otra parte, diversos estudios han demostrado la eficacia de los sistemas indirectos de fachada verde como estrategia pasiva de mitigación térmica, mediante enfoques experimentales y simulaciones. Ramadhan y Mahmoud (2023) reportan que estas fachadas reducen la carga térmica, el consumo energético (hasta en 75 %) y las emisiones de CO_2 (45 %), manteniendo condiciones adecuadas de confort. De manera complementaria, Tudiwer y Korjenic (2017) evidencian, a partir de ensayos experimentales, que los muros verdes indirectos pueden disminuir la temperatura interior hasta en 5 °C y bloquear cerca del 90 % de la radiación solar incidente. Igualmente, Lesjak et al. (2020) concluyen, mediante mediciones experimentales y simulaciones térmicas, que las fachadas verdes indirectas constituyen una estrategia eficaz para prevenir el sobrecalentamiento de los edificios, al reducir la radiación solar incidente sobre la envolvente y disminuir la temperatura operativa interior, mejorando así las condiciones de confort térmico durante el verano.

Asimismo, Suárez et al. (2023), demuestran su efectividad en climas áridos, al lograr reducciones en la temperatura ambiente interior de hasta 4.4 °C en verano y disminuciones de la temperatura ambiente exterior mediata de hasta 3.9 °C en la estación cálida. De forma similar, Gómez et al. (2023), a través de simulaciones térmicas y análisis de radiación por orientación, evidenciaron reducciones de hasta 74 % en fachadas este, lo que permite descensos de la temperatura interior entre 0.6 °C y 4.5 °C. Finalmente, Suárez et al. (2020) reportaron reducciones de hasta 26.5 °C y 27.4 °C en la temperatura superficial exterior durante los periodos evaluados del 2019 y 2020. Además, el desempeño del muro con fachada verde presentó una amplitud térmica cercana a 6 °C, significativamente menor que la registrada en el muro testigo, cuya amplitud osciló entre 24 °C y 31 °C.

Por lo tanto, si bien diversos estudios han demostrado la eficacia de las fachadas verdes para reducir la temperatura interior, la mayoría se ha desarrollado mediante simulaciones o en contextos climáticos distintos al de Lima. Asimismo, investigaciones que combinan monitoreo experimental y simulación térmica han demostrado que la incorporación de vegetación en elementos verticales constituye una estrategia pasiva eficaz para disminuir la ganancia de calor y mejorar la calidad ambiental interior (Domínguez Cicorio et al., 2022). Sin embargo, aún existe escasa evidencia empírica obtenida mediante mediciones in situ sobre el desempeño térmico de sistemas indirectos de fachada verde en viviendas autoconstruidas ubicadas en climas áridos costeros como el de Lima. En consecuencia, el presente estudio busca abordar esta brecha mediante la evaluación térmica de un sistema indirecto de fachada verde a través de mediciones in situ y simulaciones térmicas.

El problema de investigación radica en el bajo confort térmico de las viviendas autoconstruidas en San Martín de Porres, causado por la ausencia de estrategias pasivas de regulación térmica, la limitada presencia de áreas verdes y las altas temperaturas urbanas. Estas viviendas, al haberse edificado sin criterios técnicos, presentan orientaciones inadecuadas, deficiente ventilación natural y una distribución espacial poco eficiente, lo que favorece la acumulación de calor en los ambientes interiores y afecta el bienestar de los ocupantes. En este contexto, se plantea la siguiente interrogante: ¿Cómo el diseño de un sistema indirecto de fachada verde mejora el confort térmico en viviendas multifamiliares?





Figura 1. Zona de estudio, SMP, Lima. Fuente: Google Earth.
Figura 2. Foto de la vivienda. Fuente: Elaboración de los autores.

El objetivo general del estudio es diseñar un sistema indirecto de fachada verde que mejore el confort térmico en una vivienda multifamiliar. Para ello, se identifican las condiciones climáticas de San Martín de Porres a partir de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), se desarrolla un prototipo liviano y de fácil instalación compatible con viviendas autoconstruidas, y se evalúa su desempeño térmico a través de mediciones in situ y simulaciones computacionales, que compara las temperaturas interiores antes y después de su implementación. Se plantea la hipótesis de que la implementación de un SGF en la vivienda permitirá reducir la temperatura interior en aproximadamente 23 °C, debido a la disminución de la radiación solar y la amortiguación térmica proporcionada por la cámara de aire y la vegetación, tal como señalan Abdeen y Rafaat (2024) y Suárez et al. (2020) respecto al potencial de las fachadas verdes para mejorar el confort térmico interior.

CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio se ubica en las coordenadas 12.026287° S, 77.082624° O, en el distrito de San Martín de Porres, Lima, Perú (Figura 1), y corresponde a una vivienda multifamiliar autoconstruida (Figura 2). La fachada principal, orientada hacia el sureste, está expuesta a radiación solar directa durante el verano, principalmente en horas de la mañana, lo que incrementa las ganancias térmicas de la envolvente y contribuye al aumento de la temperatura interior. Asimismo, en determinados ambientes, esta condición se asocia con temperaturas operativas superiores a 29 °C.

La edificación está resuelta mediante muros portantes de ladrillo pandereta de 15 cm de espesor, lo que restringe intervenciones que impliquen modificaciones sustanciales de la configuración constructiva. Esta condición limita la factibilidad de incorporar determinadas estrategias pasivas de acondicionamiento ambiental. Adicionalmente, la compacidad de la planta y las reducidas dimensiones de las aberturas restringen el potencial de ventilación natural e iluminación diurna, que favorecen la acumulación de calor en los espacios interiores.

METODOLOGÍA

Este proyecto adopta un enfoque cuantitativo que evalúa el impacto del sistema indirecto de fachada verde mediante el análisis de registros térmicos interiores, complementados con simulaciones computacionales. Su alcance es explicativo, pues busca identificar la relación causal entre la implementación del sistema indirecto de fachada verde, la reducción de la temperatura interior y superficial de los ambientes, y su eficacia frente a la radiación solar.

Se emplea un diseño cuasiexperimento, donde no se manipulan las condiciones del entorno y se compara el comportamiento térmico de los ambientes con y sin la presencia del sistema de fachada verde, lo que permite analizar sus efectos en condiciones reales. Asimismo, el diseño es transversal, ya que las mediciones térmicas se realizan en un periodo de tiempo específico, por lo que se analiza el comportamiento térmico de los ambientes en un momento determinado sin seguimiento longitudinal.

La población de estudio está conformada por viviendas multifamiliares de San Martín de Porres expuestas a la radiación solar. La muestra corresponde a un departamento del segundo piso, cuya orientación permite evaluar el desempeño térmico del sistema de fachada verde. Las mediciones se realizaron en los ambientes con frente a dicha fachada, al obtener datos detallados del comportamiento térmico en el caso de estudio

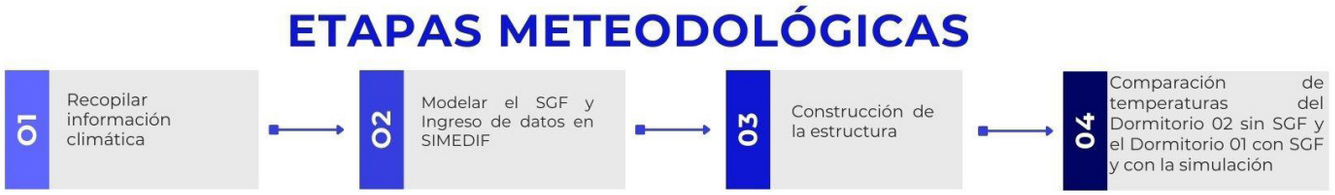


Figura 3. Fases metodológicas Fuente: Elaboración de los autores.

AÑO	2024				2025			
Mes	FEB	MAR	AGOST	SEPT	FEB	MAR	AGOST	SEPT
Temperatura Max.	31.9	29	20	21.3	29.5	29.4	20.6	23.2
Humedad	47.43	56.06	67.73	63.93	56.67	51.56	67.9	69.67

Tabla 1. Temperatura mensual en SMP (2024–2025) Fuente: Elaboración por los autores extraído con datos del SENAMHI (s.f.)

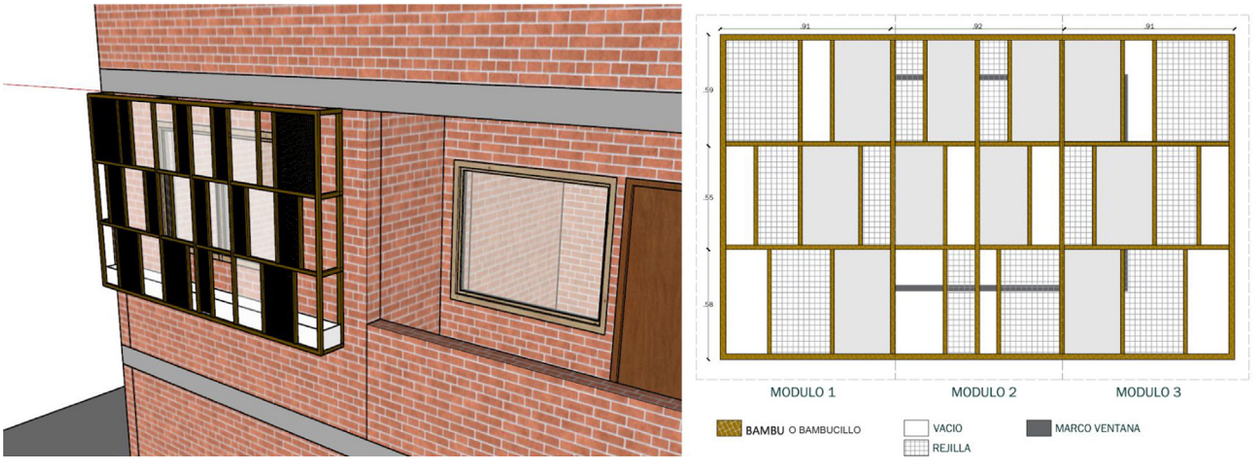


Figura 4. Modelación en SKP de la estructura y materialidad de la vivienda. Fuente: Elaboración de los autores.
Figura 5. Estructura SGF en AutoCAD. Fuente: Elaboración de los autores.

Las técnicas empleadas en la investigación se basan en modelos computacionales desarrollados principalmente en SIMEDIF, programa de simulación térmica que permite analizar el comportamiento térmico de ambientes según sus materiales, condiciones climáticas y características constructivas. También se utilizó AutoCAD y SketchUp, y mediciones con un termohigrómetro digital de uso interior, verificado mediante lecturas comparativas para registrar temperaturas interiores del prototipo.

A continuación, se presentan las etapas metodológicas empleadas en esta investigación, en las que se describe cada fase del proceso desde la recopilación de información y el modelado térmico hasta el análisis de datos y la evaluación del impacto de la fachada verde en el confort térmico (Figura 3).

PRIMERA FASE

Se recopilaron datos climáticos del distrito de San Martín de Porres a partir de los registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI] correspondientes al periodo 2024–2025, que considera temperatura máxima, temperatura promedio y humedad relativa en verano e invierno.

La Tabla 1 presenta las temperaturas mensuales, las que oscilan entre 20.6 °C y 29.5 °C, con picos en verano de 31.9 °C. Por ello, el análisis se centró en los meses de verano e invierno, periodos que presentan los valores más extremos. En función de ello, se seleccionaron los meses de noviembre, diciembre, febrero y agosto para evaluar el desempeño del sistema indirecto frente a dichas condiciones térmicas.



Figura 6. Ensamblaje del sistema estructural de bambú. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 7. Ensamblaje del sistema estructural del bambucillo e instalación al muro. Fuente: Elaboración de los autores.

SEGUNDA FASE

En la segunda etapa se definieron los materiales y se desarrollaron los prototipos del sistema indirecto. Para la estructura, se consideró el bambú por su resistencia, sostenibilidad y facilidad constructiva. Se elaboraron dos prototipos iniciales: uno de bambú, de mayor complejidad en su ejecución, y otro de bambucillo, que resultó ser más liviano y sencillo de manejar. Ambos fueron modelados en 3D en AutoCAD y SketchUp (Figura 4 y Figura 5). Asimismo, se seleccionaron especies trepadoras Epipremnum aureum con un crecimiento de LAI ≈ 2,5, Vinca major, Ficus pumila y Hedera helix LAI ≈ 2,5 por su resistencia a la radiación solar directa, considerando el empleo de vegetación trepadora sobre estructuras de soporte, una configuración característica de los sistemas indirectos de fachada verde.

Por otro lado, se utilizó el software SIMEDIF para la simulación térmica, en donde se definieron tres zonas térmicas dormitorio 1, dormitorio 2 y sala, según los datos de la Tabla 2. En la simulación se incorporaron los parámetros de la Tabla 3, donde se especifican las características de muros y pisos, como la conductancia, la transmitancia

LOCAL	ÁREA DE SUELO m²	VOLUMEN m³
Dormitorio 1	10.61	31.09
Sala / comedor	9.09	51.024
Dormitorio 2	11.21	30.67

Tabla 2. Características de las zonas térmicas. Fuente: Elaboración de los autores.

PARED MACIZA	ABSORTANCIA SOLAR	W/m²-K	ESPESOR (m)
Exterior	0.55	8	0.12 y 0.30
Interior	0.15	6	0.12
Piso	0.3	0.01	0.20
Techo	0.4	6	0.20

Tabla 3. Propiedades térmicas. Fuente: Elaboración de los autores.

térmica (U) y la inercia térmica. Asimismo, se ingresaron las dimensiones del sistema indirecto 2.5 × 4.5 m para evaluar su comportamiento térmico durante el modelado.

Para la fachada verde se propuso la planta Hedera helix con un largo de hoja de 0.15m, con una resistencia estomática de 160 s/m y una renovación de aire en verano de 23 1/h y en invierno una renovación de 5 1/h.

TERCERA FASE

Esta fase tuvo como objetivo construir el prototipo del SGF y verificar su viabilidad constructiva e integración con la vegetación.

En la tercera etapa se construyeron dos prototipos. El primer prototipo, de bambú (2.5 x 1.70 m), requirió un proceso previo de secado y un ensamblaje complejo con cortes tipo boca de pescado, se utilizaron espárragos, arandelas y tuercas para garantizar estabilidad (Figura 6). El segundo prototipo, fabricado con bambucillo de 1 1/2", empleó amarres tipo aspas con cintillo, lo que permitió no solo replicar el diseño original sino también ampliar sus dimensiones a 2.5 × 4.5 m, gracias a su menor peso. Finalmente, la estructura fue barnizada para mejorar su durabilidad y resistencia a la humedad (Figura 7).

CUARTA FASE

En esta fase se llevó a cabo la comparación de la temperatura del aire interior. Para ello, se empleó la zona térmica 03 como ambiente de referencia, donde se midió la temperatura sin intervención. Posteriormente, se realizó una comparación con la zona térmica 1, en el que estaría instalado el sistema indirecto de fachada verde (Figura 8). Esta elección se fundamenta en que ambos dormitorios presentan la misma distribución espacial, dimensiones y tamaño de vano de ventana, lo que minimiza la influencia de variables geométricas en los resultados y asegura la comparabilidad entre ambos ambientes. Además, se contrastarán los resultados de estas condiciones reales con los derivados de la simulación térmica, para verificar la eficiencia del sistema propuesto.

Las mediciones se efectuaron con un termohigrómetro digital MDL 2140, con un rango de medición de temperatura de -50 °C a +70 °C y tolerancia de ±1 °C en el rango de 0 °C a +40 °C, se registraron datos cada cuatro horas cada cuatro horas (8:00, 14:00 y 20:00) durante el periodo comprendido entre el 1 de noviembre y el 12 de diciembre del 2025, seleccionado por representar condiciones climáticas cálidas características de la zona de estudio.

El sensor se ubicó a 1.10 m sobre el nivel del piso y a una distancia mínima de 1.0 m del muro de fachada, se siguieron los criterios de la norma UNE-EN ISO 7726, con el fin de representar la zona ocupada y evitar

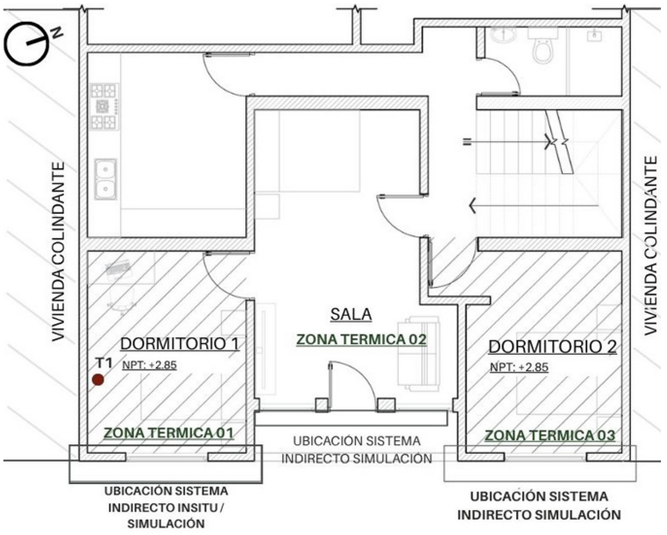


Figura 8. Plano vivienda y ubicación del termohigrómetro. Fuente: Elaboración de los autores.

interferencias por radiación superficial. Durante las mediciones, el dormitorio se mantuvo sin ocupación y con puertas y ventanas cerradas. No se utilizó ventilación mecánica, y las mediciones se realizaron en días sin clima atípico, como lluvias o vientos intensos, para asegurar condiciones comparables antes y después del sistema. Previamente al registro, se verificaron el equipo con lecturas comparativas en un mismo ambiente para comprobar la estabilidad de los datos.

Los datos obtenidos se organizaron en hojas de cálculo y se analizaron mediante perfiles horarios, lo que permitió evaluar la variación térmica generada por el sistema implementado y contrastar el comportamiento térmico real del ambiente con los resultados de la simulación.

RESULTADOS

Para el análisis, se consideraron dos escenarios: el modelo base sin intervención y el modelo con la implementación del SGF. Ambos fueron evaluados mediante el programa SIMEDIF, al cual se le ingresaron datos térmicos y técnicos de muros y ventanas, complementados con mediciones reales de temperatura interior. Finalmente, se compararon los resultados de la simulación con los del prototipo in situ.

MODELO BASE

La Figura 9 muestra el pronóstico de la temperatura del aire interior en las zonas térmicas evaluadas antes de la implementación de la fachada verde, correspondientes a los meses de noviembre, diciembre, febrero y agosto. Los resultados evidencian un incremento estacional de

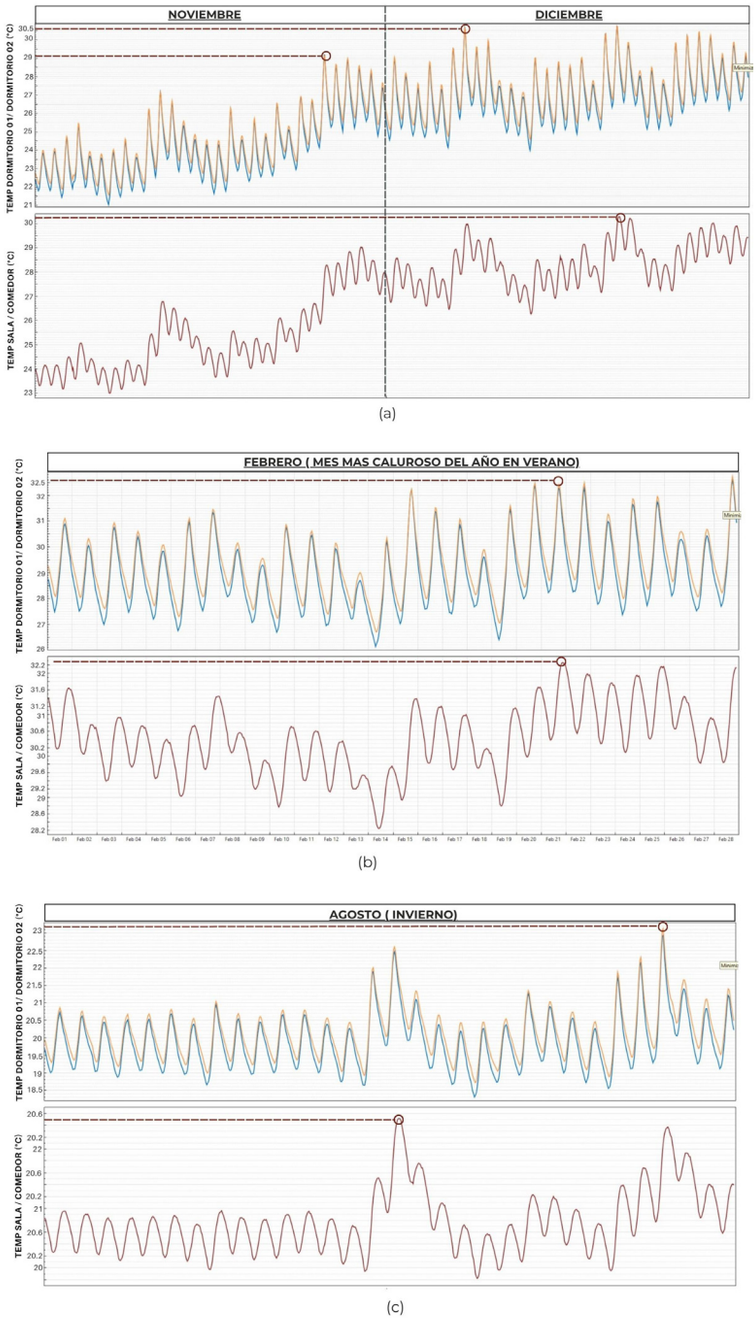


Figura 9. Temperatura superficial de las zonas térmicas sin la implementación del SGF en los 4 meses analizados. Fuente: Elaboración de los autores con datos del SIMEDIF.

la temperatura interior desde el periodo invernal hacia el periodo de verano, con la condición térmica más desfavorable en febrero. En este mes, el Dormitorio 01 registró la temperatura máxima más alta (32,5 °C), seguido por el Dormitorio 02 con valores similares, mientras que la Sala alcanzó un máximo de 32,0 °C. En diciembre, las temperaturas máximas se situaron en un rango de 30,0-30,5 °C, mientras que en noviembre variaron entre 28,5 y 29,0 °C. En contraste, durante agosto, correspondiente al periodo de menor exigencia térmica, las temperaturas descendieron a un intervalo de 22,5-23,0 °C.

En términos comparativos, las diferencias entre ambientes fueron menores a 1,0 °C en todos los meses analizados, lo que indica una respuesta térmica interior homogénea. Este comportamiento sugiere que la variación espacial de la temperatura es reducida y que el sobrecalentamiento observado se manifiesta de manera relativamente uniforme en la vivienda evaluada.

Complementariamente, la Figura 10 presenta la distribución horaria de la temperatura interior mediante mapas de calor, que permite identificar el patrón de

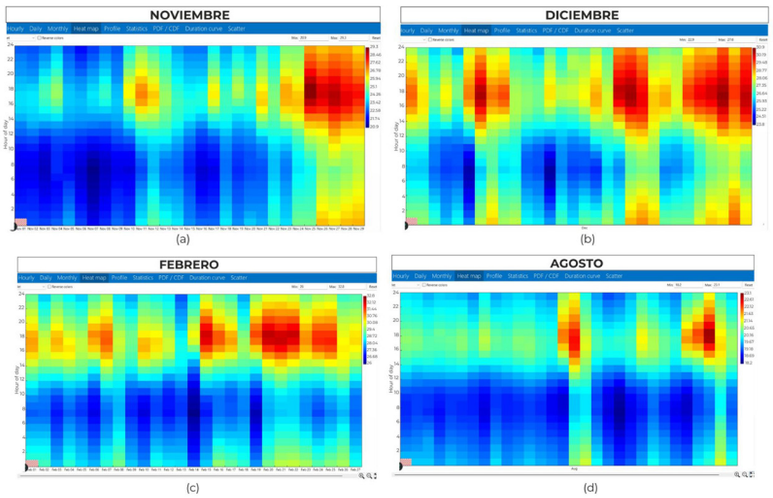


Figura 10. Mapa de calor por rango de horario sin SGF. Fuente: Elaboración de los autores con datos del SIMEDIF.

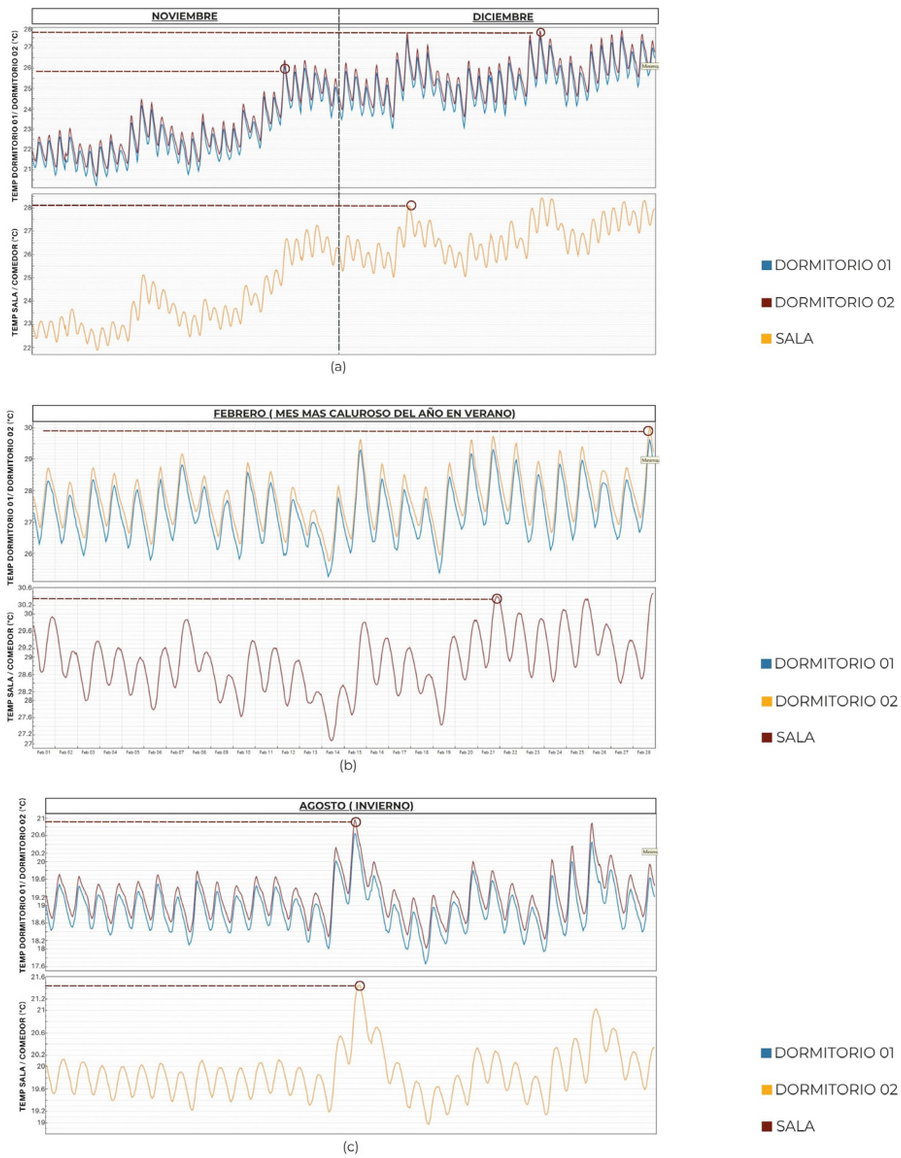


Figura 11. Resultado de simulación de temperatura con el SGF. Fuente: Elaboración de los autores con datos del SIMEDIF.

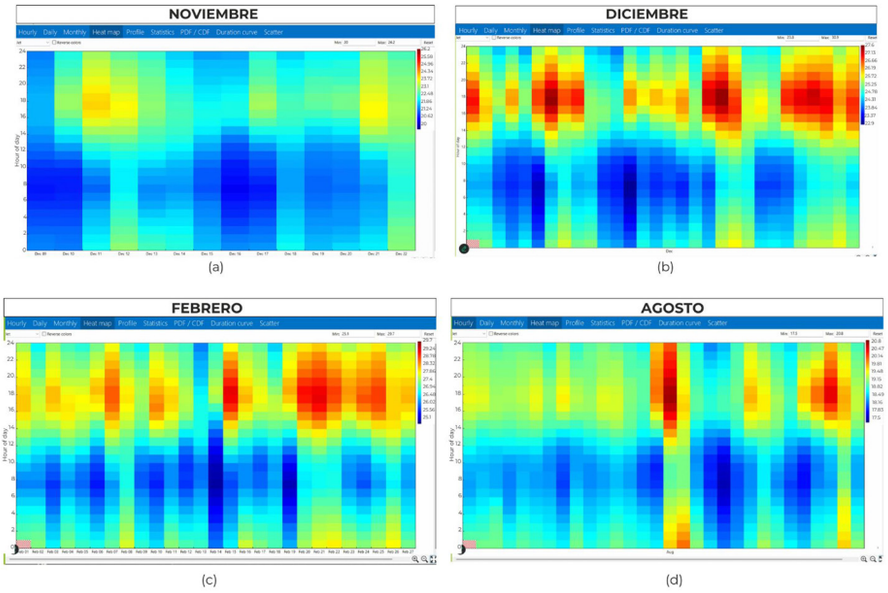


Figura 12. Mapa de calor con rango de horario de las 3 zonas térmicas con el SGF Fuente: Elaboración de los autores con datos del SIMEDIF.

evolución térmica diaria en los cuatro meses analizados. En todos los casos, la temperatura se incrementa progresivamente desde las primeras horas de la mañana y alcanza valores cercanos a 25 °C antes del mediodía. No obstante, el periodo de mayor exigencia térmica se concentra entre las 14:00 y 18:00 hrs., intervalo en el que los tres ambientes alcanzan simultáneamente sus valores máximos. Este comportamiento confirma la existencia de un desfase térmico diurno y permite identificar dicha franja como el periodo crítico de acumulación térmica en el interior de la vivienda.

MODELO CON IMPLEMENTACIÓN SGF

La Figura 11 muestra el comportamiento térmico interior posterior a la implementación del Sistema de Fachada Verde (SGF) en los ambientes evaluados. En comparación con el escenario base, se observa una reducción de las temperaturas máximas en todos los casos analizados. En el Dormitorio 02, los valores máximos se situaron en 21.4 °C en agosto, 26.0 °C en noviembre, 28.5 °C en diciembre y 30.0 °C en febrero, manteniéndose este último como el mes de mayor exigencia térmica. No obstante, aún bajo esta condición, la temperatura media registrada en febrero se mantuvo alrededor de 28 °C, evidenciándose una atenuación del sobrecalentamiento respecto del escenario sin SGF.

En los Dormitorios 01 y 02, la temperatura promedio durante noviembre fue de aproximadamente 22.8 °C, lo que representa una disminución cercana a 2 °C respecto del escenario sin intervención. En términos comparativos, este descenso fue consistente en ambos ambientes, lo que confirma una reducción uniforme de la carga térmica en espacios de permanencia prolongada.

El análisis del perfil térmico horario de 24 horas indica que los máximos diarios continúan concentrándose entre las 14:00 y 16:00 h, es decir, dentro de la franja de mayor exigencia térmica del día. Sin embargo, la magnitud de estos picos resulta menor que en el caso sin SGF, lo que evidencia un efecto de amortiguamiento térmico del sistema.

Complementariamente, la Figura 12 presenta los mapas de calor horarios, en los que se identifica un descenso progresivo de la temperatura interior durante el periodo nocturno. Los valores medios en esta franja fueron aproximadamente 22 °C en noviembre, 26 °C en diciembre, 27 °C en febrero y 18 °C en agosto. En conjunto, estos resultados muestran que la implementación del SGF reduce la intensidad del sobrecalentamiento diurno y modifica el patrón de enfriamiento interior a lo largo del ciclo diario.

Se compararon los resultados obtenidos mediante simulación térmica en el software SIMEDIF y las mediciones in situ con el objetivo de evaluar el comportamiento térmico del Sistema de Fachada Verde indirecta (SGF) en los Dormitorios 01 y 02. La Tabla 4 presenta el perfil horario de temperatura interior con y sin la implementación del sistema durante los meses de noviembre y diciembre, considerándose ambos métodos de evaluación.

Las mediciones se realizaron bajo las mismas condiciones temporales, se analizaron los primeros y últimos tres días de cada mes a las 14:00 y 20:00 horas, correspondientes

FECHA	DORMITORIO 01 SIN SGF		DORMITORIO 01 CON SGF	
	14:00PM	20:00PM	14:00PM	20:00 PM
01/11/2025	22.8°C	21.5°C	21.2°C	19.4°C
02/11/2025	23.6°C	21.9°C	22. 3°C	20.9°C
03/11/2025	22.5°C	20.9°C	21.5°C	19.2°C
28/11/2025	24.9°C	23.5°C	22.7°C	21.3°C
29/11/2025	24.2°C	22.8°C	22.2°C	21.4°C
30/11/2025	25.3°C	24.8°C	23.4°C	22.8°C
01/12/2025	24.4°C	22.6°C	22,3°C	20.9°C
02/12/2025	24.8°C	23.6°C	23,2°C	22.5°C
03/12/2025	25.5°C	22.9°C	23.5°C	22.9°C

Tabla 4. Comparación de temperaturas con y sin SGF, mediante medición in situ en noviembre y diciembre. Fuente: Elaboración de los autores.

FECHA	DORMITORIO 01 SIN SGF SIMEDIF		DORMITORIO 01 CON SGF SIMEDIF	
	14:00PM	20:00PM	14:00PM	20:00 PM
01/11/2025	23.7°C	23.1°C	22.24°C	22.04°C
02/11/2025	23.83°C	22.96°C	22.36°C	21.89°C
03/11/2025	24.12°C	23.49°C	22.34°C	22.06°C
28/11/2025	28.03°C	27.39°C	25.43°C	25.51°C
29/11/2025	27.54°C	26.97°C	25.3°C	25.08°C
30/11/2025	27.14°C	26.32°C	24.89°C	24.63°C
01/12/2025	28.05°C	27.41°C	25.44°C	24.27°C
02/12/2025	27.88°C	26.87°C	25.51°C	25.13°C
03/12/2025	26.65°C	26.33°C	24.69°C	24.59°C

Tabla 5. Comparación de temperaturas con y sin sistema de fachada verde (SGF) en el Dormitorio 01 mediante simulación en SIMEDIF. Fuente: Elaboración de los autores.

al periodo de máxima carga térmica diurna y al periodo nocturno de liberación del calor acumulado. En ambos métodos se registraron temperaturas interiores menores en el escenario con SGF respecto al caso sin intervención (Tabla 4 y Tabla 5).

En las mediciones *in situ*, la diferencia promedio de temperatura interior entre ambos escenarios fue cercana a 2 °C, se alcanzaron reducciones máximas de hasta 3 °C, con mayores diferencias registradas en horario nocturno.

Por su parte, la simulación desarrollada en SIMEDIF evidenció disminuciones comprendidas entre 1 °C y 2.5 °C, manteniéndose un comportamiento térmico similar en los horarios evaluados y variaciones leves entre los días analizados. Durante el mes de noviembre se observaron las mayores diferencias térmicas, principalmente en horas de la tarde.

De manera general, ambos métodos muestran una tendencia consistente hacia menores temperaturas

interiores asociadas a la incorporación del SGF en todos los casos evaluados (Tabla 4 y Tabla 5).

DISCUSIONES

La simulación térmica desarrollada en SIMEDIF permitió identificar el comportamiento del sistema indirecto de fachada verde frente al sobrecalentamiento en la vivienda analizada. En el escenario base, el Dormitorio 01 presentó la condición más crítica, con temperaturas máximas de hasta 32.5 °C en febrero, mientras que la incorporación del sistema produjo una reducción aproximada de 3 °C. Este desempeño sugiere que el sistema atenúa la ganancia térmica a través del sombreamiento vegetal y del efecto amortiguador de la cámara de aire, que contribuyen a moderar la temperatura interior. Este comportamiento coincide con lo señalado por Manso y Castro-Gomes (2015), quienes indican que los sistemas de muros verdes mejoran el microclima de la envolvente mediante la provisión de sombra, el aislamiento complementario y el enfriamiento evaporativo generado por la vegetación. Asimismo, Perini et al. (2011) sostienen que la presencia de una capa de aire entre la cobertura vegetal y la fachada puede incrementar la resistencia térmica de la envolvente y reducir la transferencia de calor hacia los espacios interiores, reforzando el efecto de protección térmica observado en el presente estudio.

Las mediciones in situ confirmaron una disminución térmica durante las horas de mayor exigencia, con reducciones cercanas a 2 °C, manteniendo una tendencia consistente con la simulación. Esta correspondencia refuerza la solidez del comportamiento observado y coincide con lo reportado por Suárez et al. (2020) sobre la capacidad de las fachadas verdes para reducir la transferencia de calor hacia el interior. De manera similar, Padovan et al. (2022) registraron una reducción promedio de 4.4 °C en la temperatura interior del aire, con disminuciones máximas de hasta 7.3 °C en ambientes protegidos mediante una fachada verde indirecta. Asimismo, Susorova et al. (2013) señalan que la vegetación reduce la temperatura superficial de la fachada y limita la transferencia de calor por conducción hacia el interior del edificio, contribuyendo a disminuir las cargas térmicas en los espacios protegidos. En este marco, los hallazgos respaldan la hipótesis de investigación al mostrar que las fachadas verdes pueden reducir la ganancia térmica en viviendas autoconstruidas, aunque su eficacia depende de variables de contexto como la radiación incidente, la orientación y la ventilación. A diferencia de estudios previos desarrollados con sistemas más industrializados, este caso demuestra que es posible obtener mejoras térmicas medibles mediante soluciones de baja complejidad constructiva y con materiales localmente disponibles. Esta observación resulta consistente con Perini et al. (2011), quienes señalan que los sistemas indirectos de fachada verde pueden implementarse mediante diversas estructuras de soporte y materiales, manteniendo beneficios térmicos sobre la envolvente sin requerir necesariamente sistemas modulares complejos o de alta tecnología.

Las limitaciones del estudio deben considerarse al interpretar sus resultados. En el plano metodológico, la evaluación se concentró en un número reducido de ambientes, lo que restringe el alcance de la generalización. En el plano instrumental, el análisis se basó principalmente en la temperatura del aire, sin incorporar variables adicionales de confort térmico, como humedad relativa, velocidad del aire o temperatura radiante. A ello se suma que la simulación empleó parámetros estandarizados que simplifican la complejidad del entorno urbano, por lo que pueden persistir diferencias entre el comportamiento modelado y el comportamiento real del sistema.

Desde el punto de vista constructivo, la implementación del prototipo permitió identificar diferencias relevantes entre los materiales empleados. El uso de bambú de 3 pulgadas presentó limitaciones asociadas al peso del sistema, que dificultaron su aplicación en edificaciones precarias, mientras que el bambucillo de 1 1/2 pulgada mostró una mejor adecuación como alternativa estructural ligera. Esta observación no solo tiene implicancias prácticas para la viabilidad del sistema, sino que también amplía la discusión sobre la adaptabilidad de las fachadas verdes en contextos de autoconstrucción y restricciones estructurales.

En conjunto, el estudio demuestra que el sistema de fachada verde puede mejorar el desempeño térmico de viviendas de bajo costo mediante una estrategia pasiva técnicamente viable y constructivamente adaptable. Su principal contribución radica en aportar evidencia cuantitativa sobre el comportamiento del sistema en un clima húmedo-costero como el de San Martín de Porres, Lima, donde la efectividad de estas soluciones ha sido poco explorada. Asimismo, la incorporación de bambucillo como alternativa liviana ofrece un aporte aplicado al diseño de soluciones pasivas replicables en contextos urbanos similares.

CONCLUSIONES

La evaluación del sistema indirecto de fachada verde (SGF) evidenció una mejora del comportamiento térmico interior respecto al escenario sin intervención. En el modelo base, las simulaciones mostraron temperaturas interiores máximas de hasta 32.5 °C en febrero, el mes más cálido, en espacios orientados a ESE, con picos entre las 14:00 y 18:00 hrs. Tras la implementación del SGF, se registró una reducción de las temperaturas máximas de hasta 7.7 % en la sala y valores similares en los dormitorios, junto con una mayor estabilidad térmica. Este efecto fue más notorio durante las horas de mayor

carga térmica (14:00–16:00 h), al atenuar los picos de sobrecalentamiento.

La comparación entre las simulaciones térmicas y las mediciones in situ mostró una tendencia coherente. En el dormitorio evaluado, el SGF redujo la temperatura interior en aproximadamente 2 °C en condiciones reales, mientras que la simulación en SIMEDIF indicó una disminución cercana a 3 °C. Esta diferencia se debe a que el modelo asume una cobertura vegetal completamente desarrollada, mientras que en campo la vegetación se encontraba en una etapa de crecimiento intermedia, lo que atenúa el efecto térmico observado.

En los meses de invierno, el sistema contribuyó a mantener temperaturas interiores más estables, con valores comprendidos entre 20.5 °C y 21.4 °C, evitándose descensos bruscos durante el periodo nocturno, donde se registraron mínimos cercanos a 18 °C. Este comportamiento sugiere que el SGF no solo reduce el sobrecalentamiento estival, sino que también favorece una mayor estabilidad térmica estacional.

En este contexto, la implementación de estrategias pasivas como el sistema indirecto de fachada verde representa una alternativa accesible para mejorar las condiciones de habitabilidad en viviendas autoconstruidas de alta densidad urbana, donde las limitaciones técnicas y económicas dificultan la incorporación de soluciones más complejas. Su aplicación permite reducir la carga térmica interior y disminuir la dependencia de sistemas mecánicos de climatización.

Finalmente, la principal contribución de este estudio radica en demostrar que un sistema de fachada verde puede mejorar el comportamiento térmico de viviendas autoconstruidas de bajo costo, que aportan evidencia aplicada para el desarrollo de estrategias pasivas de acondicionamiento ambiental. Asimismo, el trabajo amplía el conocimiento sobre el desempeño de estos sistemas en climas húmedos costeros, como el de Lima, donde su eficacia suele reportarse como más limitada en comparación con otros contextos climáticos, pero donde, aun así, se identificaron mejoras térmicas cuantificables.

Adicionalmente, el estudio incorpora el uso de bambucillo como una alternativa viable para estructuras livianas, lo que incrementa la factibilidad constructiva del sistema en viviendas con restricciones estructurales. En conjunto, estos hallazgos aportan criterios técnicos y constructivos que pueden orientar el diseño, adaptación e implementación de soluciones pasivas en entornos urbanos con características edilicias y climáticas similares.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, A.E.A. y A.T.H.; Curación de datos, A.E.A. y A.T.H.; Análisis formal, A.E.A. y A.T.H.; Adquisición de financiación A.E.A. y A.T.H.; Investigación, A.E.A. y A.T.H.; Metodología, A.E.A .y A.T.H. y V.M.A.; Administración de proyecto; Recursos; Software. A.E.A. y A.T.H.; Supervisión, V.M.A.; Validación, V.M.A.; Visualización, V.M.A.; Escritura – borrador original, A.E.A., A.T.H. y V.M.A.; Escritura – revisión y edición, A.E.A. y A.T.H. y V.M.A.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdeen, N., & Rafaat, T. (2024). Assessing vertical green walls for indoor corridors in educational buildings and its impact outdoor: A field study at the universities of Canada in Egypt. *Results in Engineering,* 21, 101838. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101838

Barros, P. P. M., & Menacho Casimiro, E. E. (2014). Modificaciones térmicas en Lima: Análisis de la isla de calor urbana. *Anales Científicos, 75*(1), 90–99. https://doi.org/10.21704/ac.v75i1.952

Bustami, R. A., Belusko, M., Ward, J., & Beecham, S. (2018). Vertical greenery systems: A systematic review of research trends. *Building and Environment, 146*, 226–237. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.09.045

Domínguez Cicorio, C. E., García Solorzano, L. A., & Ruíz Torres, R. P. (2022). Monitoreo térmico de barrera vertical con vegetación, evaluando el desempeño a través de la experimentación y herramienta de simulación. *Revista de ciencias tecnológicas, 5*(1), e94. https://recit.uabc.mx/index.php/revista/article/view/94

El Menshawy, A. S., Mohamed, A. F., & Fathy, N. M. (2022). A comparative study on green wall construction systems: Case study of South Valley campus of AASTMT. *Case Studies in Construction Materials, 16*, e00808. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00808

Faragallah, R. N., & Ragheb, R. A. (2022). Evaluation of thermal comfort and urban heat island through cool paving materials using ENVI-Met. *Ain Shams Engineering Journal*, *13*(3), 101609. https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2021.10.004

Gómez, A., Esenarro, D., Martinez, P., Vilchez, S., & Raymundo, V. (2023). Thermal Calculation for the Implementation of Green Walls as Thermal Insulators on the East and West Facades in the Adjacent Areas of the School of Biological Sciences, Ricardo Palma University (URP) at Lima, Peru 2023. *Buildings*, *13*(9). https://doi.org/10.3390/buildings13092301

Lesjak, V., Pajek, L., & Košir, M. (2020). Indirect green façade as an overheating prevention measure. *Gradevinar*, *72*(7), 569–583. https://doi.org/10.14256/JCE.2797.2019

Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *41*, 863–871. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.07.203

Marchioretto, J., Pereira Junior, A. C., Nozawa, I. A., & Fontes, M. S. G. de C. (2023). Fachadas verdes: potencial de sombreamento e atenuação solar da espécie Merremia dissecta. *Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído*, *17*(1), 1–10. https://doi.org/10.46421/encac.v17i1.3848

Padovan, L. D. G., Fontes, M. S. G. de C., & Barbosa, M. C. (2022). Influência térmica da fachada verde no ambiente interno. *PARC: Pesquisa Em Arquitetura E Construção*, *13*, e022005. https://doi.org/10.20396/parc.v13i00.8661203
Perini, K., Ottelé, M., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011) Greening the building envelope, facade greening and living wall systems. *Open Journal of Ecology*, *1*(1), 1-8. http://www.doi.org/10.4236/oje.2011.11001

Ramadhan, A. M., & Mahmoud, A. H. (2023). Evaluating the efficiency of a living wall façade as a sustainable energy-saving alternative in hot arid regions. *Journal of Engineering and Applied Science, 70*(96), 1–25. https://doi.org/10.1186/s44147-023-00259-9

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI]. (s.f.). Ministerio del Ambiente Pronóstico del Tiempo a nivel Nacional. https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-meteorologico

Soberón Forsberg, V. S., & Obregón Párraga, E. (2016). Identificación de islas de calor en la ciudad de Lima Metropolitana utilizando imágenes del satélite landsat 5TM. *Anales Científicos*, *77*(1), 34-44. https://doi.org/10.21704/ac.v77i1.475

Suárez, P. A., Cantón, M. A., & Correa, É. (2020). Desempeño térmico de fachadas verdes tradicionales de orientación este en viviendas seriadas emplazadas en climas áridos. *Revista Hábitat Sustentable*, *10*(2), 82–93. https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.06

Suárez, P., Cantón, M. A., & Correa, É. (2023). Comportamiento térmico estacional de fachadas verdes conformadas por especies trepadoras perennes en muros másicos orientados al oeste. Estudio de casos en zonas áridas. *Cuaderno Urbano, 35*(35). https://doi.org/10.30972/crn.35356773

Susorova, I., Angulo, M., Bahrami, P., & Brent Stephens. (2013). A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. *Building and Environment*, *67*, 1–13. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2013.04.027

Tudiwer, D., & Korjenic, A. (2017). The effect of living wall systems on the thermal resistance of the façade. *Energy and Buildings, 135*, 10–19. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.023

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 56 - 69
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.04

OPTIMIZACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO DE UNA CASA ECOLÓGICA: MODELAMIENTO EN OPENFOAM DE MUROS SANDWICH CON AISLANTE DE ICHU (STIPA ICHU)

Recibido 03/03/2026
Aceptado 27/05/2026

OPTIMIZATION OF THE THERMAL COMFORT OF AN ECO-FRIENDLY HOUSE: OPEN FOAM MODELING OF SANDWICH-TYPE WALLS WITH ICHU (STIPA ICHU) INSULATION

OTIMIZAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO DE UMA CASA ECOLÓGICA: MODELAGEM NO OPENFOAM DE PAREDES SANDWICH COM ISOLAMENTO DE ICHU (STIPA ICHU)

Henry Javier-Ninahuaman (Autor de Correspondencia)
Doctor en Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible
Docente, Facultad de Ingenieria, Escuela Profesional de Ingenieria Agroindustrial
Universidad Tecnológica del Perú
Huancayo, Perú
https://orcid.org/0000-0002-3864-4181
C21259@utp.edu.pe

Jose Rojas-Guillén
Doctor en Ciencias de la Educación
Docente, Departamento de Ingeniería
Universidad Tecnológica del Perú
Huancayo, Perú
https://orcid.org/0009-0002-3210-07622
c27875@utp.edu.pe

Kenny Montalvo-Morales
Magíster en agronegocios
Docente, Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial
Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma
Tarma, Perú
https://orcid.org/0000-0003-4403-4360
kmontalvo@unaat.edu.pe

Grimaldo Quispe-Santivañez
Doctor en Ingeniería
Docente e investigador, Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial
Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma
Tarma, Perú
https://orcid.org/0000-0001-6168-8935
gquispe@unaat.edu.pe

CC BY SA

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 56 - 69
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.04

RESUMEN

El uso de materiales sostenibles es una alternativa importante para lograr el confort térmico en viviendas ubicadas en climas fríos. El estudio realiza un análisis por dinámica de fluidos computacional (CFD) en OpenFoam de una casa ecológica, con el fin de optimizar las paredes de tipo sándwich (maderba/ichu/maderba) mediante la metodología de superficie de respuesta en un diseño central completo, para lograr confort térmico en entornos de frío extremo mediante el índice de predicción de voto medio (PMV). La evaluación recogió datos de una estación meteorológica in situ, los validó, simuló y predijo su desempeño a temperaturas ambientales de frío extremo. Los resultados indican el grosor de pared óptimo para el confort térmico en la casa ecológica con temperaturas externas de -10 °C y -20 °C y, además, explican los efectos complejos del comportamiento de la temperatura externa sobre el PMV. EL estudio proporciona las medidas mínimas óptimas de la pared tipo sándwich (maderba/ichu/maderba) que logran preservar el confort térmico.

Palabras clave
aislamiento térmico, materiales de construcción, dinámica de fluidos computacional, bioclimatismo, vivienda rural

ABSTRACT

The use of sustainable materials is an important means of achieving thermal comfort in homes in cold climates. The study performs CFD (computational fluid dynamics) analysis in OpenFOAM of an eco-friendly house to optimize the sandwich-type walls (wood chipboard/stipa ichu/wood chipboard) using response surface methodology in a complete central design, to achieve thermal comfort in extreme cold environments using the PMV average vote prediction index. The evaluation collected data from an on-site weather station, validated it, simulated it, and predicted its performance at extreme cold ambient temperatures. The results indicate the optimal wall thickness for thermal comfort in the eco-friendly house at external temperatures of -10 °C and -20 °C, and explain the complex effects of external temperature on PMV. The study concludes by providing the optimal minimum dimensions of the sandwich-type wall (wood chipboard/stipa ichu/wood chipboard) that preserve thermal comfort.

Keywords
thermal insulation, construction materials, computational fluid dynamics, bioclimatism, rural housing

RESUMO

O uso de materiais sustentáveis constitui uma alternativa importante para garantir o conforto térmico em residências localizadas em climas frios. O presente estudo realiza uma análise por dinâmica de fluidos computacional (CFD) no programa OpenFoam de uma casa ecológica, com o objetivo de otimizar as paredes do tipo sanduíche (madeira/ichu/madeira) por meio da metodologia de superfície de resposta em um projeto central completo, para alcançar o conforto térmico em ambientes extremamente frios, utilizando o índice de previsão de votação média (PMV). A avaliação coletou dados de uma estação meteorológica in situ, validou-os, simulou-os e previu seu desempenho em condições de temperatura ambiente extremamente baixa. Os resultados indicam a espessura ideal da parede para o conforto térmico na casa ecológica em contextos com temperaturas externas de -10 °C e -20 °C, além de explicar os efeitos complexos do comportamento da temperatura externa sobre o PMV. O estudo fornece as medidas mínimas ideais para paredes do tipo sanduíche capazes de preservar o conforto térmico.

Palavras-chave
isolamento térmico, materiais de construção, dinâmica de fluidos computacional, bioclimatismo, habitação rural

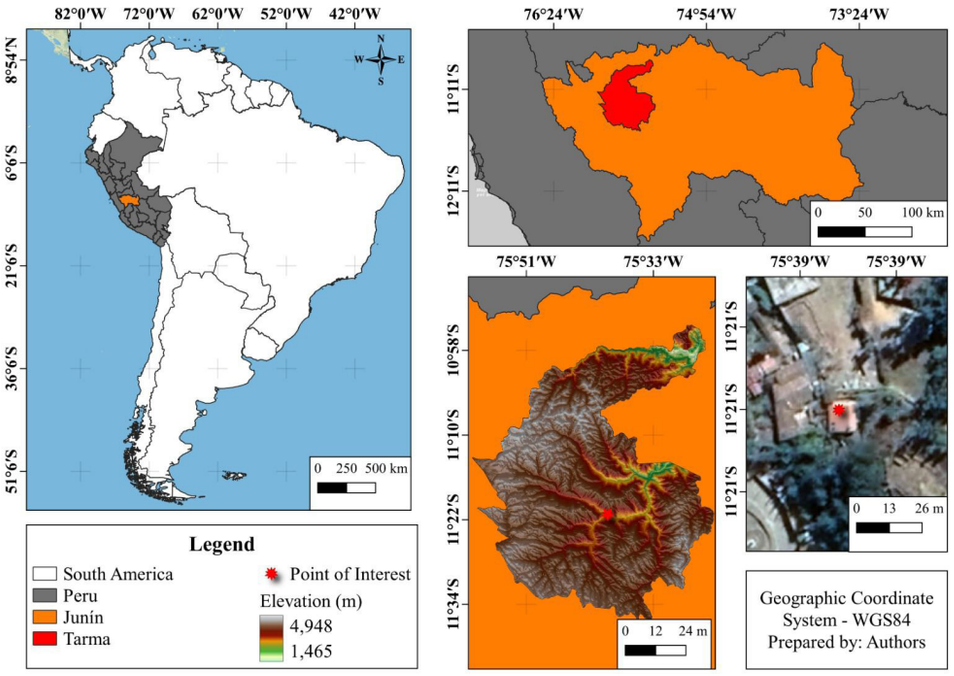


Figura 1. Ubicación de la unidad experimental: casa ecológica en Muruhuay - Perú. Fuente: Elaboración de los autores.

INTRODUCCIÓN

El confort térmico es un factor clave para garantizar condiciones de vida adecuadas y reducir la demanda energética en las viviendas de climas fríos, especialmente en regiones altoandinas, donde las temperaturas pueden descender drásticamente durante la noche, estas zonas constan de viviendas convencionales que suelen presentar problemas de aislamiento térmico, lo que aumenta la dependencia de fuentes de calefacción, que generan altos costos (Marchante González & González Santos, 2020). Estos costos energéticos son los causantes de la llamada pobreza energética, cuyos efectos sobre la salud y la economía de los habitantes está ampliamente documentada (Hills, 2012).

El uso de materiales sostenibles y de origen local se presentan como una alternativa eficiente para mejorar el desempeño térmico de las construcciones (Ortiz Caicedo et al., 2023). En las zonas altoandinas de Perú o Bolivia se cuenta con el ichu (*Stipa ichu*), esta fibra es una gramínea autóctona de los Andes, crece en altitudes superiores a los 3500 m s.n.m. es un recurso clave para la construcción, la alimentación de ganado y la conservación del suelo. El ichu crece en suelos pobres y con escasa humedad, tolera temperaturas extremas, desde heladas hasta radiación solar intensa, además de ser resistente a vientos fuertes y precipitaciones (Charca et al., 2015). Sus fibras son ligeras, flexibles y de fácil manejo, son huecas lo que permite que el núcleo de aire estático en su interior le confiera baja conductividad térmica, pues actúan como micro-barreras térmicas que reducen la transferencia de calor por conducción, como resultado, permite la reducción de la pérdida de calor en climas fríos (Frías et al., 2020; Piñas et al., 2020).

A pesar de sus beneficios, el uso del ichu en la construcción aún presenta desafíos, especialmente en lo que respecta a la optimización de su volumen en el espesor. La falta de estudios técnicos detallados ha limitado su aplicación al tipo de construcciones tradicionales sin criterios cuantificables de eficiencia. Por ello, es necesario analizar su comportamiento térmico mediante herramientas avanzadas, que permitan evaluar su desempeño en diferentes configuraciones, este estudio propone la optimización del confort térmico por medio de la variación del espesor de las paredes de ichu en viviendas ecológicas mediante simulación CFD (Computational Fluid Dynamics) (Moreno-Casas et al., 2020).

METODOLOGÍA

La investigación tiene un flujo que inicia con las mediciones In-situ (temperatura y humedad), lo que permitió implementar el modelo y verificar la veracidad de la simulación, por lo que se procedió a la validación con el índice del error absoluto medio entre el Modelo CFD y la realidad. Posterior a ello se siguió el diseño estadístico para usar los datos de simulación de temperatura externa y grosores de pared para calcular el PMV y optimizar el confort térmico por Superficie de Respuesta (RSM).

La casa ecológica para el análisis del confort térmico y validación del modelo se localiza en el Centro Poblado

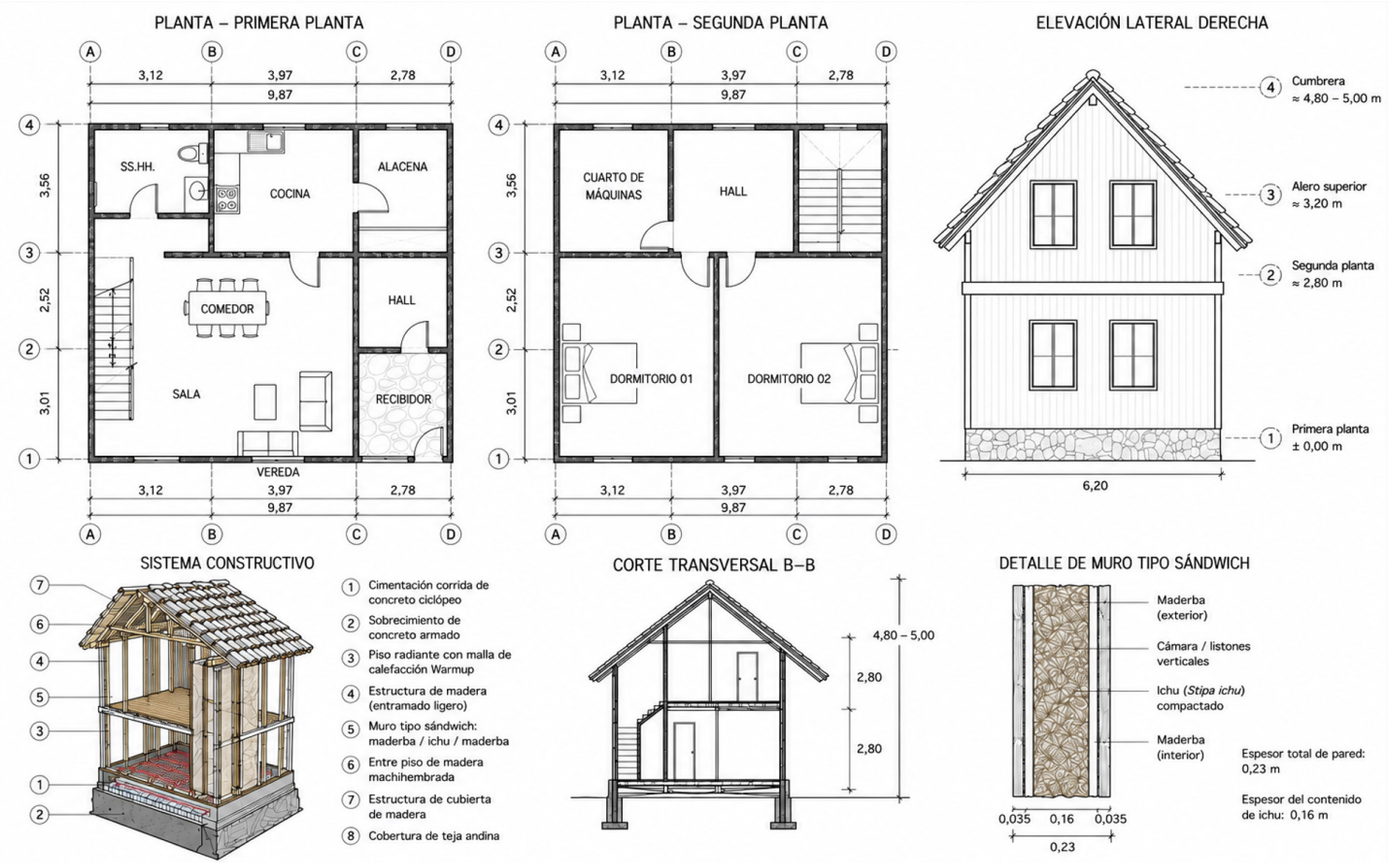


Figura 2. Esquema constructivo de la vivienda en estudio. Fuente: Elaboración por los autores.

Muruhuay de Tarma – Perú de coordenadas -11,347435 N; -75,652674 E (Figura 1).

La casa de estudio dispone de una construcción sostenible de dos niveles, el primero consta de sala-comedor, cocina, servicios higiénicos, hall y alacena; en el segundo nivel dos dormitorios y un cuarto de máquinas. Estructura de madera Huayruro reforzada con soportes de acero, las paredes y puertas son tipo sándwich (maderba/ichu/maderba) de 23 cm de espesor, el ichu fue recolectado en estado de madurez fisiológica, secado al natural a temperatura ambiente con contenido de humedad en equilibrio con el entorno (8-12% de humedad), tiene piso radiante con malla de calefacción warmup sobre una cama de viruta, el techado consta de una cumbrera de teja andina y por debajo tiene un cielo raso con triplay (Presidente de la Comisión Organizadora de la UNAAT, 2017). La dinámica del flujo de calor al interior se incrementa durante el día y disminuye durante la noche. La investigación asume orientación norte y ventanas de doble acristalamiento y representa a una vivienda real. La Figura 2 representa un esquema de la infraestructura de la casa en estudio.

Los escenarios consistieron en realizar las simulaciones de estado estacionario, que representan los escenarios fríos más críticos nocturnos, condiciones correspondientes a los valores extremos de diseño para la zona altoandina durante el solsticio de invierno, momento de temperaturas más bajas y radiación solar nula. Fueron evaluados diferentes espesores de paredes desde 7,75 cm a 57,2 cm, temperaturas externas de -27,4 °C a 15 °C. Se establecieron dos capas fijas de madera de 15 mm de espesor cada una, para mantener sus propiedades termofísicas constantes, dejando al espesor del núcleo de ichu como parámetro variable (de 4,75 cm a 54,2 cm), no se realizaron otros cambios en la estructura de la casa.

DESARROLLO DEL MODELO DE CONFORT TÉRMICO CFD EN OPEN FOAM

El confort térmico es la condición mental que expresa satisfacción con el entorno térmico (Fanger, 1970) y puede ser predicho por variables predictoras del ambiente. Los datos meteorológicos fueron recolectados por el equipo meteorológico (RK 900 05 marca RIKA) diariamente en intervalos de 15 minutos durante 4 meses (diciembre y enero de 2025; febrero y marzo de 2026), los sensores externos a la casa fueron ubicados a 3,78 m del piso paralelo a una de las ventanas ubicadas al norte y el sensor interno fue ubicado a 1,5 m de altura al interior de la parte central del hall principal en el primer nivel, estas ubicaciones ya fueron utilizadas por Marchante González & González Santos (2020), por sus efectos en personas de altura media , la evaluación de los vientos y ciclos térmicos en la ubicación de la unidad de

estudio. Los sensores enviaron los datos a un data logger inalámbrico, y fueron exportados a formatos csv para su procesamiento, de ellas, fueron tomadas muestras representativas reales para su diseño en CFD. Los datos fueron validados de acuerdo a las métricas estándar para evaluación de la diferencia entre CFD y las mediciones en campo, mediante el indicador de error absoluto medio (MAE) que fue de 10,6%, para la muestra de 40 observaciones *y* (y_i,,,2,3 … , n) y *40* predicciones (Hodson, 2022). Posterior a ello el procesamiento de los datos consistió en la determinación del índice de conductividad térmica de las paredes en función de los datos reales de la casa. Con esos datos se diseñaron las simulaciones, incluido el cálculo del PMV y la optimización de acuerdo al diseño experimental.

El dominio numérico en OpenFOAM fue construido al utilizar blockMesh, se definió un volumen de control que representó la sección trasversal del muro sándwich. Sobre la resolución mínima para la estabilidad numérica se siguieron los criterios de Tominaga et al. (2008) sobre la resolución mínima para la estabilidad numérica, el dominio fue dividido en tres bloques funcionales a lo largo del eje X, estos correspondieron a la configuración física del cerramiento (maderba/ichu/maderba). Cada bloque fue discretizado al inicio con una malla base de 10x10x10 celdas, de esta forma se aseguró la densidad de nodos suficiente en cada etapa. La garantía de precisión en la captura de los gradientes térmicos en las interfaces fue dada por el nivel de refinamiento 1 (Advanced Refinement) que acrecentó la resolución en las zonas con transición térmica. Los cálculos fueron realizados bajo los esquemas de segundo orden de Gauss linear y un esquema temporal de Euler implícito, de esta forma fue monitoreada la convergencia que alcanzó un residuo absoluto de para la ecuación de la energía, suficiente para asegurar la estabilidad y validez de los resultados térmicos.

Es necesario señalar que la simulación CFD consideró una envolvente arquitectónica con alta hermeticidad, se omitieron las infiltraciones por carpinterías o rejillas de ventilación, con el propósito de evaluar el potencial máximo de aislamiento del panel de ichu que evita las interferencias de pérdidas. De esta forma los flujos creados obedecen exclusivamente a las gradientes de densidad que mueven el aire de un nivel inferior a uno superior.

DETALLES NUMÉRICOS DE LA SIMULACIÓN

Respecto al tipo de discretización espacial, fue empleada una malla estructurada compuesta por celdas hexaédricas, la malla consta de 3 bloques funcionales (capas del muro tipo sándwich). Los esquemas numéricos incluyeron: la derivada temporal de Euler; las gradientes mediante Gauss linear y el Laplaciano mediante Gauss linear corrected (esquema de segundo orden que incluyó una corrección para la no-ortogonalidad de la malla). Una interpolación (interpolationSchemes) linear, es decir de segundo orden; y la gradiente en las caras (snGradSchemes) normal a las caras, corregido por la no-ortogonalidad. Además de los criterios de Convergencia (fvSolution), para el *solver* de la temperatura (T), se utilizó un tolerance de $1x10^{-6}$ y un relTol (tolerancia relativa) de 0. El *solver* iteró hasta que el residuo de la ecuación de temperatura se redujo por debajo de 10^{-6} (en valor absoluto) para que el aseguramiento numérico sea estable y físicamente consistente.

Las condiciones de contorno e iniciales fueron determinadas según los archivos 0/*/T y blockMeshDict, las condiciones de contorno (sección boundary en blockMeshDict) fueron señaladas para la atmosphere (tipo patch) con el fin de agrupar las caras exteriores donde se aplica la condición de temperatura fija. Las caras específicas son definidas por números que refieren a los índices de los vértices para la formación de caras: (0 4 8 0), (3 7 11 7), (0 1 5 4), (2 3 7 6) y (0 1 2 3). Estas caras definen las fronteras expuestas al ambiente exterior. Se usó walls (tipo wall) para agrupar las caras internas entre las regiones y otras fronteras donde se aplican las condiciones de aislamiento térmico, al ser los vértices de las caras específicas: (8 9 13 12); (9 10 14 13); (10 11 15 14); (4 5 9 8); (5 6 10 9); (6 7 11 10) y (12 13 14 15), estas caras representan a las paredes internas y las fronteras no expuestas al ambiente. Las condiciones de Contorno para la Temperatura (archivos 0/*/T) fueron dadas por walls en type zeroGradient, estas indicaron que no hay flujo de calor normal a las paredes, atmosphere para la región externa del aire en type fixedValue; value uniform; por lo que la temperatura en el contorno de la atmósfera (aire exterior) se mantuvo constante, además las condiciones iniciales para la temperatura externa (archivos 0/*/T) en internalField uniform para todas las regiones se mantuvieron uniformes de acuerdo al diseño de investigación . La Maderba utilizada tiene una conductividad térmica de 0,1 W/m·K (dato del fabricante) , dos veces mayor que el Ichu prensado (0,05 W/m.K), lo que sugiere que permite una transferencia de calor más rápida, a través de ella, la densidad y el calor específico son los mismos para ambos materiales, lo que implica que la cantidad de energía necesaria para cambiar su temperatura por unidad de masa es la misma, el aire tiene una conductividad térmica (0,026 W/m·K) significativamente menor que los sólidos, que actúan como un aislante en comparación (Atahuachi Layme & Carcausto Quispesayhua, 2018; Cárdenas Cristobal & Espinoza Ramírez, 2024; Mendoza et al., 2021). Las propiedades termo físicas se determinaron según constant/*/thermophysicalProperties, y se pueden observar en la Tabla 1.

Posteriormente se hizo la predicción de escenarios, los datos fueron procesados mediante software libre OpenFOAM v12 for Windows y Salome Version 9.10.0 luego de ser graficado en Autocad V25. El cálculo del confort térmico fue calculado al utilizar una

	Aire	Ichu	Maderba
Densidad (ρ) kg/m³	1,225	250	250
Conductividad W/m·K	0,026	0,05	0,10
Calor específico (Cp) J/kg.K	1000	1200	1200

Tabla 1. Propiedades termo físicas de los materiales de la casa ecológica. Fuente: Datos de fabricante; Atahuachi Layme & Carcausto Quispesayhua (2018); Cárdenas Cristobal & Espinoza Ramírez (2024).

$$PMV = (0{,}303e^{-0{,}036M} + 0{,}028) * \{(M - W) - 3{,}05 * 10^{-3} * [5733 - 6{,}99(M - V) - p_a] - 0{,}42[(M - V) - 58{,}15] - 1{,}7 * 10^{-5} * M * (5867 - p_a) - 0{,}0014 * M * (34 - t_a) - 3{,}96 * 10^{-8} * f_{cl} * [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} * h_c * (t_{cl} - t_a)\}$$

$$t_{cl} = 35{,}7 - 0{,}028 * (\mathrm{M} - \mathrm{V}) - I_{cl}\{3{,}96 * 10^{-8} * f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} * h_c * (t_{cl} - t_a)\}$$

$$h_{cl} = \begin{Bmatrix} 2{,}38 * |t_{cl} - t_a|^{0{,}25} \; si \; 2{,}38 * |t_{cl} - t_a|^{0{,}25} > 12{,}1\sqrt{v_{ar}} \\ 12{,}1 * \sqrt{v_{ar}} \; si \; 2{,}38 * |t_{cl} - t_a|^{0{,}25} < 12{,}1\sqrt{v_{ar}} \end{Bmatrix}$$

$$f_{cl} = \begin{Bmatrix} 1{,}00 + 1{,}290 * l_{cl} \; si \; l_{cl} \leq 0{,}078 \; \frac{m^2}{w} \\ 1{,}00 + 0{,}645 * l_{cl} \; si \; l_{cl} > 0{,}078 \; \frac{m^2}{w} \end{Bmatrix} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

implementación estándar de la fórmula de predicción del voto medio (PMV) de la ISO 7730 (Olesen & Parsons, 2002). PMV es el estándar usado para conocer el confort térmico de acuerdo a las normas ASHRAE según los cálculos de Fanger (Ecuación 1).

Donde: M es la Tasa metabólica (W/m²); W es el Trabajo externo (W/m²); Icl es el aislamiento de la ropa (Clo); fcl es el Factor de área de la superficie de la ropa; ta es la temperatura del aire (°C); tr es la temperatura radiante media (°C), var es la velocidad del aire relativa al cuerpo (m/s); pa es la presión parcial del vapor de agua en el aire (Gilani, Khan & Pao, 2015).

Las pequeñas variaciones fueron resultados de la temperatura y humedad interna, manteniéndose constante la velocidad del aire a 0,1 m/s, con un aislamiento de ropa (clo) de 1,0 usado para la ropa de invierno moderada, Temperatura Radiante Media (Tmr) igual a la Temperatura interna, Nivel de Actividad Metabólica (Met) de 1,0 por el sedentarismo puro para reflejar la precisión de la experimentación por la escala discreta de la Tabla 2. Donde son declaradas las zonas de confort térmico bajo la metodología (Fanger, 1970) y las normas ASHRAE en Mora & Bean (2018), pues se indican los valores de confort térmico dividida en tres clases en base al PMV (Roelofsen & Jansen, 2024)

Los análisis estadísticos fueron procesados en el software Minitab versión 20 de licencia educativa, mediante el Diseño experimental DOE y Superficie de Respuesta RSM de Diseño Central Compuesto de 13 tratamientos, de 4 puntos axiales negativas, 4 positivas y 5 puntos (Tabla 3.),

Confort	PMV
Mucho frío	-3,0
Bastante frío	-2,0
Algo de frío	-1,0
Neutro	0
Algo de calor	+ 1,0
Bastante calor	+ 2,0
Mucho calor	+ 3,0
Clase	Intervalos de PMV
A	-0,2 < PMV<0,2
B	-0,5 < PMV<0,5
C	-0,7 < PMV<0,7

Tabla 2. Escala discreta y Clases de predicción de voto medio PMV. Fuente: Mora & Bean (2018).

de donde se obtuvieron los gráficos de contorno, mallas sólidas, interacciones y optimización.

Se determinó el ancho de la pared óptima por minimización del confort térmico aceptable según la ISO 7730 Ergonomía del ambiente térmico, la determinación analítica e interpretación del confort térmico (Fanger, 1970; Olesen & Parsons, 2002) mediante el cálculo de PMV, el intervalo para ser confortable de clase C, inicia en -0,7, debido a que solo hay algo de frío, hasta +0,7,

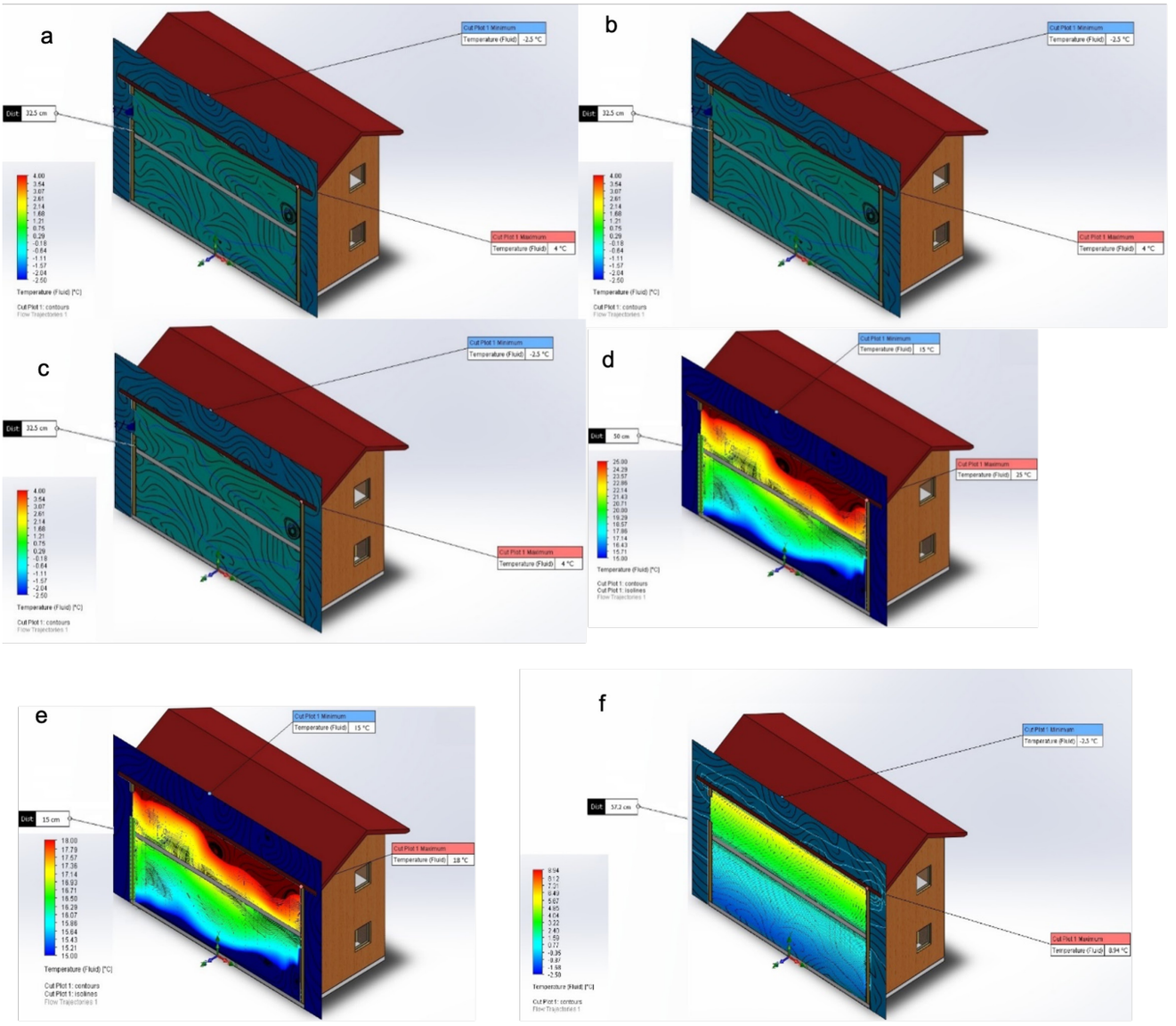


Figura 3. Comparativo de las simulaciones CFD de la casa ecológica, de acuerdo al diseño de optimización experimental, donde se observa el espesor de las paredes, la escala de temperatura exterior e interior. Parte 1. Fuente: Elaboración de los autores.

siendo los mejores valores cercanos a 0, los de clase A varían de -0,2 a +0,2, simulados a la temperatura de extrema de -10 °C y -20 °C.

RESULTADOS

SIMULACIÓN CFD

Gráficamente se observa el comportamiento del confort térmico al interior de la casa ecológica, en la Figura 3 a, b y c se observan temperaturas bajas de hasta 4 °C, distribuidos en todo el interior de la casa cuando la temperatura externa es de -2,5 °C y un grosor de pared de 32,5 cm, este efecto de la temperatura interna se incrementa hasta 8,94°C cuando la pared es de 57,2 cm y se distingue mayor temperatura de viento en el nivel superior que en el inferior, notándose que hay mayor frigidez en el nivel inferior Figura 3 f.

Temperaturas externas de 22,24°C y paredes de 32,5 cm tienen efectos de sobrecalentamiento al interior que llegan hasta 28,74°C en el segundo nivel, y mínimos de hasta 22,24 °C (Figura 4 a) a este nivel se recomendaría cambios de vestimenta a ligeras. Al reducir el grosor de la pared a 7,75 cm con temperaturas bajo cero como la Figura 4 b se obtienen temperaturas cercanas a 0°C, a temperaturas de -20°C a menos con grosores de pared entre 32,5 cm a 50 cm, se observan en estos puntos fríos al interior disconfort térmico. Figura 3 c- Figura 3 g.

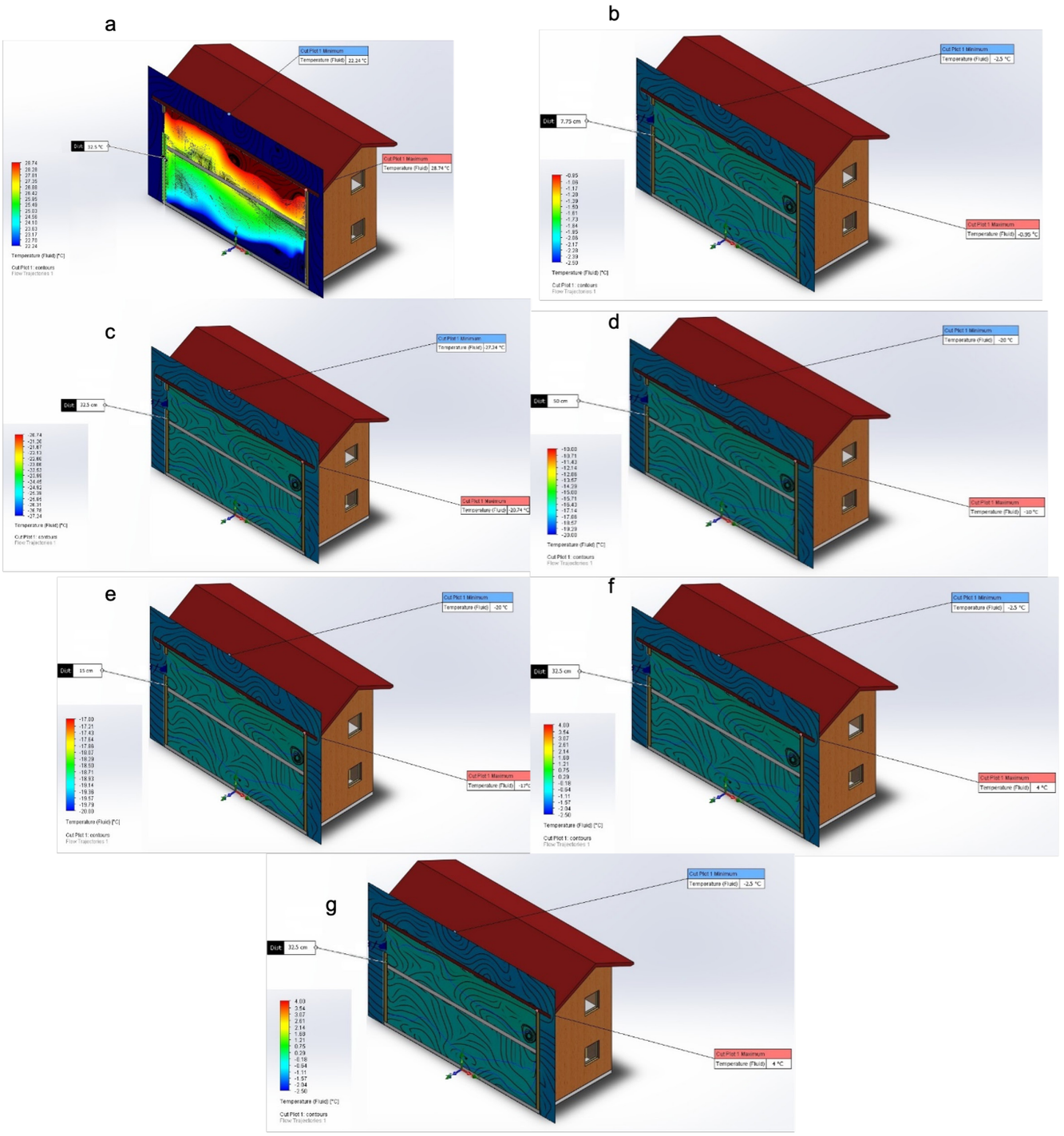


Figura 4. Comparativo de las simulaciones CFD de la casa ecológica, de acuerdo al diseño de optimización experimental donde se observa el espesor de las paredes y la escala de temperatura exterior e interior. Parte 2. Fuente: Elaboración de los autores.

El grosor de la pared tiene efecto de primer grado, y la temperatura externa a la casa ecológica tiene un efecto de segundo grado, esto evidencia que ambos factores son altamente significativos (α=0,05) al confort térmico al interior de la casa, pero con efectos complejos respecto a la temperatura externa por la variación del índice PMV de forma contraintuitiva a temperaturas externas muy frías (Figura 5 a).

El diagrama de contornos (Figura 5 c) demuestra las zonas de confort térmico incluso a temperaturas menores de entre 0 °C a -20 °C, siendo esto posible al incrementar el grosor de la pared que contiene el ichu, si se tiene en cuenta que los valores de PMV entre -0,7 y 0,7 son confortables, es posible lograr confort con grosores de pared mayores a 40 cm, incluso se puede identificar que el ichu favorece el confort térmico en climas templados hasta los 15°C de temperatura ambiental.

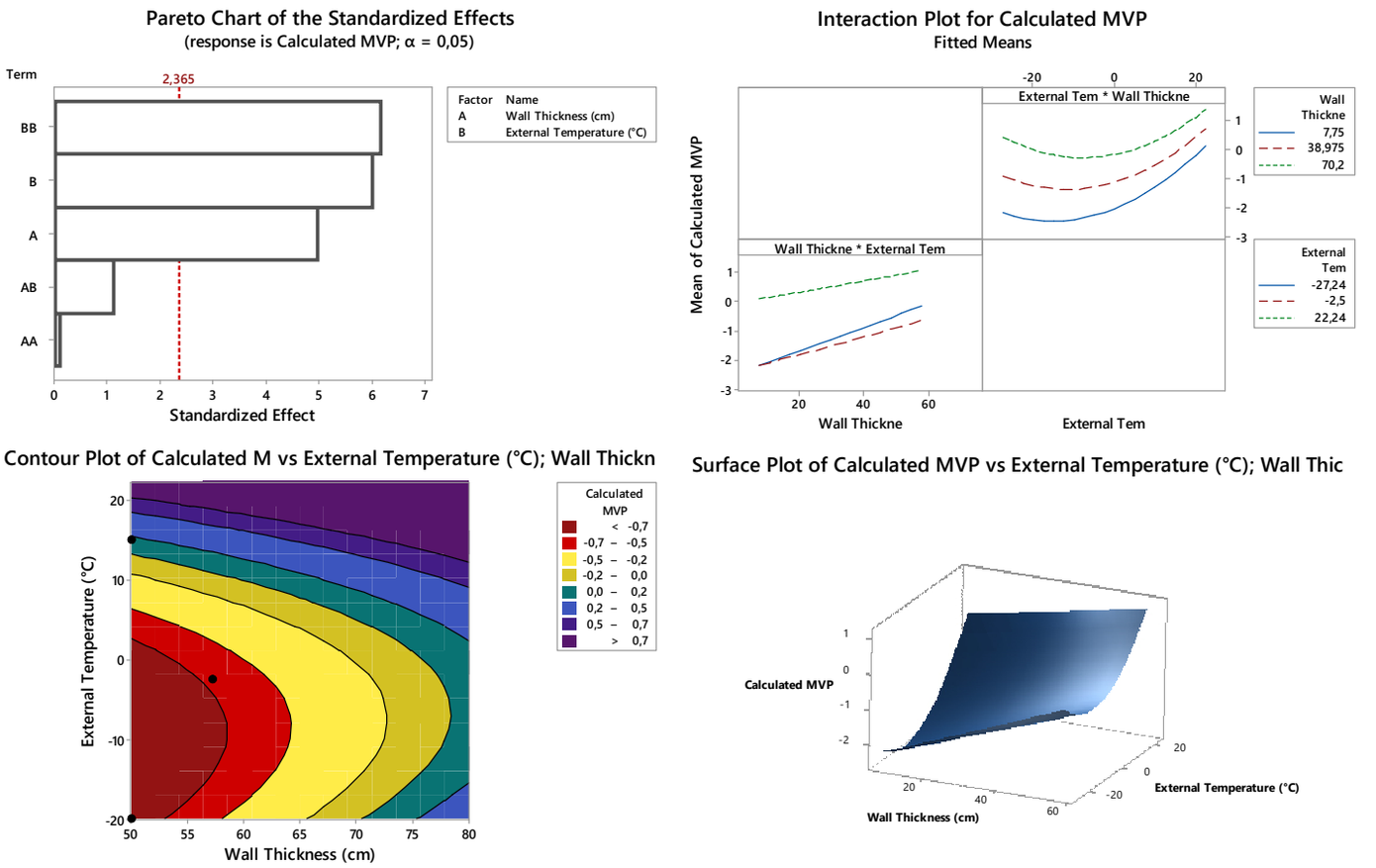


Figure 5. a) Diagrama de Pareto que identifica los efectos estandarizados. b) interacción de medias de PMV. c) gráfico de contorno que muestra los espacios de confort y disconfort térmico. d) Gráfico 3D del confort térmico en la casa ecológica. Fuente: Elaboración de los autores.

En la Figura 5 d se observa el gráfico superficie de respuesta de tres dimensiones, evidencia que los valores de optimización, a mayor temperatura y grosor de pared se obtiene un mayor PMV, que supera incluso los rangos de confort térmico (clase A, B y C), este valor disminuye cuando menor es el grosor de la pared, así como la temperatura baja a niveles extremos (-20°C), al tener en cuenta el rango de confort térmico de clase A es de -0.2 a 0.2, clase B de -0.5 a 0.5 y clase C de -0,7 a 0,7, se puede observar que se puede lograr confort térmico por PMV con grosores de pared entre 50, 60 y 65 cm, para temperaturas extremas de -10 °C a -20 °C (Zheng et al., 2021).

Se realizaron los cálculos puntuales para conocer los valores mínimos de grosor de pared para -10 °C en el caso de PMV de 0; -0,7; -0,5 y -0,2 el grosor mínimo es de 57,20 cm (Figura 6 a – Figura 6 d) y para temperaturas de -20 °C se obtuvieron grosores mínimos de 57; 53,0727; 57,20 y 57,20 respectivamente (Figura 6 e – Figura 6 h).

CÁLCULO DEL CONFORT TÉRMICO POR LA PREDICCIÓN DE VOTO MEDIO (PMV)

El modelo fue sometido a la determinación del confort térmico por PMV, de acuerdo al diseño experimental, con los valores de grosor de pared (cm) y temperatura externa (°C) de la casa ecológica, los demás parámetros externos fueron constantes. Según el diseño estadístico de superficie de respuesta los resultados indicaron los valores que se muestran en la Tabla 3.

DISCUSIONES

La mayor conductividad térmica de la Maderba (0,10W/m*K) indica que los cambios de temperatura producen su propagación, a través de ella más rápidamente que el Ichu (0,05 W/m · K), el valor encontrado por la simulación es similar al hallazgo de Mendoza et al. (2021), quienes reportan valores de 0,047 a 0,113 W/m · K, esto resalta la fidelidad del modelo. El ichu tiene propiedades aislantes de conductividad térmica menores a la madera tornillo (0,141 W/m · °C), esta propiedad favorece al modelo estructural propuesto, además de ser encontrada fácilmente en la zona altoandina donde el frío afecta a los pobladores (Mendoza et al., 2021). La distribución de la casa ecológica evidencia diferentes

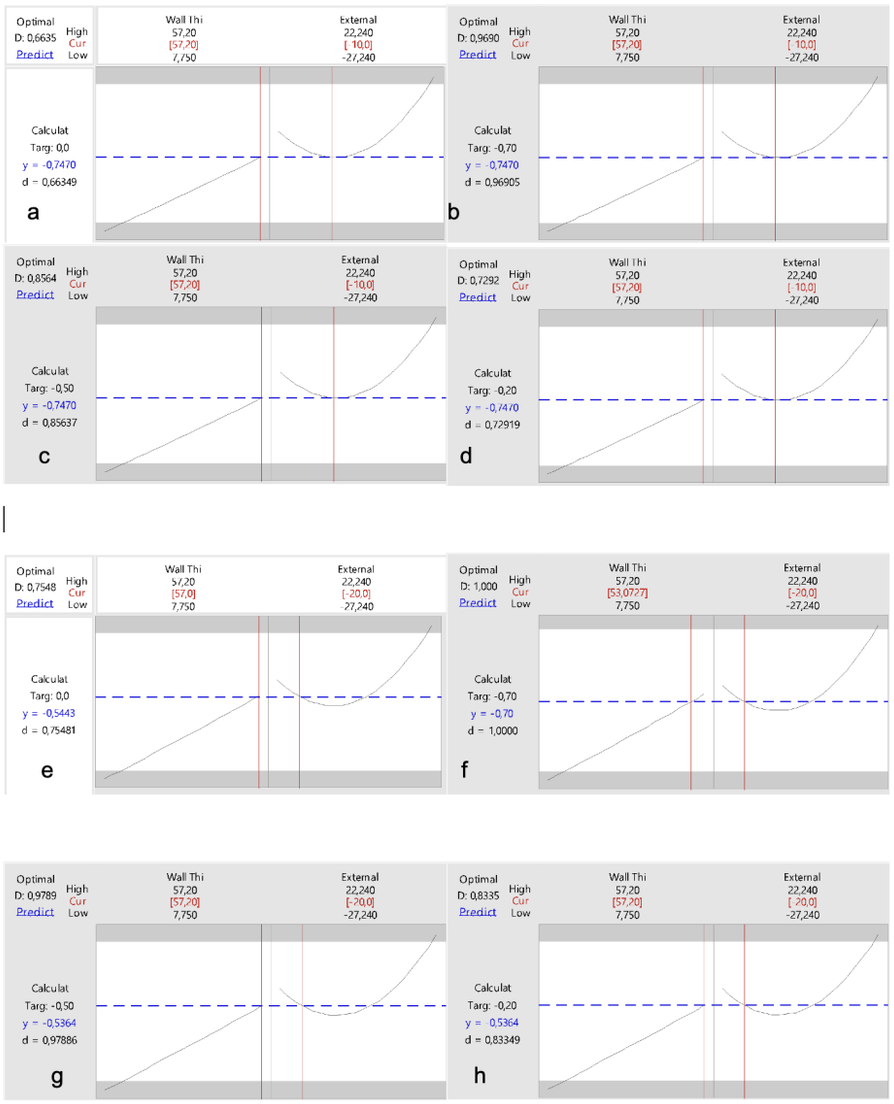


Figura 6. Optimización de grosor de pared a temperaturas ambientales extremas a -20 °C y -10 °C bajo predicción y deseabilidad aceptable. Fuente: Elaboración de los autores.

Grosor de Pared (cm)	Temperatura externa (°C)	Temperatura interna	Cálculo de PMV
32,5	-2,5	16	-1,29
32,5	-2,5	15,5	-1,42
32,5	-2,5	15	-1,57
50	15	20	0
15	15	17	-0,99
57,2	-2,5	18	-0,69
32,5	22,24	24	0,89
7,75	-2,5	14	-1,92
32,5	-27,24	16	-1,29
50	-20	18	-0,69
15	-20	13	-2,22
32,5	-2,5	16	-1,35
32,5	-2,5	15	-1,55

Nota: Las repeticiones en la Tabla 3. Corresponden a los puntos centrales del diseño experimental y permiten medir la varianza del modelo y reflejan claramente la sensibilidad del sistema ante la inercia térmica, como la casa tiene la capacidad de almacenar calor, la temperatura interna y el PMV no son estáticos, que presentan ligeras fluctuaciones por el flujo de calor residual producido por el ciclo térmico.

Tabla 3. Diseño de optimización y el Cálculo de confort térmico por la predicción de voto medio PMV de la casa ecológica. Fuente: Elaboración de los autores.

comportamientos térmicos, en la parte del techo de la casa ecológica se registran mayores temperaturas en todas las simulaciones, presumiblemente por el uso de tejas (0,476 W/m·K de conductividad térmica), madera y maderba en el cielo raso que incrementan naturalmente la temperatura (Rat et al., 2023; Suleiman et al., 1999), además se debe recordar que el aire caliente siempre se desplaza hacia la parte superior por el "efecto chimenea", explicado por el movimiento causado por la diferencia de presión del aire (0,1 m/s) que impulsa el aire menos denso hacia la parte superior (Suárez & Molina, 2015).

Un hallazgo principal consiste en el descubrimiento de la relación cuadrática entre la temperatura externa y el PMV, existe un punto óptimo de temperatura externa donde el confort térmico mínimo corresponde a un grosor de pared, esta no linealidad es un resultado empírico, y está relacionado a la compleja interacción entre los mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección natural dentro de la casa) además del almacenamiento de energía en los diferentes componentes.

El espesor de la pared con ichu es superior a los resultados experimentales realizados por Molina-Fuertes, Horn-Mutschler & Gómez-León (2024) que al utilizar lana de vidrio de 0,4 m logra una amplitud térmica interior de 17,1 °C en el exterior a 6,4 °C y a las paredes de adobe provistas de madera sólida de 0,40 m en forma de contraventana colocados por las noches, que logra valores cercanos a confort térmico. Se puede confirmar la efectividad del uso del ichu en el interior de las paredes con el fin de conservar el calor interno de la vivienda por más tiempo, y su uso ocuparía un ligero mayor espacio que el actualmente usado por otros materiales. Se han identificado varias zonas de confort térmico incluso a temperaturas menores a -20°C al engrosar la pared con ichu y maderba tipo sándwich, ambos materiales tienen una conductividad térmica relativamente baja (0,05 W/m·K y 0,10 W/m·K respectivamente), al incrementar el grosor de la pared se incrementa el Δx en la ecuación de la resistencia térmica , esto se traduce en un aumento de la resistencia térmica de la pared, lo que a su vez reduce la tasa de flujo de calor, a través de la misma desde el interior cálido hacia el exterior frío (González-Domínguez, Monzón-Verona & García-Alonso, 2019). La temperatura interior se mantiene estable y menos afectada por la temperatura externa a -20°C y -10 °C con paredes mayores a 57,20 cm, lo que manifiesta mejores PMV.

El espesor recomendado de 57,20 cm satisface al estándar ISO 7730, el confort térmico óptimo se logra con un PMV cercano a 0, con un rango aceptable de clase A generalmente entre -0,2 y +0,2 (Olesen & Parsons, 2002). El ancho calculado de la pared para poder obtener confort térmico en base al PMV es coherente y de acuerdo a la resistencia térmica de la madera, el ichu en disposición tipo sándwich y sostenible económicamente (van Niekerk, 2020). Se afirma entonces que estos valores optimizados corresponden a una inclusión económica de los habitantes de las zonas altas frías y de temperaturas extremas a la luz de los objetivos de desarrollo sostenible (Naciones Unidas, 2019).

La validación del espesor optimizado de 57,2 cm se realiza por comparación de la Resistencia Térmica Total (Rt) con los materiales convencionales. La conductividad del ichu (k=0,05 W/m·K) permite un muro propuesto de Rt=11,44 m^2.K/W, a diferencia de un muro de adobe estándar (k=0,80 W/m·K) que requiere 9,15 m para asemejarse a dicho aislamiento (Piñas et al., 2020). El ancho propuesto de la pared sandwich aunque parece de espesor elevado en estándares urbanos, es eficiente y realista en fríos extremos de las zonas rurales, con el beneficio de prescindir de sistemas de calefacción activos de alto costo energético.

CONCLUSIONES

La pared tipo sandwich maderba/ichu/maderba es una solución técnica altamente eficaz para el aislamiento térmico en climas de frío extremo, mediante la metodología de Superficie de Respuesta (RSM) se pudo determinar que un espesor crítico de 57,2 cm permite confort térmico de Clase A al interior de una casa ecológica con temperaturas exteriores de -20 °C.

El grosor de pared tiene relación de primer grado con el PMV, pero la temperatura externa tiene efecto del tipo cuadrático, lo que representa efectos complejos en el logro del confort térmico. Por lo tanto, la pérdida de confort se acelera de forma no lineal ante el descenso extremo de la temperatura exterior, que valida la necesidad de espesores de aislamiento superiores a los convencionales en zonas altoandinas para contrarrestar este fenómeno físico.

La dinámica de fluidos computacionales confirma la estratificación térmica en las viviendas de dos niveles, el aire desplazado por la diferencia de presión interna es concentrada en el segundo nivel, sugiere que el diseño arquitectónico debería de priorizar las áreas de dormitorio en los niveles superiores para aprovechar la energía calorífica lograda por el sistema sándwich.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, H.J.; Curación de datos, J.R.; Análisis formal, H.J.; Adquisición de financiación H.J., G.Q.; Investigación, H.J., K.M.; Metodología, H.J.; Administración de proyecto, H.J., G.Q.; Recursos, J.R.; Software. J.R.; Supervisión, H.J.; Validación, K.M., J.R.; Visualización, H.J.; Escritura – borrador original, H.J.; Escritura – revisión y edición, H.J., K.M..

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Tecnológica del Perú por el Financiamiento de código P-2024-SUR-19, mediante el concurso de proyectos I+D 2024 UTP Región Sur de acuerdo a la RR N° 0168-2024-R-UTP

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ACRÓNIMOS

CFD: Dinámica de Fluidos computacionales. Es una disciplina que utiliza algoritmos y métodos numéricos para resolver casos de fluidos y transferencia de calor.

Conductividad térmica (k): Propiedad para conducir el calor, sus unidades son W/mK

Discretización espacial: División del dominio continuo en un número finito de celdas.

Esquema de Euler: Método numérico implícito de primer orden para la discretización de derivadas temporales.

Gauss Linear: Discretización de segundo orden basado en el teorema de la divergencia de Gauss.

Inercia térmica: Capacidad de mantener la energía recibida y liberarla progresivamente.

Malla Hexaédrica: Malla compuesta por elementos de seis caras (cubos o prismas)

OpenFOAM: Software de código abierto, para solución de problemas de simulación térmica y fluidos.

PMV: Voto medio estimado. Es un índice que predice la sensación térmica del valor medio de los votos.

PPD: Porcentaje predicho de insatisfechos. Índice que cuenta a las personas térmicamente incómodas.

RSM: Metodología de Superficie de respuesta. Técnicas estadísticas y matemáticas para el modelado y análisis de respuestas influenciadas por variables de interés.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Atahuachi Layme, G. M., & Carcausto Quispesayhua, Y. N. (2018). *Aislante termoacústico a base de Stipa Ichu para atenuar el ruido y cambios drásticos de temperatura en viviendas de sectores en expansión urbana de la ciudad de Puno*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional - UNAP. https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/11138

Cárdenas Cristobal, J. M., & Espinoza Ramírez, K. (2024). Utilización de unidades termo-modulares de vivienda para combatir el friaje extremo con materiales oriundos de Tayabamba - La Libertad – 2021 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Santa]. Repositorio Institucional - UNS. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSR_09f576f8c5882bcc0a5e467258693592/Description#details

Charca, S., Noel, J., Andia, D., Flores, J., Guzman, A., Renteros, C., & Tumialan, J. (2015). Assessment of Ichu fibers as non-expensive thermal insulation system for the Andean regions. *Energy and Buildings*, 108, 55–60. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.053

Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. Danish Technical Press.

Frías, M., Caneda-Martínez, L., Sánchez de Rojas, M. I., Tenazoa, C., & Flores, E. (2020). Scientific and technical studies on eco-efficient binary cements produced with thermally activated ichu grass: Behaviour and properties. *Cement and Concrete Composites*, 111, 103613. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103613

Gilani, S. I. U. H., Khan, M. H., & Pao, W. (2015). Thermal Comfort Analysis of PMV Model Prediction in Air Conditioned and Naturally Ventilated Buildings. *Energy Procedia*, *75*, 1373–1379. https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.07.218

González-Domínguez, P. I., Monzón-Verona, J. M., & García-Alonso, S. (2019). New Thermal-Conductivity Constitutive Matrix in Fourier's Law for Heat Transfer Using the Cell Method. *Applied Sciences, 9*(21), 4521. https://doi.org/10.3390/APP9214521

Hills, J. (2012). *Getting the measure of fuel poverty: final report of the Fuel Poverty Review*. CASE report 72. https://sticerd.lse.ac.uk/dps/case/cr/casereport72.pdf

Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. *Geoscientific Model Development*, *15*(14), 5481–5487. https://doi.org/10.5194/GMD-15-5481-2022

Marchante González, G., & González Santos, A. I. (2020). Evaluación del confort y disconfort térmico. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, *41*(3), 21–40. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9513886

Mendoza, M. A., Piñas Moya, M. J., Horn Mutschler, M. J., & Gómez León, M. M. M. (2021). Conductividad térmica de compuestos tipo sándwich usados en la industria de la construcción. *TECNIA*, *31*(1), 42–50. https://doi.org/10.21754/tecnia.v21i1.1198

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/TECNIA.V34I2.2170

Mora, R., & Bean, R. (2018). Thermal Comfort: Designing for People. *Ashrae Journal*, (02), 40-46. https://commons.bcit.ca/besys/files/2018/08/Thermal-Comfort-Design-for-People.pdf

Moreno-Casas, P. A., Scott, F., Delpiano, J,. & Vergara-Fernández, A. (2020). Computational tomography and CFD simulation of a bio filter treating a toluene, formaldehyde and benzo [a] pyrene vapor mixture. *Chemosphere*, *240,* 124924. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124924

Naciones Unidas. (2019). *Informe de Los Objetivos Del Desarrollo Sostenible 2019*. Naciones Unidas Nueva York https://ods.org.mx/docs/doctos/SDG_Report2019_es.pdf

Olesen, B. W., & Parsons, K. C. (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

Ortiz Caicedo, P. L., Gonzales Vega, A. A., Montaño Roldan, V. L., Chica Tambaco, A. J., & Álava Vélez, C. E. (2023). Eficiencia de sistemas de aislamiento térmico. *Ibero-American Journal of Engineering & Technology Studies*, *3*(2), 43–50. https://doi.org/10.56183/IBEROTECS.V3I2.631

Piñas, J. M., Lira, L., Horn, M., Solis, J. L., & Gómez, M. M. (2020). Influence of Stipa ichu on the thermal and mechanical properties of adobe as a biocomposite material. *Journal of Physics: Conference Series*, *1433*(1), 012003. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1433/1/012003

Presidente de la Comisión Organizadora de la UNAAT. (24 de enero de 2017). *Año del Buen Servicio al Ciudadano. RESOLUCIÓN DE PRESIDENCIA N° 007-2017-CO-P-UNAAT.* Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Terma [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2178617/RESOLUCI%C3%93N%20DE%20PRESIDENCIA%20N%C2%B0%20007-2017-CO-P-UNAAT.pdf

Rat, E., Martínez-Martínez, S., Sánchez-Garrido, J. A., Pérez-Villarejo, L., Garzón, E., & Sánchez-Soto, P. J. (2023). Characterization, thermal and ceramic properties of clays from Alhabia (Almería, Spain). *Ceramics International*, *49*(9), 14814–14825. https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2022.05.328

Roelofsen, P., & Jansen, K. (2024). Modification in the (NEN-) EN-ISO 7730 Model, with Regard of the Thermal Indoor Climate Assessment in Dutch Offices. *Jounarl of Building Design and Environment*, *2*(2), 35033. https://doi.org/10.37155/2811-0730-0302-15

Suárez, C., & Molina, J. L. (2015). Análisis del efecto chimenea en fachadas ventiladas opacas mediante correlaciones del flujo másico inducido. Aplicación para el dimensionado de anchos de cámara. *Informes de la Construccion*, *67*(538), e087. https://doi.org/10.3989/IC.13.155

Suleiman, B. M., Larfeldt, J., Leckner, B., & Gustavssor, M. (1999). Thermal conductivity and diffusivity of wood. *Wood Science and Technology*, *33*(6), 465–473. https://doi.org/10.1007/S002260050130

Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *96*(10–11), 1749–1761. https://doi.org/10.1016/J.JWEIA.2008.02.058

van Niekerk, A. J. (2020). Inclusive Economic Sustainability: SDGs and Global Inequality. *Sustainability 12*(13), 5427. https://doi.org/10.3390/SU12135427

Zheng, Z., Zhang, Y., Mao, Y., Yang, Y., Fu, C., & Fang, Z. (2021). Analysis of SET* and PMV to evaluate thermal comfort in prefab construction site offices: Case study in South China. *Case Studies in Thermal Engineering*, *26*, 101137. https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2021.101137

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 70 - 95
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.05

CHAKIÑAN: RECUPERACIÓN DE INFRAESTRUCTURA ANCESTRAL Y GESTIÓN DEL TERRITORIO VIVO EN LA COMUNIDAD DE LAS LAGUNAS, SARAGURO, ECUADOR

Recibido 13/02/2026
Aceptado 27/05/2026

CHAKIÑAN: RECOVERY OF ANCESTRAL INFRASTRUCTURE AND MANAGEMENT OF THE LIVING TERRITORY IN THE COMMUNITY OF LAS LAGUNAS, SARAGURO, ECUADOR

CHAKIÑAN: RECUPERAÇÃO DE INFRAESTRUTURA ANCESTRAL E GESTÃO DO TERRITÓRIO VIVO NA COMUNIDADE DE LAS LAGUNAS, SARAGURO, EQUADOR

Flor Lozano-Guamán (Autor de Correspondencia)
Magíster en Arquitectura con mención en Construcción Sostenible
Arquitecta, Diseñadora de Interiores SD Arquitectura
Saraguro, Ecuador
https://orcid.org/0009-0001-4417-2512
flor.lozano@ucuenca.edu.ec

Angel Lozano-Guamán
Magíster en Proyectos Arquitectónicos Arquitecto,
Antropólogo, SD Arquitectura
Saraguro, Ecuador
https://orcid.org/0009-0001-8931-9645
kurylogu@gmail.com

CC BY SA

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 70 - 95
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.05

RESUMEN

Las comunidades indígenas de Ecuador, como Las Lagunas en Saraguro, poseen una organización autónoma basada en el Ayllu y en la cosmovisión andina. Su sistema de caminos antiguos, llamados chakiñanes, ha facilitado históricamente la movilidad y la conexión con sitios sagrados. No obstante, la falta de mantenimiento y la presión del desarrollo urbano motorizado amenazan con su desaparición. Esta investigación analiza los chakiñanes como infraestructura ancestral para la gestión del hábitat sustentable. Mediante un enfoque mixto multiescalar —que integró mapeo participativo, fotogrametría y el diagnóstico de la infraestructura hídrica y espiritual— se identificaron 44 caminos antiguos. Los hallazgos revelan que el 95% de la comunidad considera estos ejes vitales para su identidad, a pesar de su fragmentación física. Se concluye que revitalizar los chakiñanes bajo una lógica de microcuenca y de materiales locales no solo recuperará la movilidad peatonal, sino que también fortalecerá la gobernanza territorial de un hábitat sostenible y la conservación del paisaje cultural.

Palabras clave
paisaje cultural, movilidad peatonal, infraestructura ancestral, planificación comunitaria

ABSTRACT

Indigenous communities in Ecuador, such as Las Lagunas in Saraguro, possess an autonomous organization based on the Ayllu and the Andean worldview. Their system of ancient trails, called chakiñanes, has historically facilitated mobility and connectivity with sacred sites. However, the lack of upkeep and the pressure of motorized urban development threaten their survival. This research analyzes chakiñanes as ancestral infrastructure for sustainable habitat management. Through a multiscalar, mixed approach —integrating participatory mapping, photogrammetry, and the diagnosis of water and spiritual infrastructure—44 ancient trails were identified. The findings reveal that 95% of the community considers these routes vital to their identity, despite their physical fragmentation. It is concluded that revitalizing the chakiñanes through a micro-basin approach and the use of local materials will not only restore pedestrian mobility but also strengthen territorial governance for sustainable habitat and cultural landscape conservation.

Keywords
cultural landscape, pedestrian mobility, ancestral infrastructure, community planning

RESUMO

As comunidades indígenas do Equador, como a de Las Lagunas, em Saraguro, possuem uma organização autônoma baseada no Ayllu e na cosmovisão andina. Seu sistema de caminhos antigos, chamados chakiñanes, tem facilitado, historicamente, a mobilidade e a conexão com locais sagrados. No entanto, a falta de manutenção e a pressão do desenvolvimento urbano motorizado ameaçam fazê-los desaparecer. Esta investigação analisa os chakiñanes como infraestrutura ancestral para a gestão sustentável do habitat. Por meio de uma abordagem mista e multiescalar — que integrou mapeamento participativo, fotogrametria e o diagnóstico da infraestrutura hídrica e espiritual —, foram identificados 44 caminhos antigos. Os resultados revelam que 95% da comunidade considera esses eixos vitais para sua identidade, apesar de sua fragmentação física. Conclui-se que a revitalização dos chakiñanes, sob uma lógica de microbacia e com o uso de materiais locais, não apenas recuperará a mobilidade dos pedestres, mas também fortalecerá a governança territorial de um habitat sustentável e a conservação da paisagem cultural.

Palavras-chave
paisagem cultural, mobilidade de pedestres, infraestrutura ancestral, planejamento comunitário

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 70 - 95
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.05

INTRODUCCIÓN

El paisaje comunitario de los pueblos originarios atraviesa una transformación constante, que enfrenta el desafío de integrar el conocimiento ancestral en la planificación del hábitat para garantizar la sostenibilidad territorial. En este escenario, la intervención en territorios ancestrales exige una comprensión profunda de las lógicas de ocupación histórica y la cosmovisión andina, donde la arquitectura se concibe como un diálogo intrínseco con la Pachamama (Lozano Guamán, 2021). La integración de este enfoque permite contrastar las limitaciones de los modelos constructivos contemporáneos, lo que demuestra que la combinación entre naturaleza y cultura constituyen el paradigma emergente para el ordenamiento y la revitalización de los territorios basados en sus propios recursos patrimoniales (Pérez Bustamante & Parra Ponce, 2004). Bajo este enfoque, se vuelve imperativo rescatar sistemas que, como el bahareque, representan la identidad y la técnica local (Lozano Guamán, 2022). Elementos fundamentales de esta configuración territorial son los chakiñanes, sistemas de movilidad desarrollados desde la época precolombina que responden no solo a la compleja topografía andina, sino a una estructura simbólica que articula la vida social y productiva de las comunidades.

El estudio de estos caminos antiguos en América tiene como eje vertebrador al Qhapaq Ñan (Camino del Inka), una red vial de carácter físico y espiritual que articuló el territorio del Tawantinsuyo. Esta infraestructura monumental no solo evidencia el dominio constructivo de la civilización Inka, sino que constituye el resultado de una expansión estratégica que aprovechó y perfeccionó los trazos preexistentes de culturas precedentes (Marca Chérrez, 2011). Como sostiene Guerrero Baca (2017), la comprensión de estos sistemas territoriales y constructivos ancestrales es imperativa para la conservación del patrimonio en América Latina, pues logran amalgamar el paisaje natural con la identidad social. Asimismo, este sistema facilitó un control territorial eficiente de los diversos pisos altitudinales mediante un ordenamiento dinámico de las relaciones económicas, políticas y sociales (Ordóñez Suárez, 2019).

En el contexto ecuatoriano, el Qhapaq Ñan influencia profundamente en la identidad de pueblos como el Kichwa Saraguro, en la provincia de Loja. En esta zona austral, el camino conecta hitos arqueológicos como el cerro Carboncillo y el tambo de Villamarca, que desciende hacia el río Paquishapa para integrarse con asentamientos como Ingapirca y Tambo Blanco (Marca Chérrez, 2011). Dicha lógica de ocupación territorial se refleja también en la arquitectura, la configuración morfológica y la organización espacial de los asentamientos, donde la transición de lo vernáculo hacia lo moderno exige un análisis tipológico riguroso, bajo la premisa de que el espacio habitado es el producto de un saber acumulado que vincula la materialidad con la identidad (Lozano Guamán, 2014).

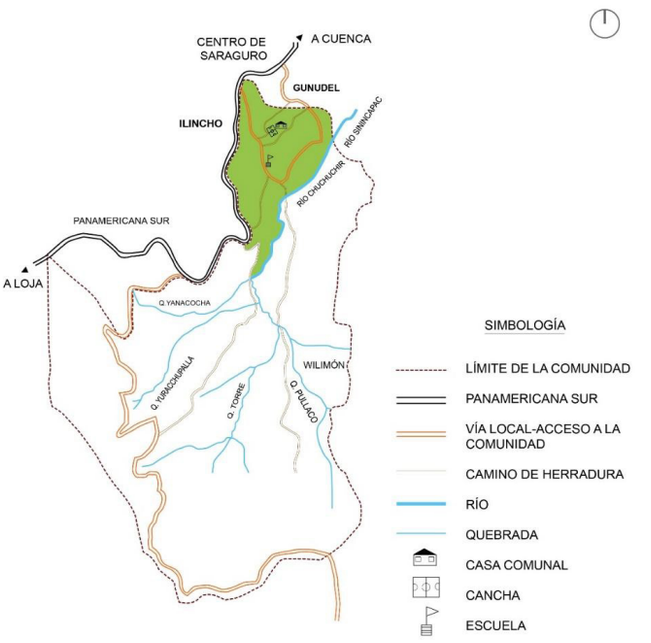


Figura 1. Mapa esquemático del territorio comunitario de Las Lagunas. Fuente: Elaboración de los autores, a partir de Quizhpe Guamán (2013).

A pesar de su incalculable valor histórico y su pérdida en la ritualidad andina, gran parte de esta red en el cantón Saraguro carece de planes de conservación preventiva, pese a estar contemplada como un elemento de valor en la planificación provincial (Dávila Egüez, 2015). Esta carencia técnica pone en riesgo la supervivencia de los chakiñanes ancestrales que hoy actúan como el último vestigio de conectividad precolombina y memoria viva en el territorio. Con el fin de dimensionar geográficamente este fenómeno, se estructuró un mapa de localización multiescalar y emplazamiento general (Figura 1), el que permite aproximarse cartográficamente desde el contexto macrorregional hasta el tramo específico de intervención. El resguardo de este tejido se vuelve urgente si se considera que la presión del desarrollo urbano motorizado sobre las infraestructuras peatonales andinas no solo altera la movilidad local, sino que pone en riesgo la continuidad de los paisajes culturales basados en la arquitectura de tierra. Como señalan Colosi et al. (2025), las dinámicas de transformación contemporáneas y la falta de articulación en la planificación territorial aceleran la pérdida material de los entornos patrimoniales vernáculos, lo que obliga a plantear estrategias que rescaten los saberes constructivos locales frente al riesgo antrópico urbano.

EL TÉRMINO CHAQUIÑÁN

El término chakiñan, derivado de las voces kichwas chaki (pie) y ñan (camino), define técnicamente a los senderos peatonales estrechos que constituyen la base de la movilidad local en el mundo andino. Según la clasificación del sistema vial de Ordóñez Suárez (2019),

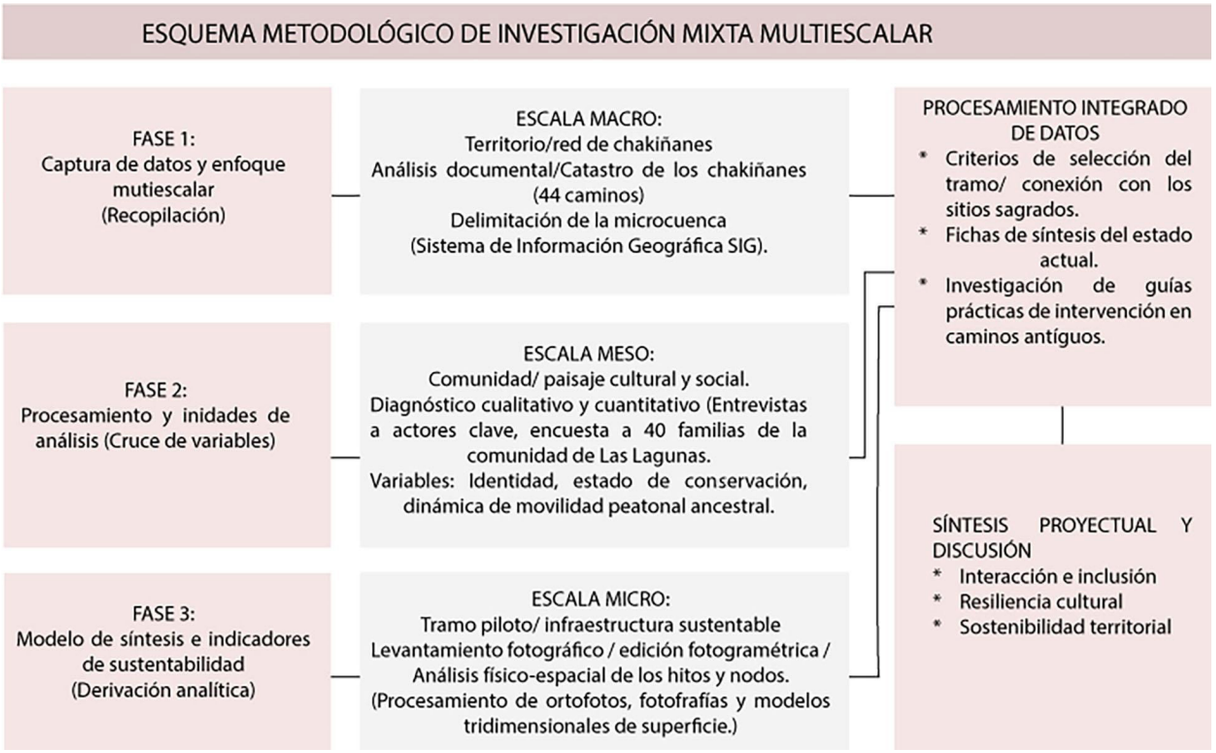


Figura 2. Metodología de diseño. Fuente: Elaboración de los autores.

estos caminos se organizan por órdenes de importancia. El Qhapaq Ñan actuaba como el camino de primer orden que conectaba los ejes centrales de los cuatro suyos del Tawantinsuyo; el Runa Ñan funcionaba como el camino de segundo orden destinado a la conexión entre regiones; y finalmente el chakiñan se establece como el camino de tercer orden, cuya función principal era conectar los territorios internos, las comunidades y los ayllus. Esta red capilar de chakiñanes, aunque estrecha, fue fundamental para la visión estatal Inka al servir como el eje dinamizador de relaciones sociales y económicas a escala local (Marca Chérrez, 2011), que permite el flujo de mitimaes y el intercambio de productos de consumo masivo en sectores geográficamente complejos como el área de Saraguro (Canziani Amico, 2012).

A partir de lo expuesto, la investigación plantea la siguiente interrogante: ¿De qué manera la recuperación de la red de caminos antiguos, chakiñanes, contribuye a la resiliencia del hábitat sustentable y a la preservación de la estructura simbólica y funcional en comunidades indígenas contemporáneas? El objetivo es proponer un modelo de intervención que vincule la técnica vernácula con la planificación territorial autónoma.

METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto, fundamentado en una metodología de alcance exploratorio y descriptivo (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018). La metodología se articula bajo una visión multiescalar que permite comprender el territorio como un sistema vivo (Figura 2).

ESCALA MACRO: DELIMITACIÓN TERRITORIAL Y CATASTRO DE REDES DE CONECTIVIDAD.

La aproximación a la escala macro se estructuró a partir de la delimitación geográfica y el análisis morfométrico de la microcuenca que acoge al territorio comunitario de Las Lagunas Chukidel Ayllullacta del Cantón Saraguro, provincia de Loja, Ecuador, definiéndola como la unidad biofísica fundamental para la planificación del hábitat sustentable. En esta fase, se evaluaron las lógicas de implantación y trazado de los chakiñanes en relación directa con las variables topográficas y la red hídrica superficial. Para ello, se diseñó una base de datos geoespaciales mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), se utilizó como insumos cartográficos modelos digitales de elevación (MDE). Este procedimiento técnico se orientó a correlacionar las pendientes del terreno con los coeficientes de sinuosidad de las sendas ancestrales, que permiten examinar los patrones de eficiencia energética y adaptabilidad topográfica asociados a la movilidad peatonal del territorio comunitario.

Paralelamente, la reconstrucción del tejido vial histórico se complementó mediante cartografía social y recorridos de validación en campo. Este método integró la memoria colectiva local con técnicas de posicionamiento global (GPS) para el catastro georreferenciado de las redes

viales históricas y el registro sistemático de la toponimia vernácula asociada a hitos biofísicos y de gobernanza familiar (Ayllu). Con base en los postulados de Montaño Huerta (2017) sobre la visibilización de lógicas espaciales subyacentes en la ordenación de paisajes interculturales, el marco metodológico contempló la nomenclatura originaria como un registro de la memoria ambiental. La integración de los datos cualitativos de percepción comunitaria con las capas geométricas del territorio (Quizhpe Guamán, 2013) sirvió para consolidar una matriz cartográfica unificada. Este instrumento técnico funcionó como la base espacial para delimitar y justificar la selección del tramo objeto de investigación a mayor resolución en las escalas subsiguientes, prescindiendo de los enfoques de planificación urbana convencional que omiten la infraestructura de movilidad no motorizada de origen histórico.

ESCALA MESO: CARACTERIZACIÓN SOCIOESPACIAL Y DINÁMICAS COMUNITARIAS DEL HÁBITAT

La aproximación a la escala meso se planteó mediante un diseño de investigación de enfoque mixto, orientado a correlacionar la percepción socioespacial de la población con las dinámicas de uso, apropiación y conservación del entramado peatonal histórico. Para el componente cualitativo, el procedimiento metodológico contempló el diseño y aplicación de entrevistas semiestructuradas de carácter intergeneracional. El objetivo de este instrumento fue recopilar información orientada a reconstruir la memoria ambiental colectiva y analizar la evolución histórica del hábitat frente a los procesos de transformación urbana y vial contemporáneos. La recolección de datos se dirigió a tres lideresas pertenecientes al cabildo comunitario, seleccionadas mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional o por juicio. Los criterios de inclusión adoptados para este grupo de informantes clave exigieron: a) representatividad generacional y permanencia histórica en el territorio; b) conocimiento de la toponimia vernácula y de la cartografía social comunitaria; y c) ejercicio de roles vinculados a la gobernanza local y la toma de decisiones territoriales.

Por otra parte, el componente cuantitativo se estructuró, a través de un cuestionario administrado a una muestra de 40 jefes de familia de Las Lagunas. Con la finalidad de estandarizar el levantamiento del espacio habitado, se aplicó un muestreo no probabilístico por cuotas, que proyectan una distribución de las unidades de respuesta que cubriera los seis sectores consolidados que componen la morfología de la comunidad: Wabo loma, Lirios, Waile, Takchana, Rarik y Yarimala. El diseño metodológico de la encuesta operacionalizó variables de habitabilidad y sustentabilidad, enfocadas en medir las frecuencias de uso de los chakiñanes, los motivos de desplazamiento peatonal (acceso a parcelas agrícolas, pastoreo, abastecimiento hídrico o conectividad mística), la tipología de daños materiales en los senderos y la valoración comunitaria respecto a la protección del paisaje cultural. Los datos cualitativos recuperados fueron procesados mediante análisis de contenido categorial, mientras que los datos cuantitativos se tabularon en matrices estadísticas para el posterior cruce de variables espaciales.

ESCALA MICRO: ANÁLISIS FÍSICO-ESPACIAL Y REGISTRO FOTOGRAMÉTRICO DEL TRAMO PILOTO

La aproximación a la escala micro se centró en el reconocimiento morfológico de los accesos e intersecciones que conectan la vialidad motorizada central con la red de chakiñanes. El procedimiento metodológico combinó el trabajo de campo con técnicas de percepción remota cercana y registro fotográfico sistemático de alta resolución. Para la caracterización geométrica del entorno construido, se aplicó un método de reconstrucción fotogramétrica terrestre por tramos. Este proceso consistió en la captura secuencial de imágenes con un solape longitudinal superior al 70%, orientada a procesar y generar ortomosaicos bidimensionales y modelos digitales de superficie. Estas herramientas permitieron evaluar con precisión métrica la sección vial de las sendas, la materialidad de los cerramientos y la configuración de los accesos.

A través de esta documentación de micro-detalle, se parametrizó la continuidad física de los trazados peatonales para analizar su permeabilidad y condiciones de accesibilidad hacia nodos de la infraestructura hídrica y simbólica local (ojos de agua e hitos sagrados). El procesamiento de las piezas gráficas contempló la rectificación digital y el escalado de las muestras, que estructuran una línea base geométrica apta para identificar anomalías morfológicas, variaciones en el ancho de vía original y obstrucciones físicas.

PARAMETRIZACIÓN Y CRITERIOS TÉCNICOS DE CARACTERIZACIÓN CONSTRUCTIVA.

Para la caracterización material y la evaluación del estado de conservación de los chakiñanes, el procedimiento metodológico adecuó los lineamientos técnicos normalizados para la intervención en el sistema vial andino. Las variables analíticas se codificaron a partir de dos instrumentos de referencia patrimonial: el protocolo del Proyecto Qhapaq Ñan (INPC, 2004), del cual se extrajo el método de diagnóstico físico-ambiental de caminos prehispánicos, y la Guía para la capacitación en conservación preventiva de estructuras arqueológicas en piedra y tierra (Qhapaq Ñan-Ecuador, 2019), de la que se adoptaron los indicadores de deterioro en mampostería lítica.

La aplicación de ambos marcos estructuró una matriz de cotejo técnico empleada en los levantamientos de campo de la microescala. Este instrumento estandarizó la observación a través de tres ejes: a) morfología vial básica (tipologías de corte, relleno, plataformas o escalinatas);



Figura 3. Glosario de las Características Constructivas del Camino Real Inka. Fuente: Elaboración de los autores, partir de INPC (2004)

b) materialidad y sistemas de contención (muros de soporte o empedrados); y c) vulnerabilidad física (erosión por escorrentía o pérdida de sección). Al operativizar estos manuales como herramientas de diagnóstico en campo, se consolidó una base de datos paramétrica de los elementos preexistentes (Figura 18 y Figura 19). Esta caracterización geométrica constituye el andamiaje técnico indispensable para discutir los hallazgos materiales y fundamentar los posteriores lineamientos de consolidación en el área de estudio (Figura 3 y Figura 4).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CARACTERIZACIÓN, INVENTARIO Y TOPONIMIA DE LA RED ANCESTRAL DE CHAKIÑANES (ESCALA MACRO)

El procesamiento de los datos geoespaciales combinado con la validación de la cartografía social comunitaria dio como resultado la identificación y catalogación de un entramado vial histórico compuesto por 44 chakiñanes activos y latentes dentro del territorio de Las Lagunas (Figura 5). Lejos de constituir únicamente vestigios lineales aislados, estos ejes de movilidad se estructuran como una infraestructura verde y de baja emisión altamente integrada que responde a lógicas morfológicas, hídricas y socioculturales específicas del paisaje cultural andino. Al clasificar estas sendas de manera sistemática (Tabla 2), se observa una correspondencia directa entre la nomenclatura vernácula y la gobernanza del espacio vivido. El registro de hitos familiares en el 29.5% de la toponimia vial corrobora que la red peatonal histórica es indisociable de la estructura residencial y de parentesco del Ayllu, donde el espacio público actúa como un soporte físico para la memoria colectiva y la cohesión social. Esta vinculación funcional y simbólica valida los postulados de Montaño Huerta (2017) respecto a la toponimia originaria como un archivo ambiental vivo, y permite contrastar críticamente los modelos contemporáneos de planificación urbana convencional;

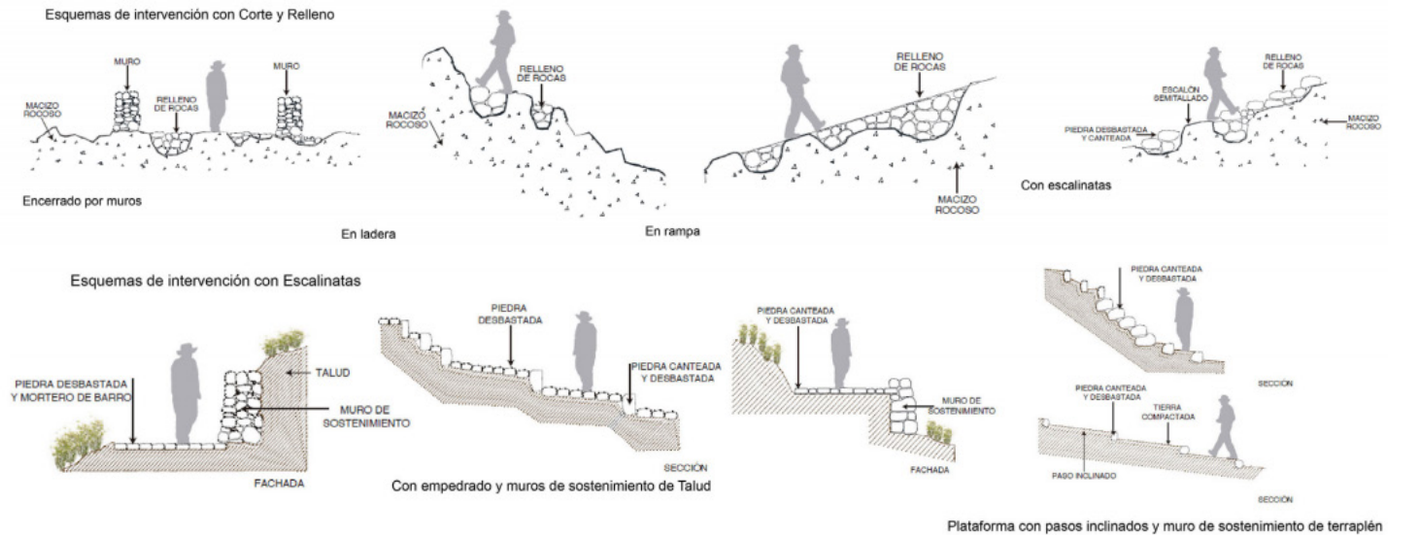


Figura 4. Esquemas de Intervención con Corte, Relleno y Escalinatas. Fuente: Elaboración de los autores a partir de Qhapaq Ñan-Ecuador (2019).

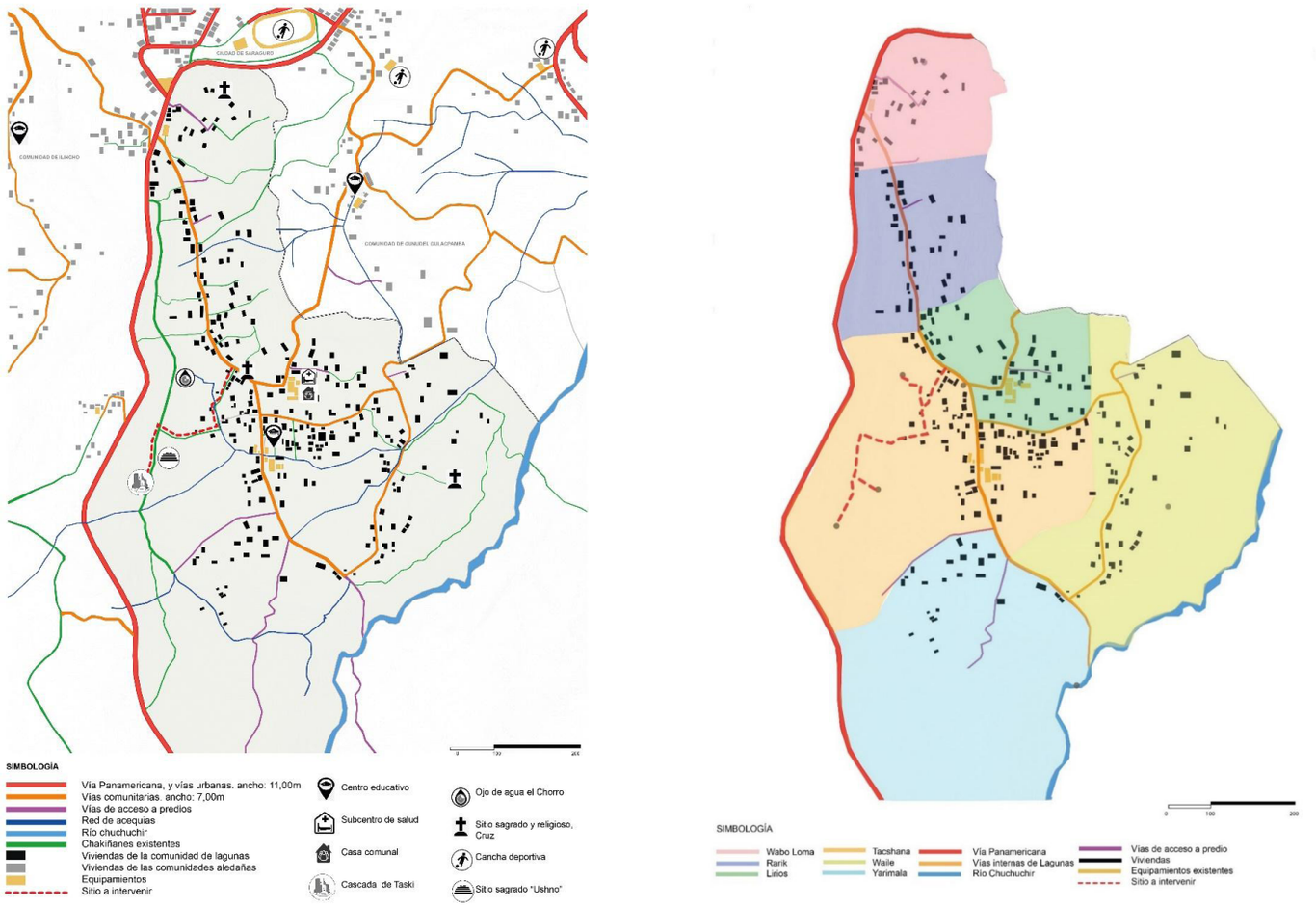


Figura 5. Mapa a escala de fragmento y sectores de la comunidad de Las Lagunas. Fuente: Lozano Guamán, 2022.

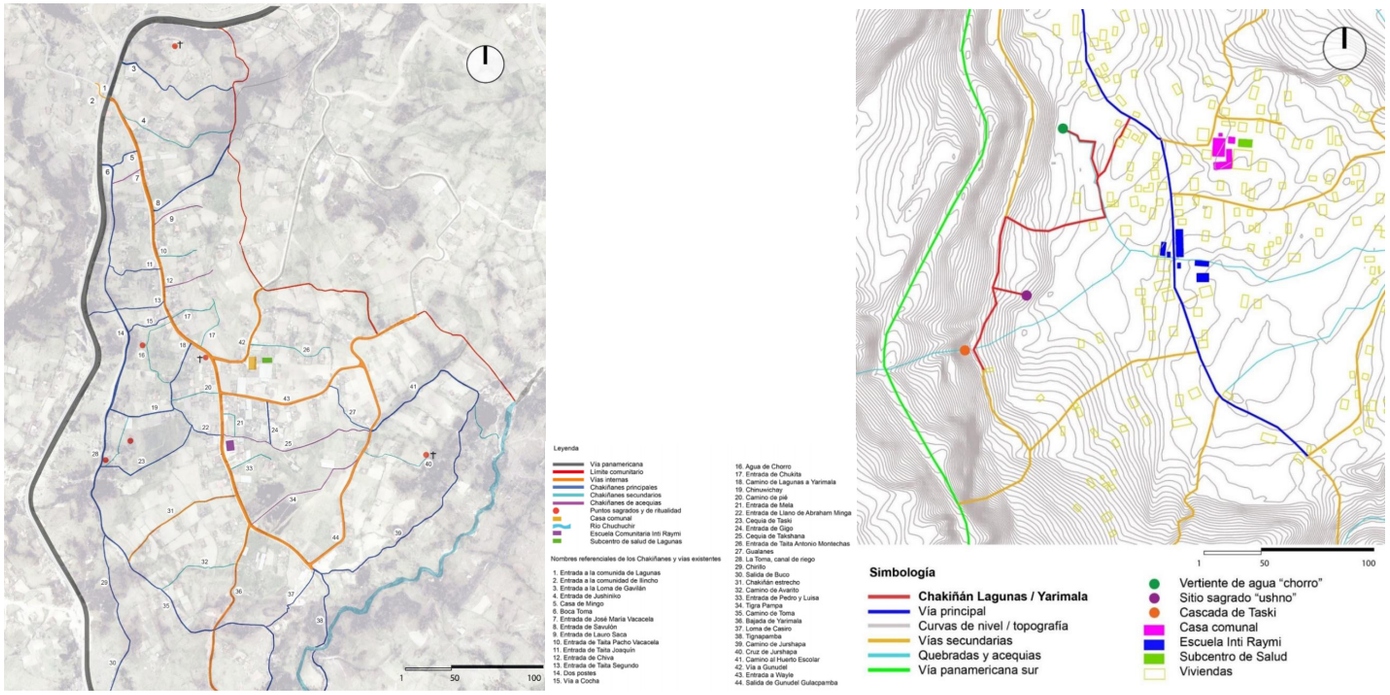


Figura 6. Mapeo de los Chakiñanes y acequias de la comunidad de Las Lagunas. Levantamiento topográfico. Fuente: Elaboración de los autores a partir de Google Maps.

Categoría	Nombres Registrados (Según Mapeo y Memoria Colectiva)
Entradas y Sectores (Conectividad)	(1) Entrada a la comunidad de Lagunas, (2) Entrada a la comunidad de Ilincho, (3) Entrada a la Loma de Gavilán, (4) Entrada de Jushiniko, (15) Vía a Cocha, (17) Entrada de Chukita, (18) Camino de Lagunas a Yarimala, (21) Entrada de Mela, (30) Salida de Buco, (36) Bajada de Yarimala, (42) Vía a Gunudel, (43) Entrada a Wayle, (44) Salida de Gunudel Gulacpamba.
Hitos Familiares y Personales (Toponimia)	(5) Casa de Mingo, (7) Entrada de José María Vacacela, (8) Entrada de Savulón, (9) Entrada de Lauro Saca, (10) Entrada de Taita Pacho Vacacela, (11) Entrada de Taita Joaquín, (12) Entrada de Chiva, (13) Entrada de Taita Segundo, (22) Entrada de Llano de Abraham Minga, (24) Entrada de Gigo, (26) Entrada de Taita Antonio Montechas, (32) Camino de Avarito, (33) Entrada de Pedro y Luisa.
Hidrografía y Riego (Infraestructura)	(6) Boca Toma, (16) Agua de Chorro, (23) Cequia de Taski, (25) Cequia de Takshana, (28) La Toma, canal de riego, (35) Camino de Toma.
Hitos Físicos y Paisajísticos	(14) Dos postes, (19) Chinuwichay, (27) Gualanes, (29) Chirillo, (34) Tigra Pampa, (37) Loma de Casiro, (38) Tignapamba, (39) Camino de Jurshapa, (40) Cruz de Jurshapa, (41) Camino al Huerto Escolar.
Tipologías Específicas	(20) Camino de pié, (31) Chakiñán estrecho.

Tabla 1. Identificación de los nombres de los Chaquiñanes de la comunidad de Las Lagunas. Fuente: Elaboración de los autores.

mientras estos últimos imponen nomenclaturas numéricas o ajenas que desarticulan el sentido de pertenencia, la red de chakiñanes preserva una cartografía social transgeneracional que fundamenta la gestión territorial autónoma de la comunidad (Figura 5 y Figura 6).

DINÁMICAS SOCIOESPACIALES Y TRANSFORMACIONES DEL HÁBITAT COMUNITARIO (ESCALA MESO)

La codificación de las entrevistas y el análisis estadístico revelan una contradicción estructural entre la persistencia simbólica del chakiñán y su progresiva degradación material en Las Lagunas. Históricamente, esta red peatonal operó como infraestructura de conectividad física y cohesión identitaria (Rodríguez Valbuena, 2011). No obstante, los testimonios intergeneracionales (Tabla 1) sitúan un quiebre en la década de 1960: la apertura de vías motorizadas modificó el metabolismo territorial, que desplazó el eje peatonal central y fragmentando el tejido social. Este fenómeno concuerda con Lozano Guamán, Jaramillo-Benavides, & Lozano-Guamán (2025) respecto a cómo la planificación convencional tiende a erosionar la autonomía comunitaria y la toponimia al desarticular los espacios colectivos autogestionados (Cerasi & Quaroni, 1990).

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 70 - 95
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.05

Nombre	Edad	Sector	Aporte Clave
Rosa Angelita Guamán	84	Lirios	Importancia histórica del chakiñán como única conexión y alerta sobre el olvido de sus nombres originales.
Rosa Delia Quizhpe	64	Rarik	Reivindicación de la identidad ancestral (Chukidel Ayllullacta) y el vínculo entre educación, valores y lengua.
Rosa Vicenta Guamán	57	Rarik	Perspectiva de gestión desde el Cabildo, que enfatiza la autonomía comunitaria y el riesgo de pérdida del espacio público.

Tabla 2. Síntesis de respuestas de entrevistas. Fuente: Elaboración de los autores.

Pregunta	Variable / Opción	Porcentaje (%)	Resultado numérico en relación a los 40 encuestados (100%)
1. Sector donde vive el comunero encuestado	Rarik	32,50%	Sector mayoritario de procedencia (13 de 40 comuneros).
	Wabo Loma	17,50%	Zona representativa empatada con Waile (7 de 40 comuneros).
	Waile	17,50%	Zona representativa empatada con Wabo Loma (7 de 40 comuneros).
	Yarimala	15,00%	Participación intermedia regular (6 de 40 comuneros).
	Takshana	12,50%	Participación baja en el diagnóstico (5 de 40 comuneros).
	Lirios	5,00%	Menor cantidad de registros censados (2 de 40 comuneros).
	Total, de la Pregunta	100,00%	Cierre exacto sobre la muestra de 40 comuneros encuestados.
2. Uso que le dan a los Chakiñanes en la actualidad	Traslado de animales	43,80%	Representa el 43.8% del total de usos mencionados (28 menciones).
	Acceso a cultivos agrícolas	23,40%	Representa el 23.4% del total de usos mencionados (15 menciones).
	De paso hacia otra comunidad	17,20%	Representa el 17.2% del total de usos mencionados (11 menciones).
	Acceso a una vivienda	15,60%	Representa el 15.6% del total de usos mencionados (10 menciones).
	Total, de la Pregunta	100,00%	Cierre al 100.0% basado en el volumen total de las 64 menciones acumuladas.
3. Frecuencia con la que da uso a un chaquiñán	Rara vez	45,00%	Frecuencia predominante de carácter esporádico (18 respuestas).
	De 3 a 4 veces por semana	27,50%	Tránsito regular intermedio por labores (11 respuestas).
	Una vez, o varias veces al día	17,50%	Usuarios intensivos cotidianos de la vía (7 respuestas).
	Una vez a la semana	10,00%	Uso puntual de baja frecuencia recurrente (4 respuestas).
	Total, de la Pregunta	100,00%	Cierre exacto sobre la muestra de 40 comuneros encuestados.
4. Aspectos que afectan a los chakiñanes en la actualidad	Falta de mantenimiento	41,30%	Constituye el 41.3% del total de incidencias (26 menciones).
	Falta de interés de mantenimiento por parte de las autoridades	34,90%	Constituye el 34.9% del total de incidencias (22 menciones).
	Falta de control del mal uso por parte de la población	14,30%	Constituye el 14.3% del total de incidencias (9 menciones).
	Inseguridad al caminar	9,50%	Constituye el 9.5% del total de incidencias (6 menciones).
	Total, de la Pregunta	100,00%	Cierre al 100.0% basado en las 63 respuestas totales a problemas.

Pregunta	Variable / Opción	Porcentaje (%)	Resultado numérico en relación a los 40 encuestados (100%)
5. Nivel de colaboración en el caso de reconstrucción de un chaquiñán	Parcial	47,50%	Predisposición condicionada a tiempos o recursos (19 respuestas).
	Total	42,50%	Compromiso cívico directo y absoluto con la obra (17 respuestas).
	Poca	7,50%	Limitaciones severas o bajo interés de apoyo (3 respuestas).
	Ninguna	2,50%	Rechazo o imposibilidad absoluta de integrarse a mingas (1 respuesta).
	Total, de la Pregunta	100,00%	Cierre exacto sobre la muestra de 40 comuneros encuestados.
6. Uso que se le diera a los Chakiñanes en la actualidad (Proyección)	Mejor conexión entre la comunidad y los...	33,30%	Aporta el 33.3% del total de ideas de mejora (24 menciones).
	Generar una ruta turística por toda la...	29,20%	Aporta el 29.2% del total de ideas de mejora (21 menciones).
	Espacios de descanso	22,20%	Aporta el 22.2% del total de ideas de mejora (16 menciones).
	Ciclovía	13,90%	Aporta el 13.9% del total de ideas de mejora (10 menciones).
	Solo mantenerlas transitables	1,40%	Aporta el 1.4% del total de ideas de mejora (1 mención).
	Total, de la Pregunta	100,00%	Cierre al 100.0% basado en las 72 respuestas proyectivas acumuladas.

Tabla 3. Matriz de preguntas y respuestas de encuestas. Fuente: Elaboración de los autores.

Los datos cuantitativos (Tabla 3) respaldan empíricamente esta transición morfológica. Aunque existe consenso sobre su valor cultural, el 45.00% de los encuestados transita por ellos "rara vez", vinculándose su uso actual casi exclusivamente al traslado de animales (43.80%) y acceso a cultivos (23.40%). Así, el chakiñán queda relegado a un rol periurbano secundario, que alteran lo que Van der Voordt & De Jong (2002) definen como el equilibrio funcional del hábitat. Esta desarticulación física ha derivado en conflictos por alteración de linderos prediales, que exigen la activación de la justicia indígena para restablecer el orden territorial (Rodríguez Valbuena, 2011). Pese a que el 41.30% atribuye el deterioro a la falta de mantenimiento institucional, el capital social del Ayllu permanece latente: el 42.50% manifiesta predisposición total a integrarse en mingas de reconstrucción. Frente a estas métricas, la rehabilitación vial se alinea con Borja & Muxí (2003) al optimizar el espacio colectivo autónomo, que fundamenta un modelo de hábitat sustentable basado en la movilidad de baja emisión y la gestión comunitaria del paisaje.

ESCALA MICRO

El análisis mediante el registro fotográfico y edición fotogramétrica de los accesos desde la red vial principal hacia la red peatonal interna expone las discontinuidades físicas del sistema de movilidad ancestral. Las restituciones por tramos evidencian que las perturbaciones se concentran en las zonas de transición con el eje vial motorizado. La privatización del suelo y las irregularidades en cerramientos perimetrales redujeron los anchos útiles históricos de las sendas, que transforma nodos de encuentro tradicionales en pasillos residuales. Esta fragmentación compromete el acceso comunitario a la infraestructura hídrica, productiva y de significación espiritual.

Mediante la superposición de variables físicas (accesibilidad, conservación y conectividad) y simbólicas (hitos del paisaje cultural), se seleccionó un tramo piloto estratégico (Figura 7, Figura 8 y Figura 9). Los criterios de selección respondieron a su representatividad multidimensional: el sendero articula los sectores Lirios y Yarimala, que integra tres nodos de la infraestructura hidráulico-ceremonial andina: El Chorro (vertiente), El Ushno (centro ceremonial) y la Cascada de Taski (sistema ecológico-ritual).

El diagnóstico de estos componentes devela un gradiente de vulnerabilidad ambiental. Mientras El Chorro exhibe calidad de agua estable pero amenazada por escorrentías superficiales, la Cascada de Taski presenta una afectación crítica por contaminación antrópica y reducción del caudal. El análisis funcional de mapas, bajo las directrices de Van der Voordt & De Jong (2002), demostró que este tramo opera como un conector transversal de crestas topográficas y llanuras hídricas dispersas. Así, el chakiñán seleccionado condensa la complejidad geomorfológica de la microcuenca, articulándose el territorio de forma activa.

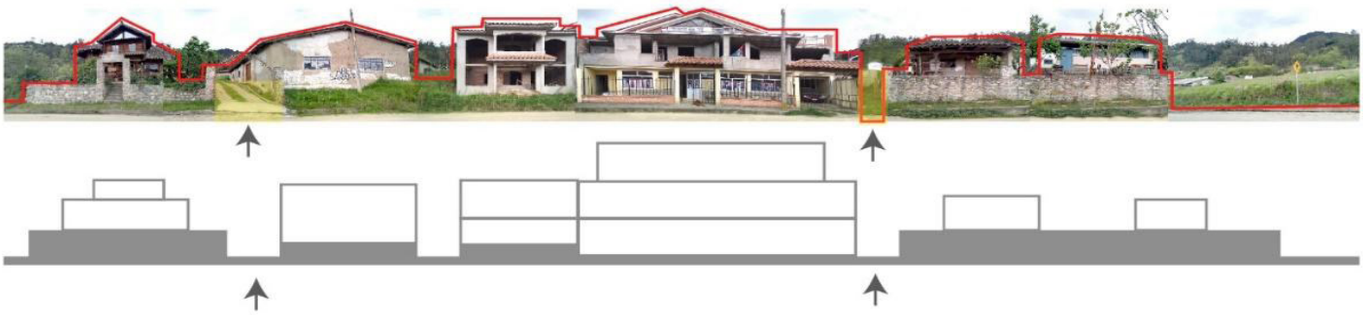


Figura 7. Tramo 1/9. Análisis fotogramétrico desde el eje vial principal de Las Lagunas. Fuente: Elaboración de los autores.

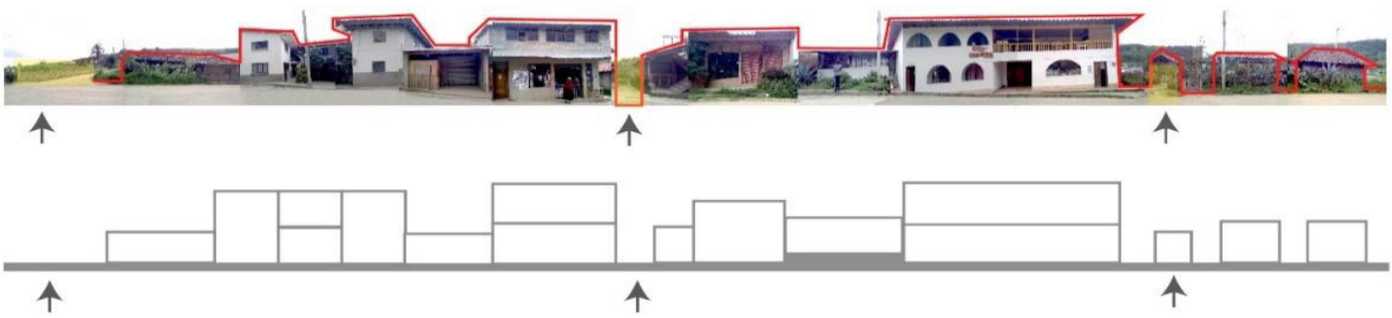


Figura 8. Tramo 2/9. Análisis fotogramétrico desde el eje vial principal de Las Lagunas. Fuente: Elaboración de los autores.

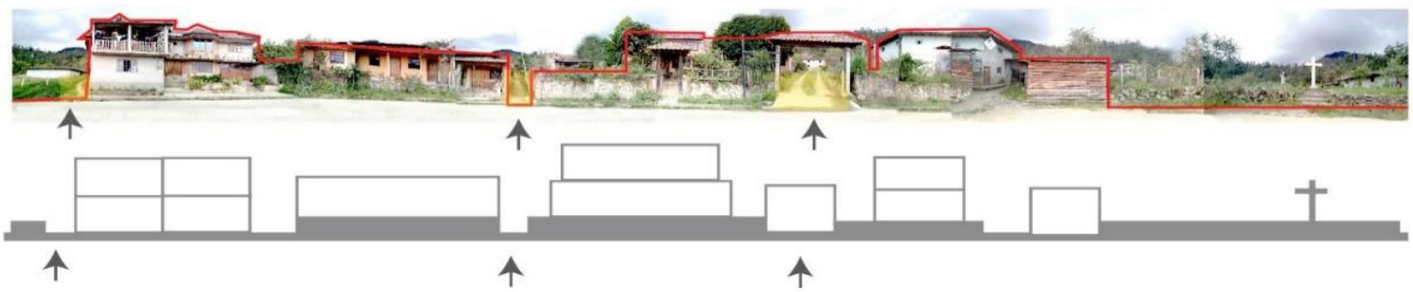


Figura 9. Tramo 3/9. Análisis fotogramétrico de 3 tramos. Fuente: Elaboración de los autores.

PROPUESTA DE INTERVENCIÓN: ESTRATEGIAS DE REVITALIZACIÓN DEL HÁBITAT SUSTENTABLE

Lineamientos de Diseño Sostenible y Articulación Multiescalar

La traducción de los hallazgos empíricos y analíticos en respuesta al planteamiento de la propuesta, se instrumentaliza, a través de un modelo de revitalización territorial de infraestructura de baja emisión. El proyecto piloto se concibe como un sistema conectivo adaptado a las dinámicas del territorio vivo de la comunidad de Las Lagunas. Con base en las problemáticas identificadas como la pérdida de ancho útil, degradación ecológica y fragmentación peatonal, la intervención se articula mediante cuatro dimensiones operativas orientadas al hábitat sustentable:

- Recuperación Morfológica y Justicia Espacial: Restablecimiento de secciones viales originales (1.50 m a 3.00 m) para mitigar las obstrucciones físicas detectadas mediante fotogrametría y restituir la continuidad del flujo peatonal autónomo comunal (Lozano Guamán et al., 2025).
- Conservación Preventiva de Ecosistemas Hídricos: Implementación de técnicas constructivas pasivas no invasivas en vertientes de agua y estructuras prehispánicas para prevenir la degradación material

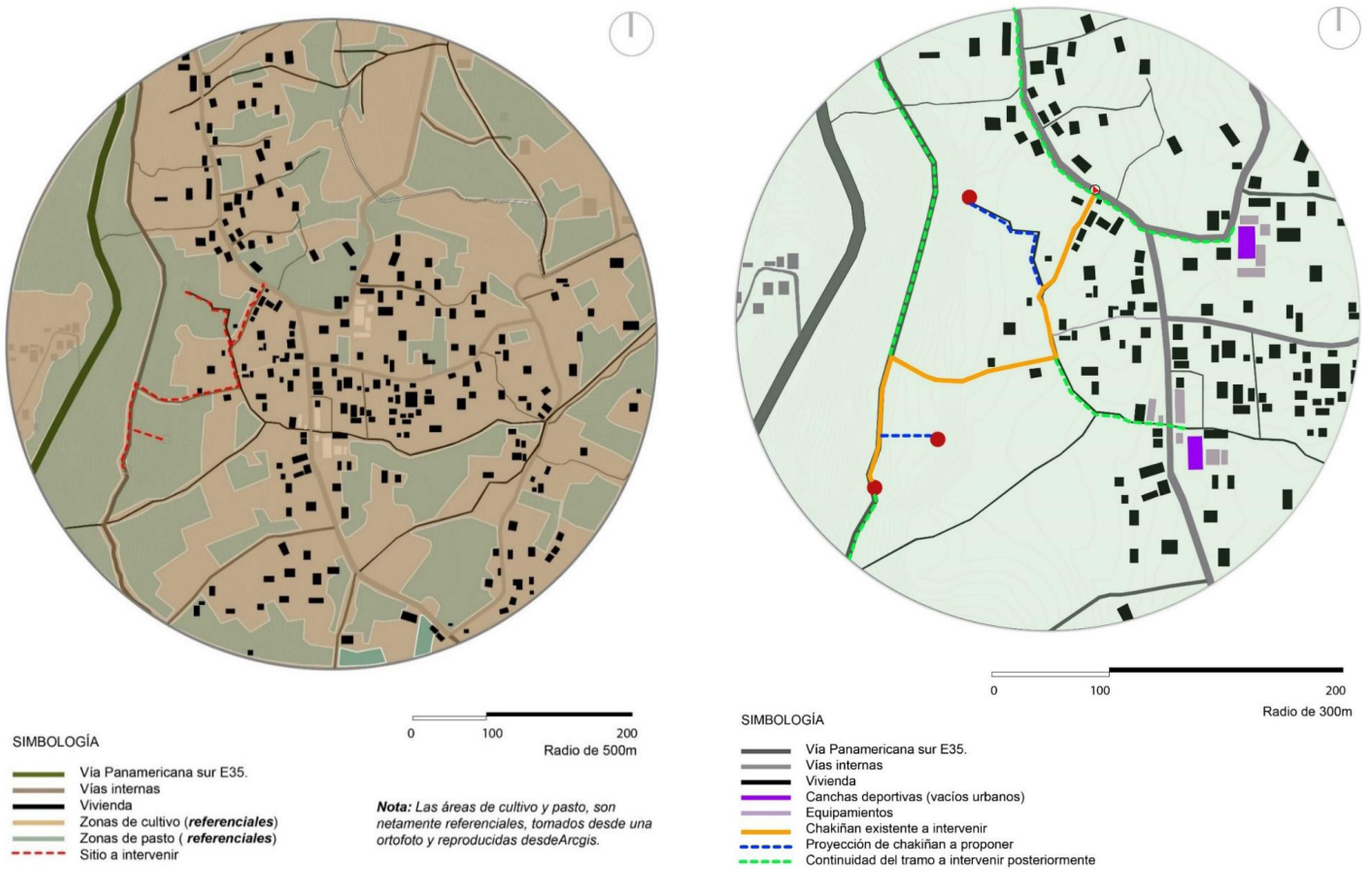


Figura 10. Mapas de Uso de Suelo, conexión de los equipamientos comunitarios y los sitios sagrados del tramo elegido en radios de 500m, 300m. Fuente: Elaboración de los autores a partir de Google Maps.

y la contaminación hídrica superficial (Qhapaq Ñan-Ecuador, 2019).

- Inclusión y Mitigación Topográfica: Estabilización de taludes y diseño de gradas, rampas peatonales y senderos permeables adaptados al relieve andino, que optimiza la seguridad de la movilidad a escala humana sin alterar la escorrentía natural.
- Revitalización Paisajística y Señalética Identitaria: Incorporación de vegetación nativa para consolidar corredores biológicos e instalación de dispositivos de comunicación visual basados en la toponimia vernácula (Montaño Huerta, 2017).

Zonificación por tramos de intervención morfo-paisajística

De acuerdo con el diagnóstico micro, el trayecto se subdividió en tramos homogéneos para resolver conflictos de lindero y accesibilidad.

Tramo de transición vial y accesos: Consolidan el ingreso desde el eje motorizado mediante la estabilidad de bordes con muros de piedra e integran las acequias abiertas para mitigar la erosión por escorrentía pluvial y vertientes de agua (Figura 12).

Tramos conectores inmediatos: Ubicados en zonas de alta presión agrícola. Redefinen los límites de chakiñan mediante cercas vivas con flora endémica, garantizando el flujo peatonal y el tránsito de ganado menor, respondiendo al 43,80% de los usos productivos identificados (Figura 10 y Figura 11).

A partir de los resultados del diagnóstico, se seleccionó un tramo piloto basado en su valor simbólico y conectividad espiritual. El criterio de selección priorizó el sendero que vincula el sector Lirios con Yarimala, por integrar tres nodos de conectividad de la infraestructura hídrica-espiritual y su valor dentro del paisaje patrimonial como son: *El Chorro* (vertiente), *El Ushno* (centro ceremonial) y la *Cascada de Taski* (Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16 y Figura 17).

ARQUITECTURA DEL PAISAJE CULTURAL: INTERVENCIONES EN SITIOS SAGRADOS E INFRAESTRUCTURA DE SOPORTE (TAMBOS).

La intervención arquitectónica formaliza la articulación entre saberes locales, preservación patrimonial y planificación sustentable mediante el tratamiento singularizado de tres sitios sagrados (Figura 18), como se describe en la Tabla 4.

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 70 - 95
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.05

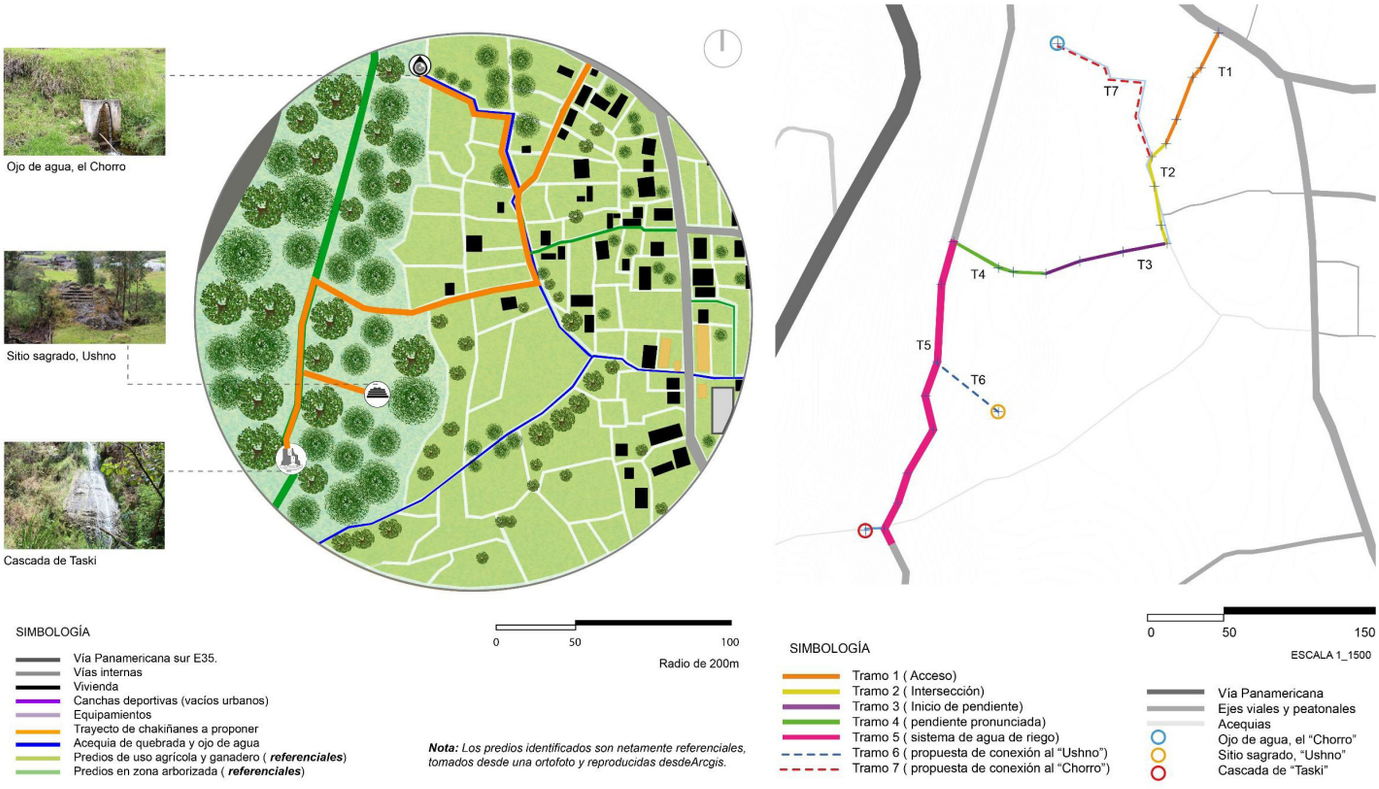


Figura 11. Mapa a 200m de radio de los sitios sagrados a intervenir. División por tramos. Fuente: Ortofoto, ArcGIS.



Figura 12. Trayecto del Chaquiñán a intervenir. Fuente: Elaboración de los autores.

- Revitalización del Chorro (ojo de agua). Confinamiento técnico de la vertiente mediante un vaso de captación de piedra local para evitar contaminantes externos, que adiciona un espacio ceremonial y que a su vez recupera su función de lavadero comunitario y nodo de cohesión social bajo criterios de eficiencia hídrica (Figura 19 y Figura 20).
- Consolidación del Ushno: Remoción de vegetación invasiva y delimitación perimetral de la estructura arqueo-astronómica con pavimentos de piedra permeables, que resaltan la geometría de la plataforma para su conservación preventiva y uso ceremonial (Figura 21 y Figura 22).
- Saneamiento de la Cascada de Taski: Implementación de humedales artificiales de flujo subsuperficial (fitorremediación) previos a la descarga para mitigar la contaminación crítica, complementados con miradores de bajo impacto integrados a la topografía (Figura 23 y Figura 24).

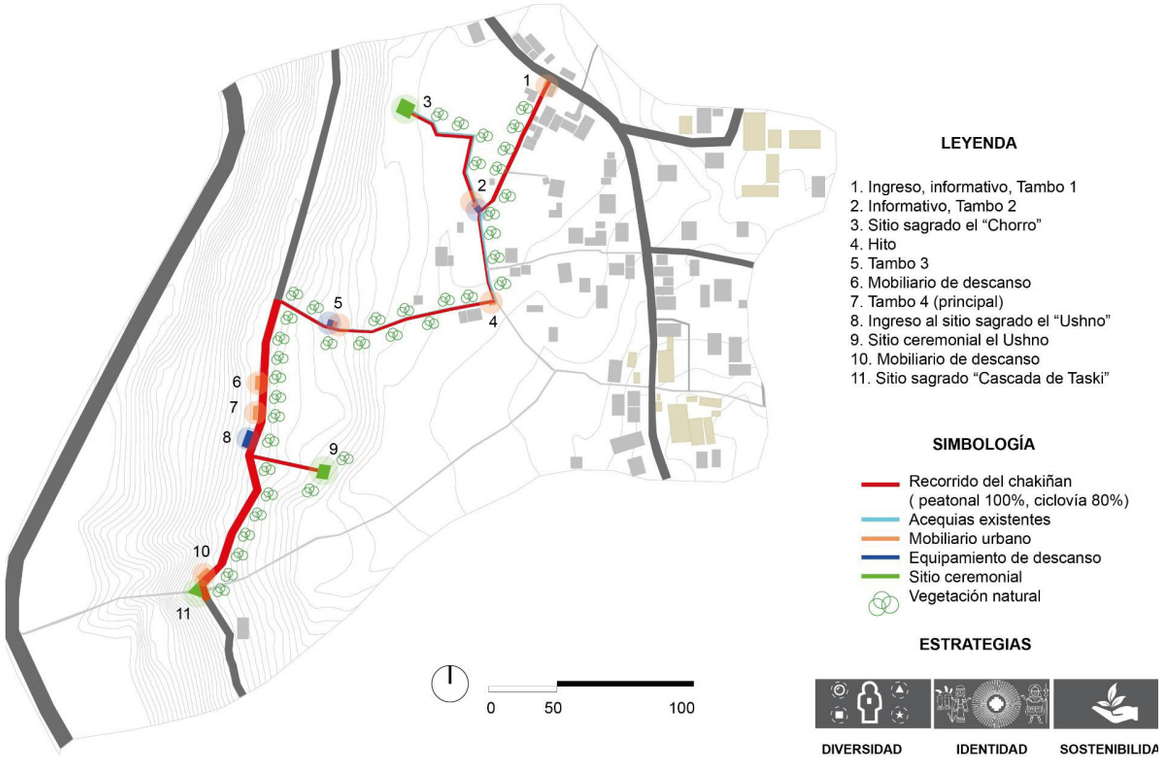


Figura 13. Mapa de propuesta de intervención por tramos según sus características físicas y estrategias. Fuente: Elaboración de los autores.

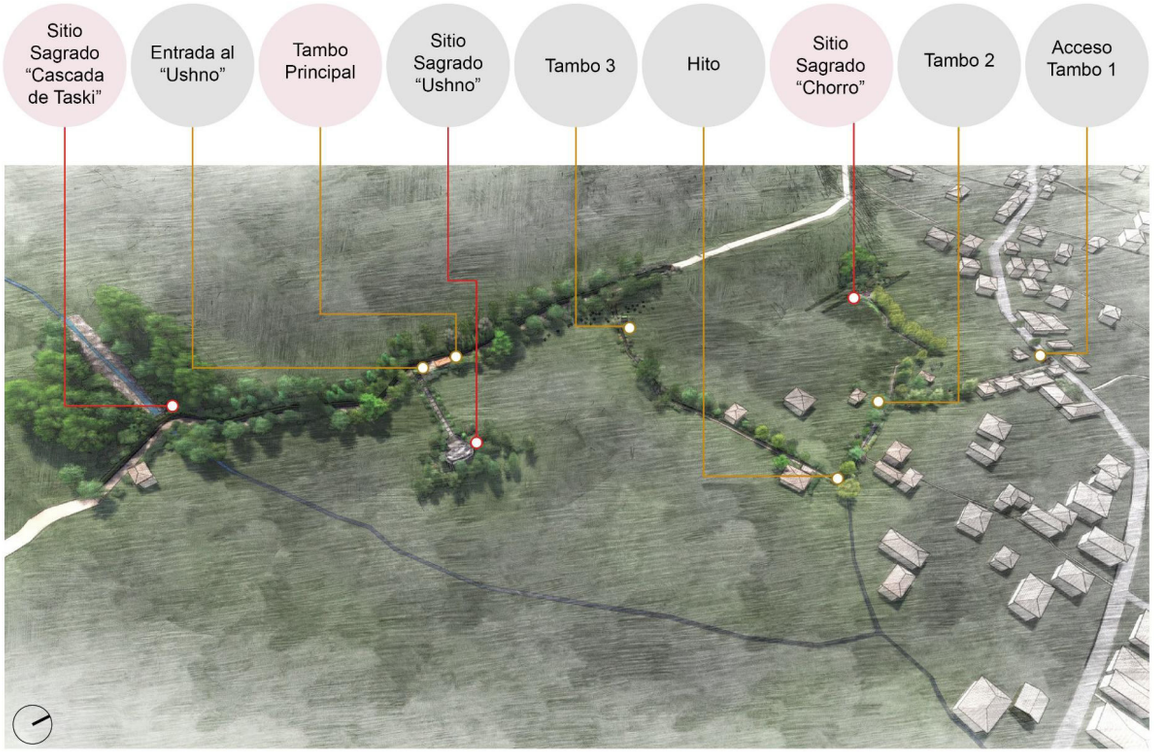


Figura 14. Visualización aérea de la intervención por tramos. Fuente: Elaboración de los autores.

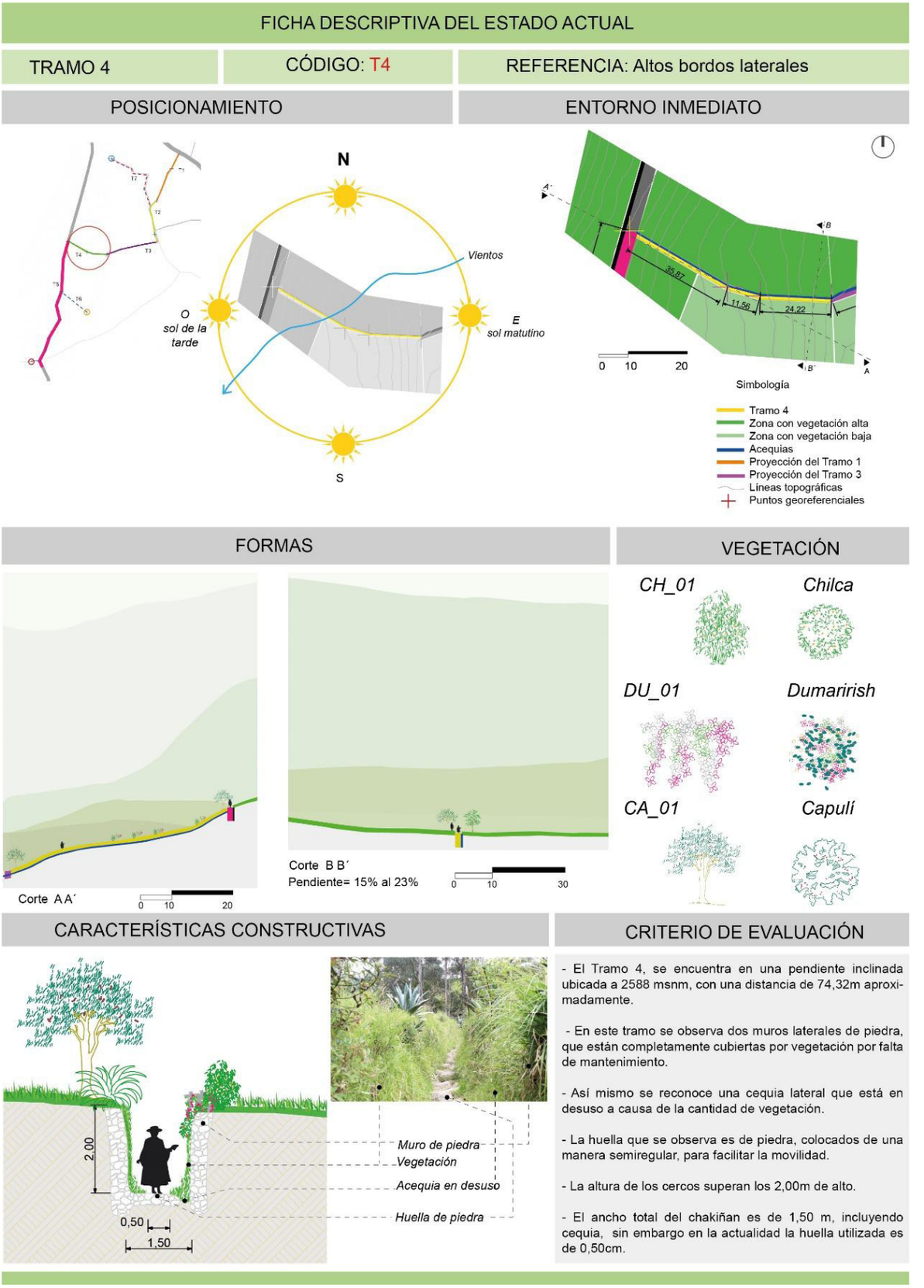


Figura 15. Fichas de análisis del Estado Actual del Tramo 4. Fuente: Elaboración de los autores.

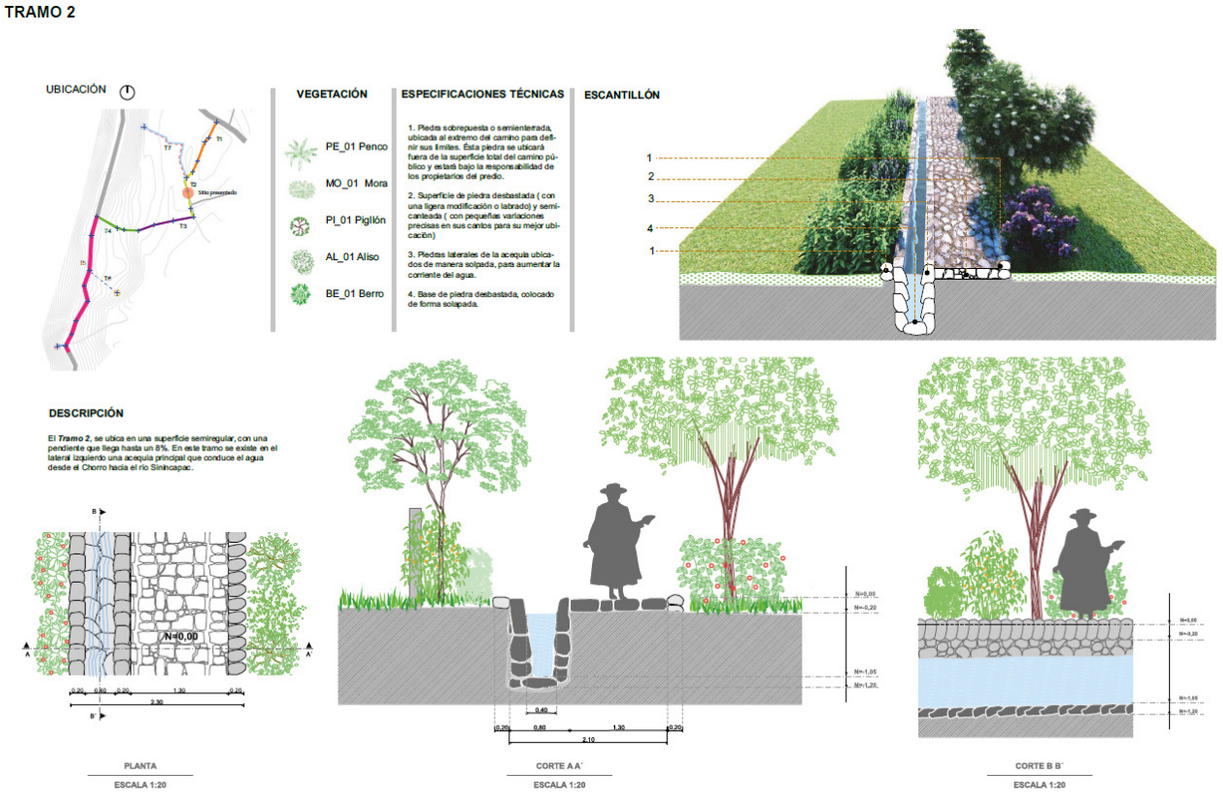


Figura 16. Propuesta de intervención en el Chaquiñán del Tramo 2. Fuente: Elaboración de los autores.

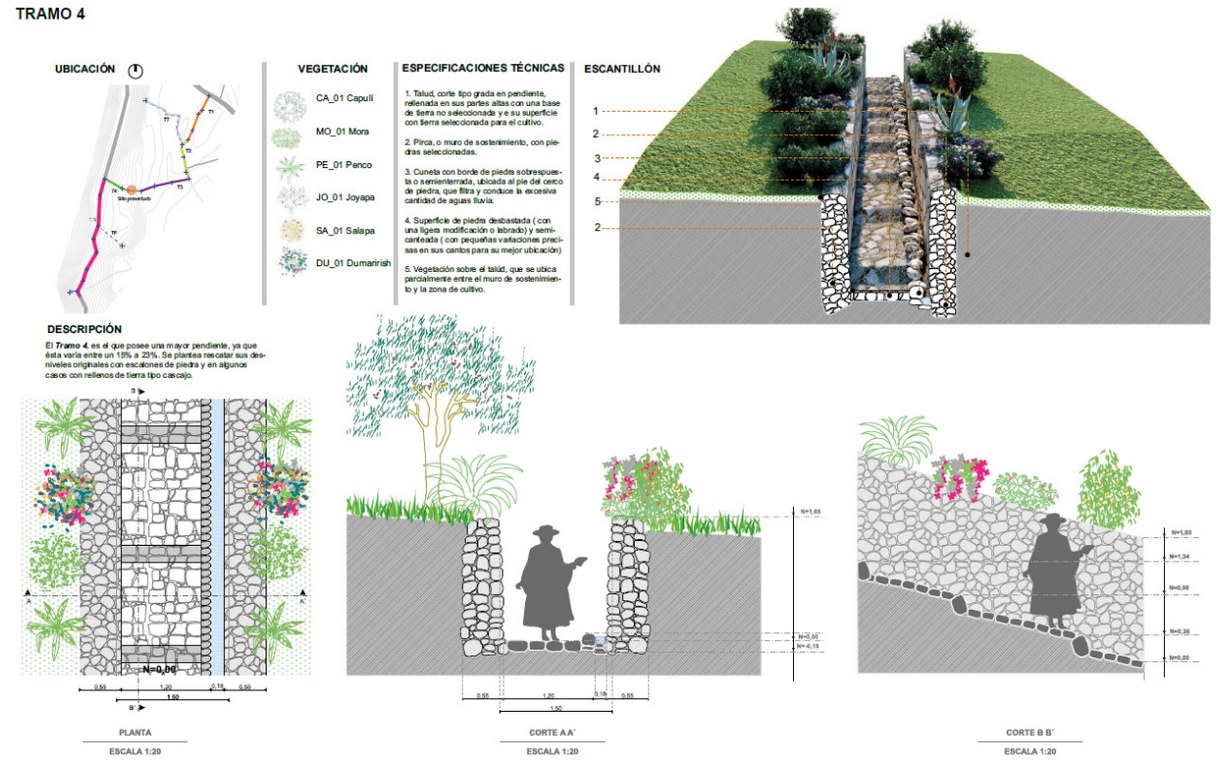


Figura 17. Propuesta de intervención en el Chaquiñán del Tramo 4. Fuente: Elaboración de los autores.

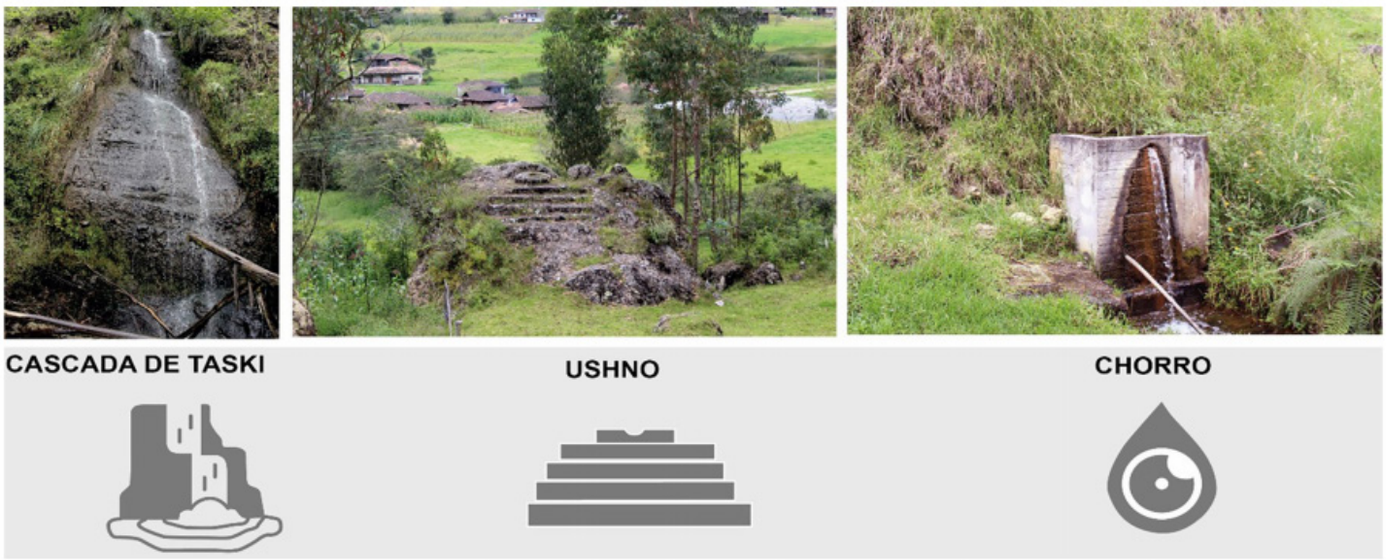


Figura 18. Fotografía de los sitios sagrados a intervenir. Fuente: Elaboración de los autores.

CASCADA DE TASKI	USHNO	CHORRO
Descripción: Símbolo sagrado andino para sanación y ritualidad; representa el origen de la vida y la sangre de la tierra.	Descripción: Estructura piramidal para ceremonias e hitos astronómicos donde el agua o la chicha son protagonistas.	Descripción: Vertiente subterránea que históricamente servía como sitio sagrado para el baño de las princesas o ñustas.
Estado: Presenta contaminación crítica y una disminución progresiva de su caudal natural.	Estado: Ubicado estratégicamente cerca de la red vial Inka por la abundancia de fuentes hídricas en el entorno.	Estado: Agua de buena calidad por filtración natural; requiere canalización para evitar desbordes y agentes externos.

Tabla 4. Características de los sitios sagrados: El Ushno, El Chorro, La cascada de Taski. Fuente: Elaboración de los autores.

Como soporte al trayecto y ante la proyección de uso comunitario y turístico manifestada por el 29.20% de los encuestados, se incorpora la tipología ancestral del Tambo (sitio de descanso). Estas estructuras funcionan como refugios, puntos de control territorial y pabellones de interpretación del paisaje. Su materialidad se fundamenta en la arquitectura de baja emisión y el metabolismo circular, a través de:

- Estructura portante: Entramados de madera local y sistemas de bahareque (barro, paja y caña) (Calderón, 1985), que reducen la huella de carbono incorporado y revalorizan las tecnologías vernáculas de Saraguro (Cevallos Salas, 2003) (Figura 25).
- Estrategias pasivas: Cubiertas verdes con vegetación nativa para optimizar el aislamiento térmico e integrar el volumen al entorno paisajístico (Figura 26).
- Saneamiento ecológico: Módulos de baños secos composteros en el pabellón principal. Esta solución responde a la ausencia de alcantarillado en la microcuenca, que previenen la contaminación de acuíferos y cierra el ciclo de nutrientes al generar abono orgánico para los cultivos locales (figura 27 y Figura 28).

DISCUSIÓN

El aporte disciplinar de esta investigación al campo del hábitat sustentable radica en la validación de la movilidad ancestral como una tipología de infraestructura verde y de baja emisión aplicable a la mitigación del cambio climático y a la ordenación del territorio rural. El análisis multiescalar e integrado de la red de chakiñanes demuestra que estas estructuras no operan como vestigios lineales aislados, sino como componentes dinámicos de un paisaje cultural andino interconectado. Este enfoque conceptual concuerda con las aproximaciones multidimensionales expuestas por Novoa Rios & Hernández García (2026), quienes sostienen que la rehabilitación integral del hábitat exige entrelazar la funcionalidad técnica de la infraestructura con las dimensiones perceptuales y espaciales que las comunidades configuran en su cotidianidad. Frente a los modelos contemporáneos de planificación urbana periférica y motorizada que fragmentan las microcuencas, la preservación de senderos peatonales permeables, la gestión colectiva del agua de escorrentía mediante acequias y el uso de sistemas constructivos de bajo impacto ambiental —

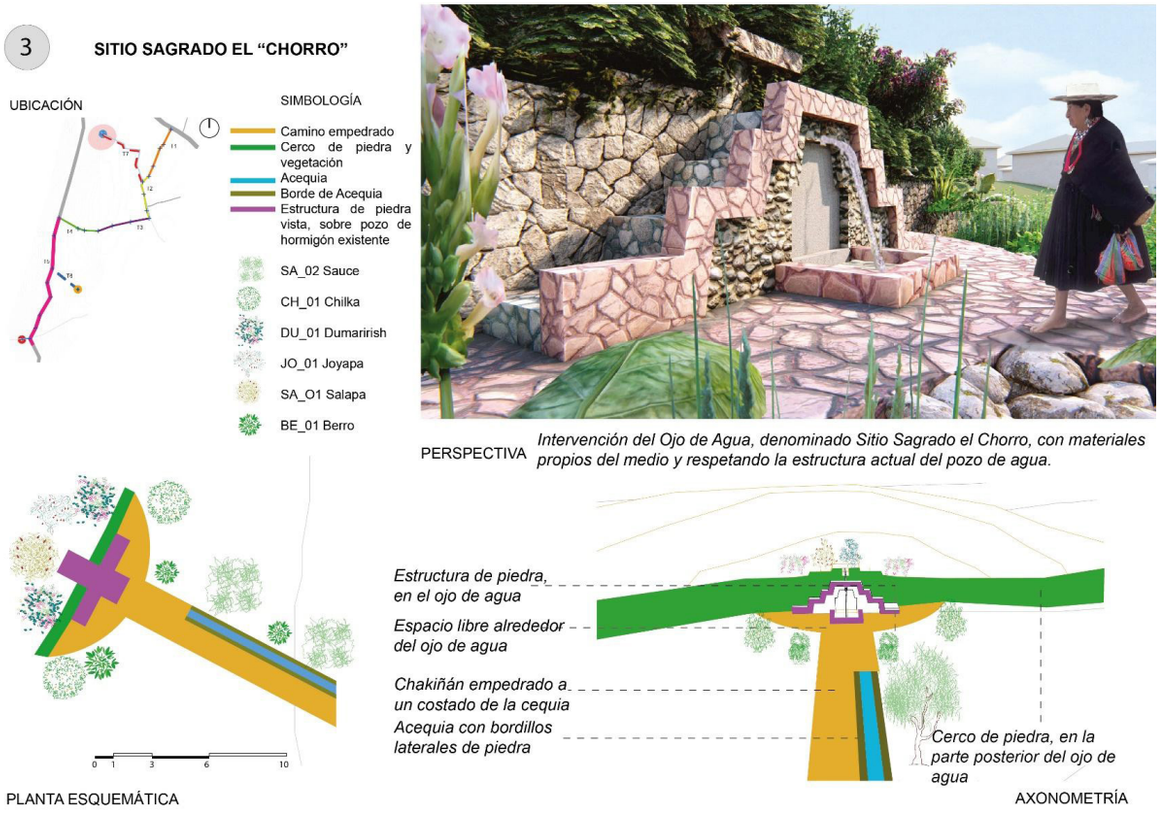


Figura 19. Propuesta de intervención del Tramo 3. Fuente: Elaboración de los autores.

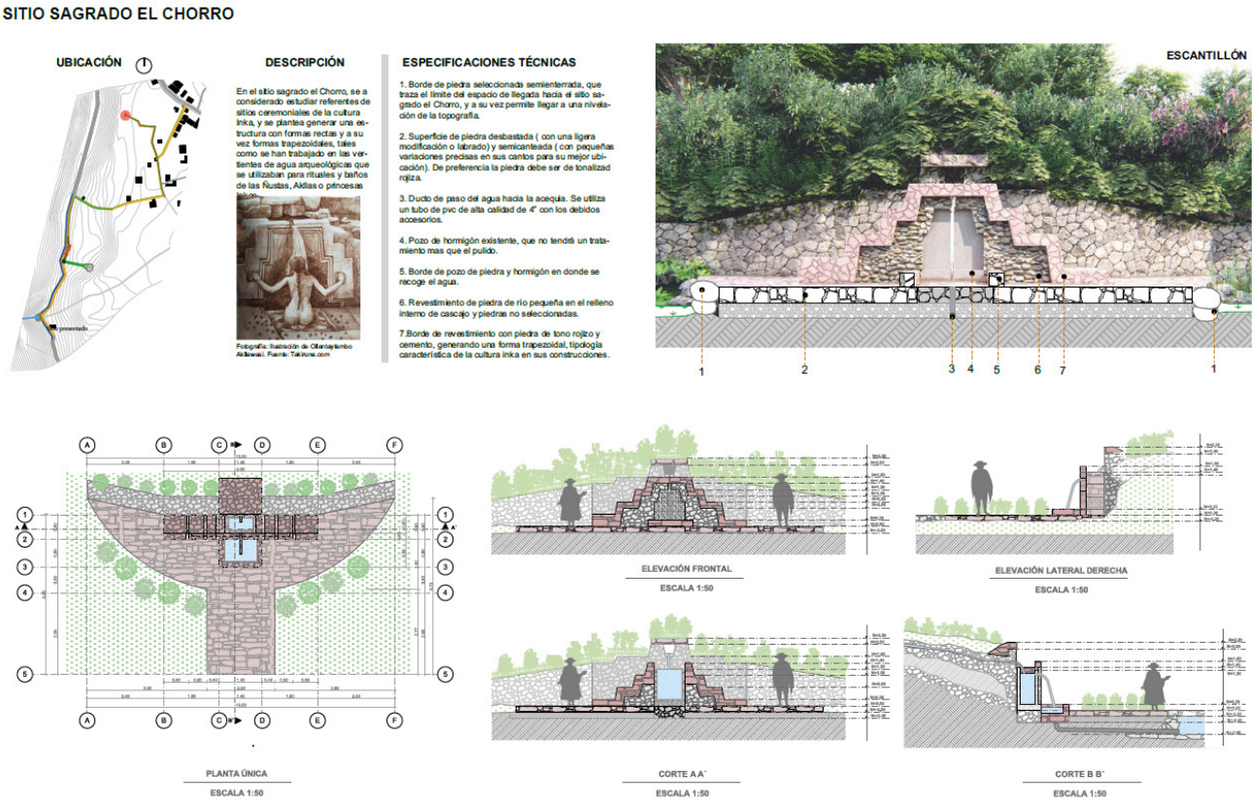


Figura 20. Propuesta de intervención en el sitio sagrado El Chorro. Fuente: Elaboración de los autores.

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 70 - 95
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.05

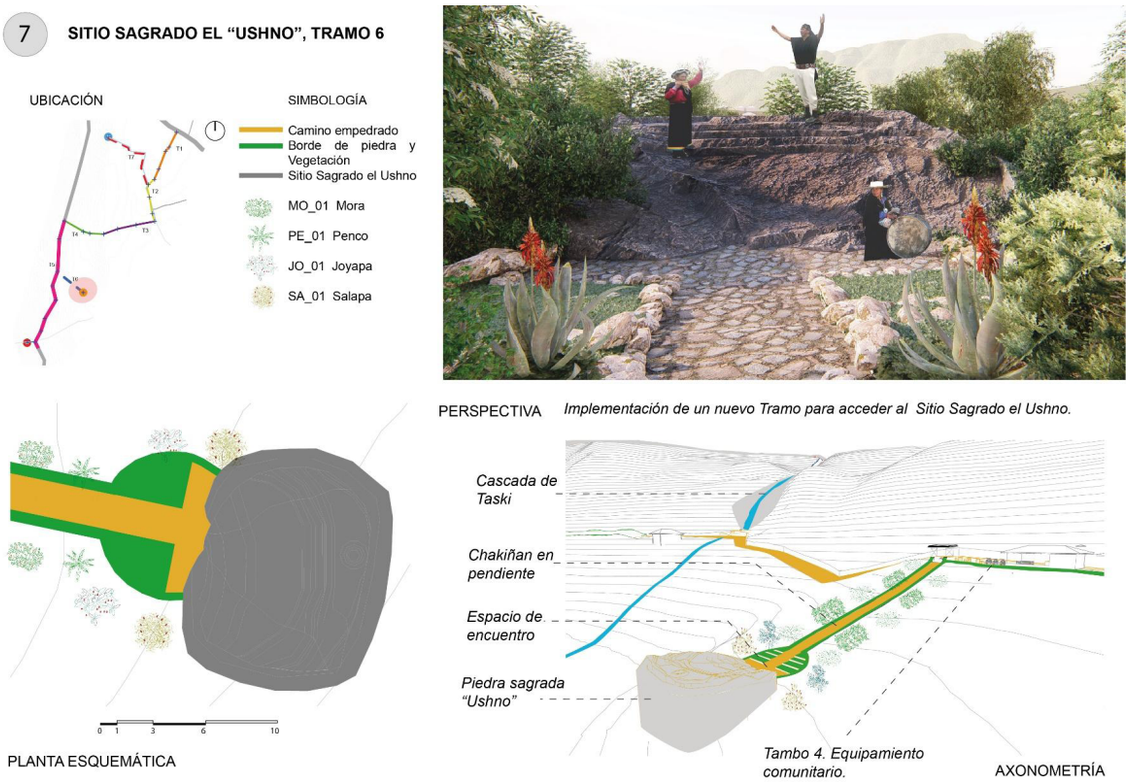


Figura 21. Propuesta de intervención del Tramo 7. Fuente: Elaboración de los autores.

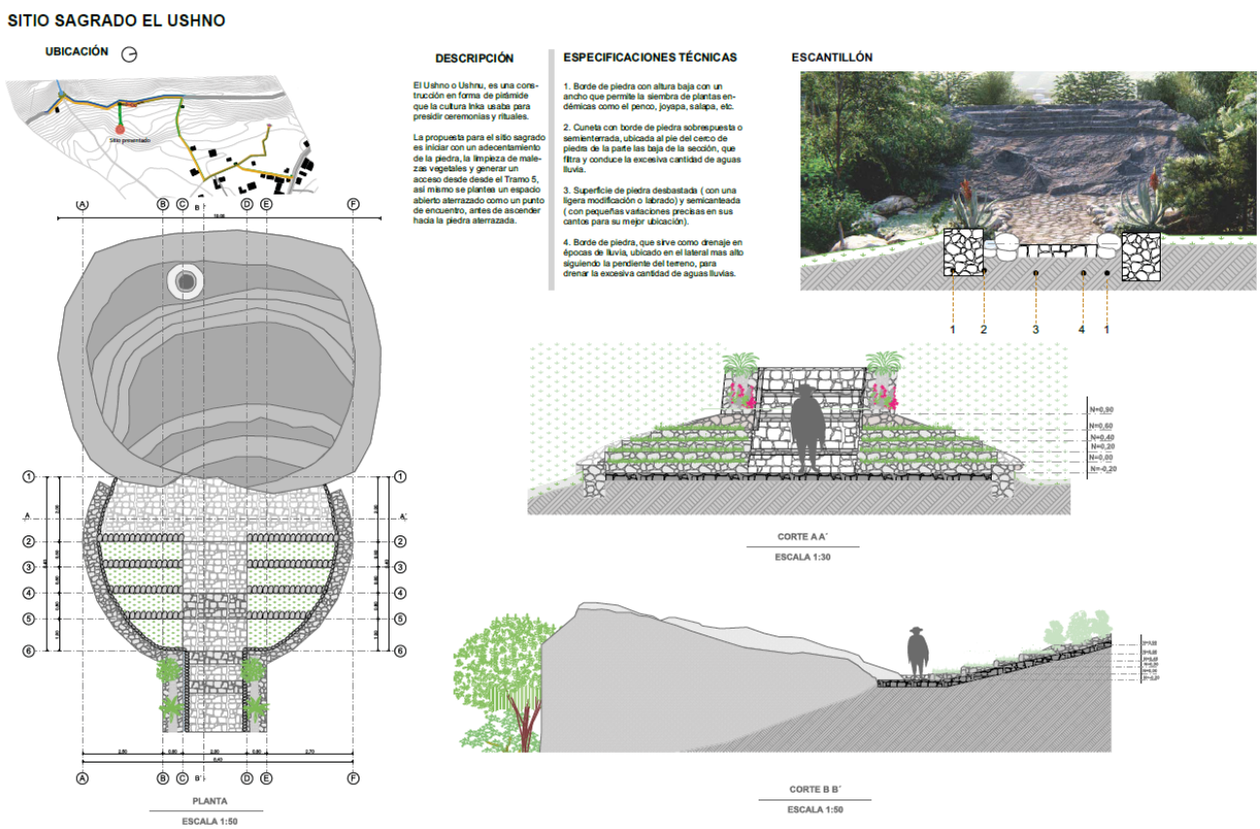


Figura 22. Propuesta de intervención en el sitio sagrado El Ushno. Fuente: Elaboración de los autores.

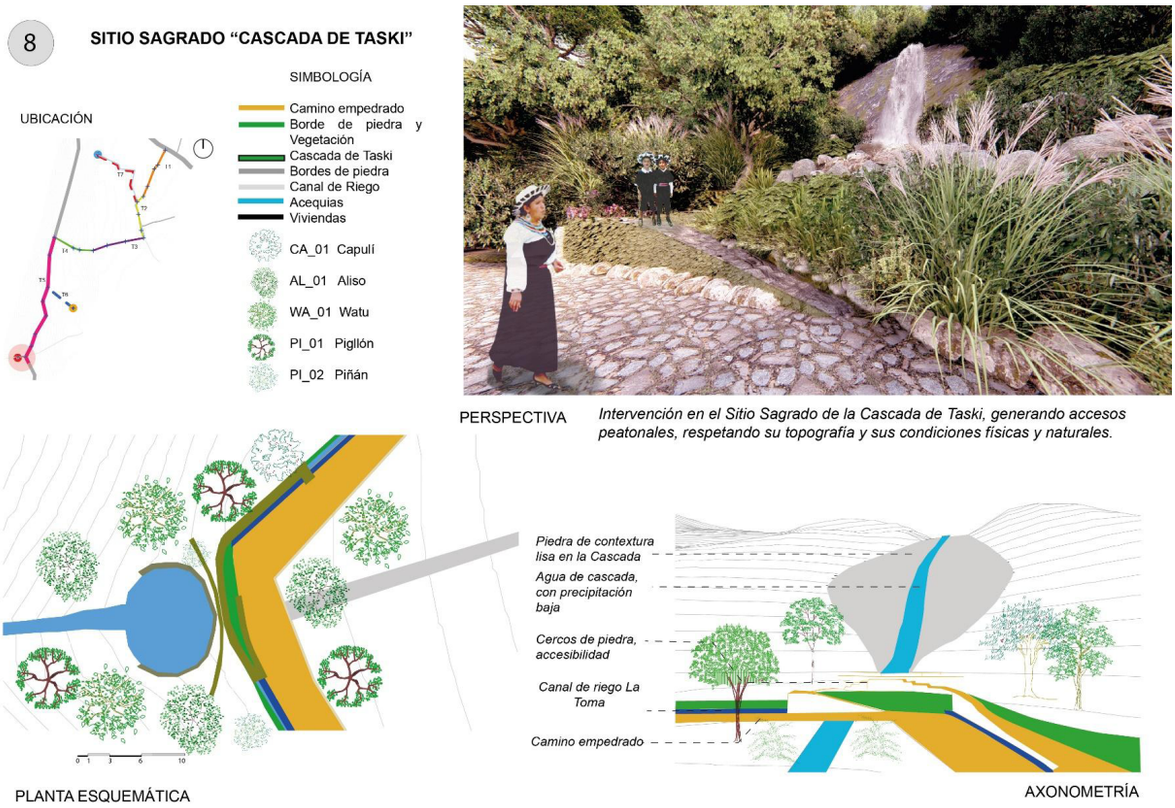


Figura 23. Propuesta de intervención del Tramo 8. Fuente: Elaboración de los autores.

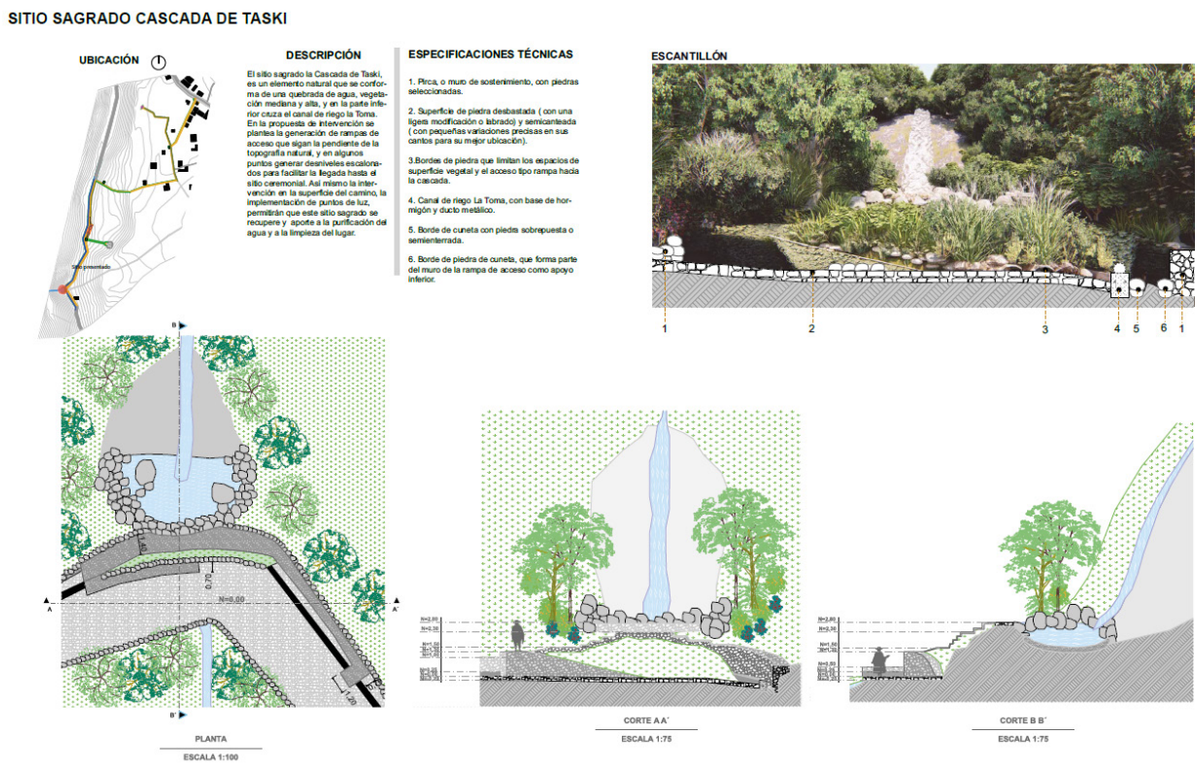
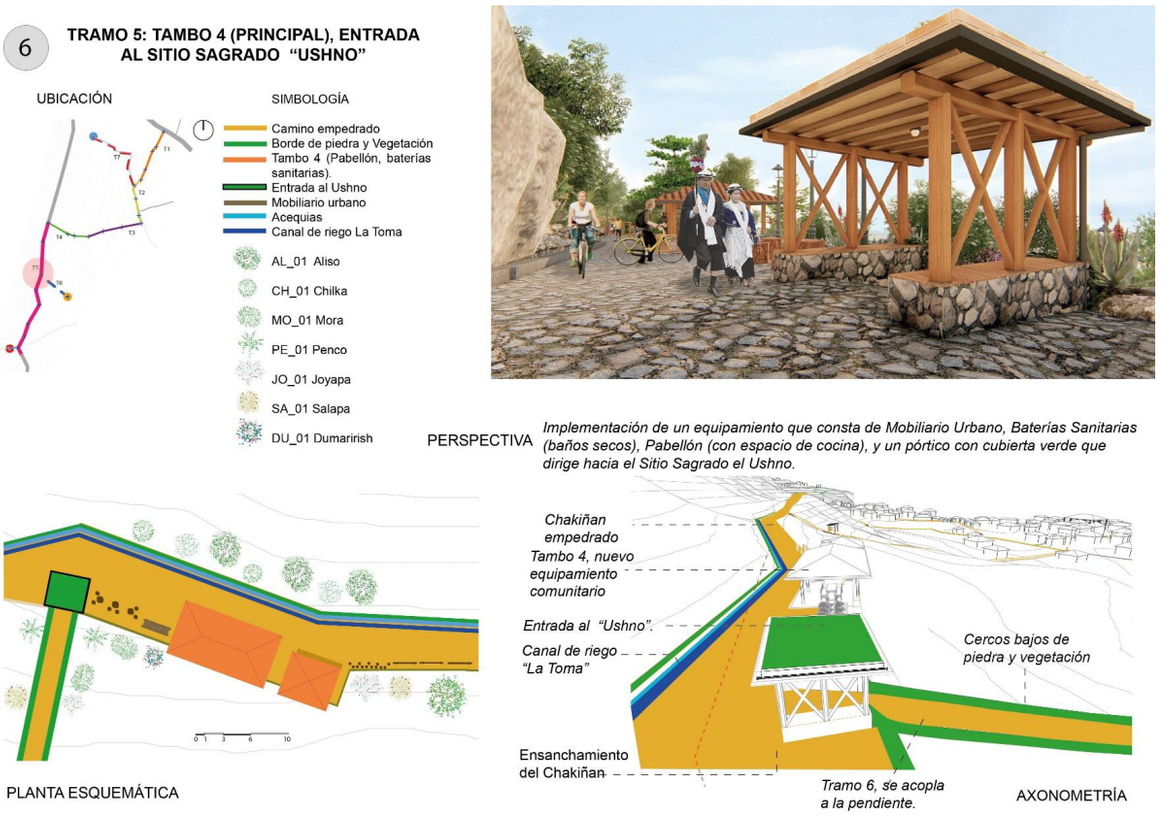


Figura 24. Propuesta de intervención en el sitio sagrado La Cascada de Taski. Fuente: Elaboración de los autores.



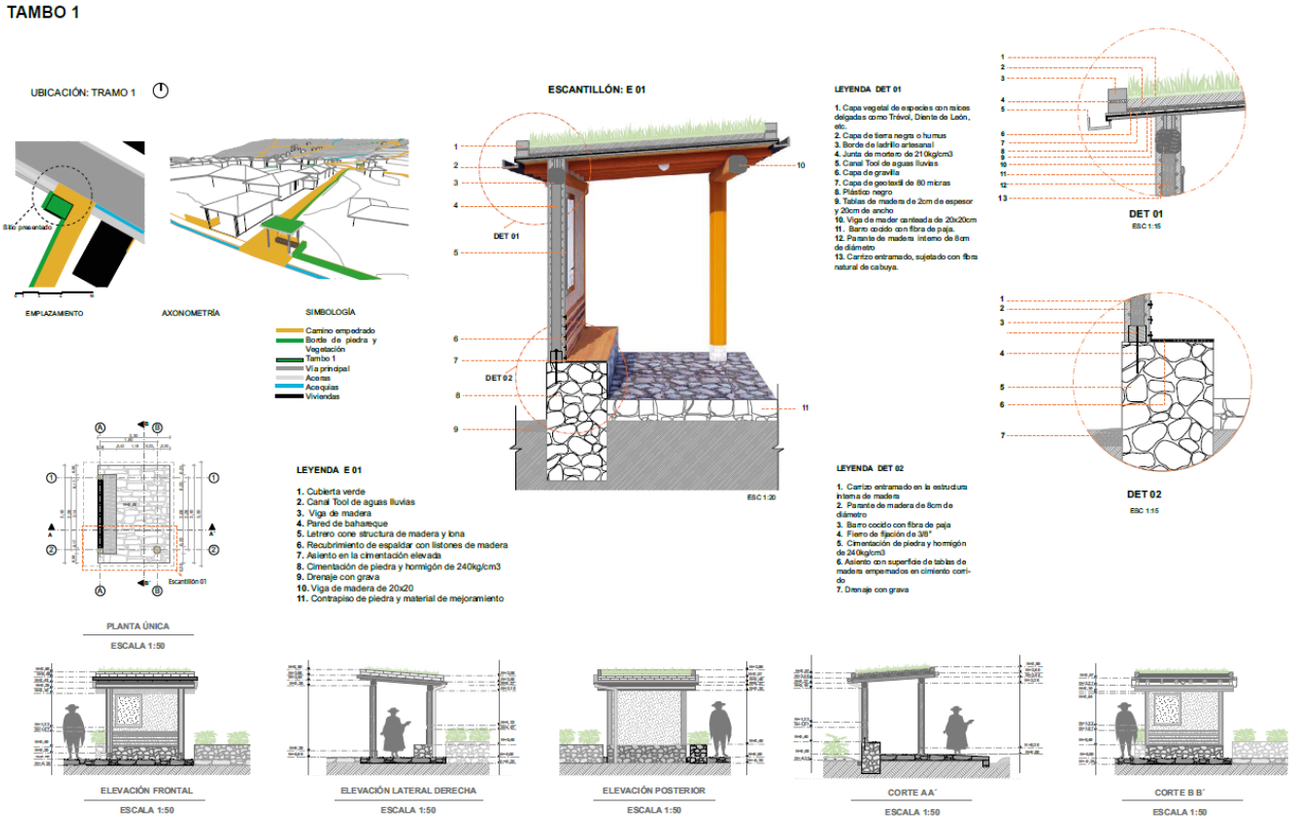


Figura 26. Propuesta del Tambo 1 de bahareque y cubierta verde. Fuente: Elaboración de los autores.

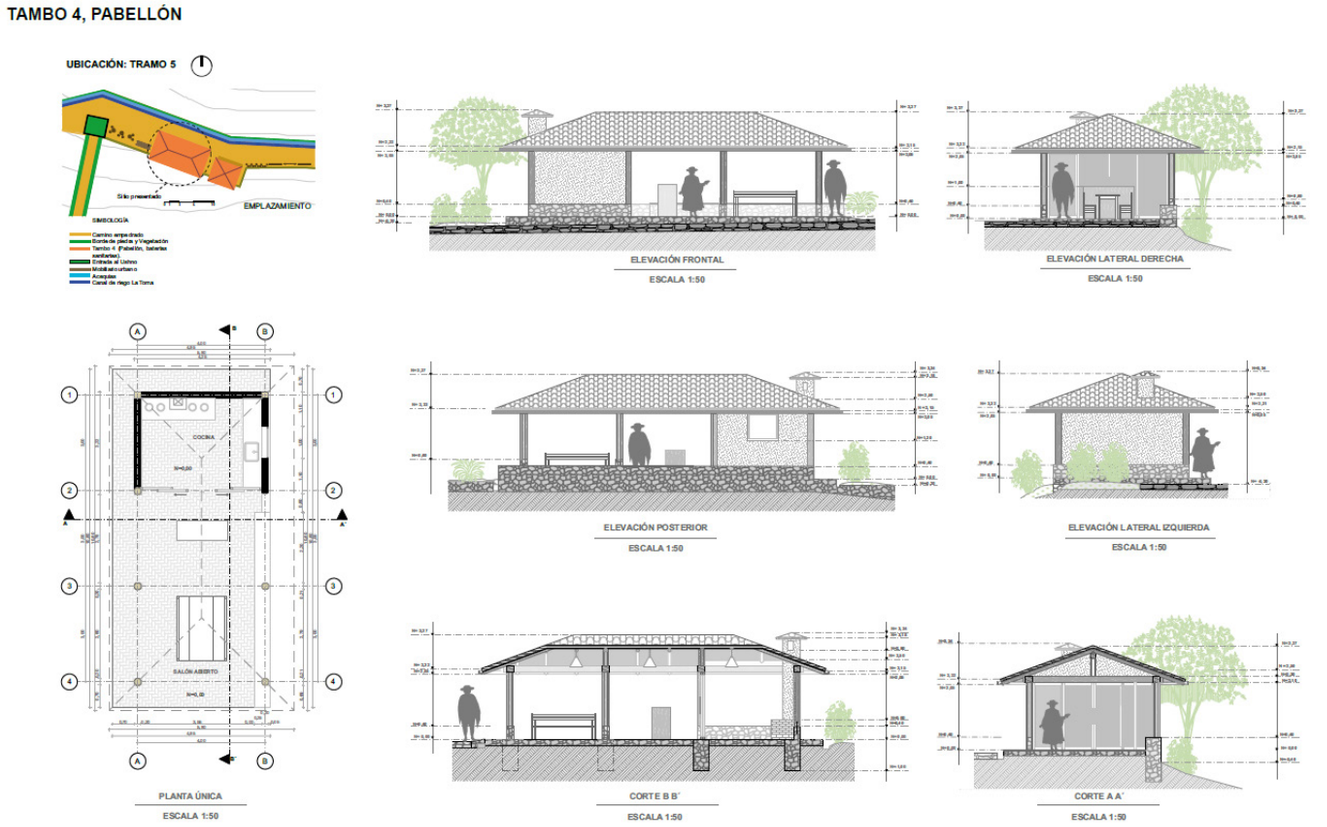


Figura 27. Propuesta del Tambo 4, pabellón principal con el sistema constructivo de bahareque. Fuente: Elaboración de los autores.

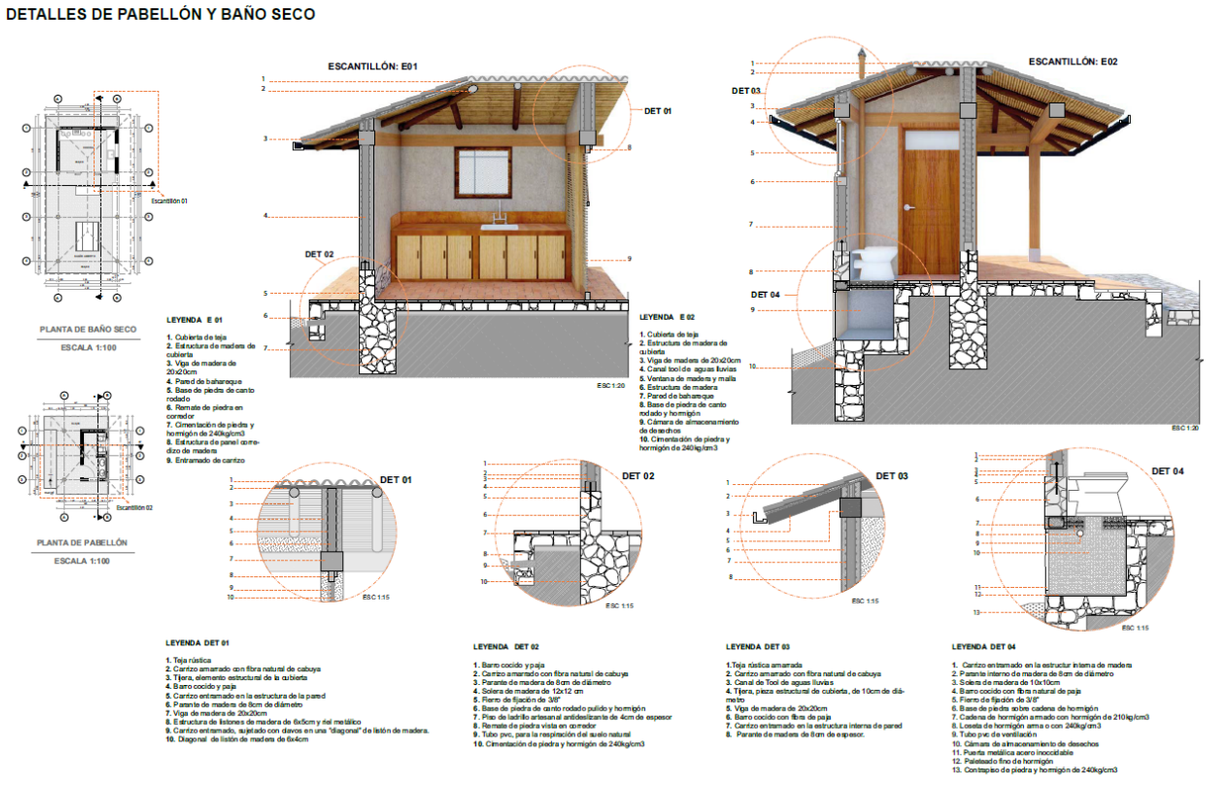


Figura 28. Detalles constructivos del pabellón y baño seco. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 29. Visualizaciones 3d. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 30. Visualizaciones 3d. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 31. Visualizaciones 3d. Fuente: Elaboración de los autores.

como el bahareque— garantizan la coherencia ecológica y la conservación del patrimonio territorial en contextos de montaña (Guerrero Baca, 2017; Cristancho Barrios, 2024; Gonzalo Sánchez, 2012)

La respuesta operativa de la comunidad de Las Lagunas ante la sistematización y catalogación de su red vial corrobora las teorías de planificación participativa orientadas a la sostenibilidad. El desarrollo de reglamentos internos autogestionados demuestra que la infraestructura comunitaria posee mecanismos internos de gobernanza capaces de prescindir de marcos normativos estatales centralizados para su conservación preventiva, siempre que el espacio físico guarde correspondencia con la cartografía social del paisaje. Esta dinámica visibiliza el concepto de patrimonios emergentes propuesto por Alegría & Valencia (2024), entendido como aquellas manifestaciones y memorias subalternas que adquieren validez desde las prácticas cotidianas de las comunidades y que desafían las nociones monumentales e institucionales de la conservación (Figura 29, Figura 30 y Figura 31).

Este fenómeno se constata en la apropiación física inmediata por parte de la población local, reflejada en el inicio de faenas de mantenimiento autónomo y la formulación de normativas colectivas para la protección de sus senderos. Al igual que en las experiencias de gestión comunitaria analizadas por Arango-Marín et al. (2025), estas prácticas asamblearias configuran redes de cuidado territorial que mitigan las deficiencias del urbanismo convencional, que priorizan la reproducción de la vida comunitaria y la preservación autónoma del hábitat sustentable. De este modo, el diseño territorial estructurado desde las dimensiones operativas de la cosmovisión andina funciona como un catalizador de la conciencia patrimonial (Corrales Blanco, Pineda Iriarte & Salazar Rodríguez, 2021). Asimismo, el efecto de irradiación observado hacia las comunidades colindantes sugiere que la recuperación del chakiñán activa la memoria socioespacial del pueblo Saraguro. La viabilidad del modelo propuesto radica en su capacidad para reactivar la minga, consolidándola no solo como un sistema de trabajo colaborativo, sino como una herramienta de resistencia cultural, gestión del territorio vivo y salvaguarda del paisaje sustentable (Pacheco Arévalo, 2007; Quizhpe Guamán, 2013).

CONCLUSIONES

La investigación demuestra que el sistema de chakiñanes constituye un modelo de movilidad activa de baja emisión y alta eficiencia social. Los resultados confirman que la fragmentación territorial derivada de la expansión urbana motorizada puede ser mitigada eficazmente mediante la aplicación de técnicas constructivas ancestrales que integran la gestión de recursos hídricos y el tránsito peatonal. Se valida el trabajo comunitario de la minga como un mecanismo de gobernanza técnica, operativa y sostenible, capaz de asegurar la permanencia del paisaje cultural frente a las presiones del desarrollo convencional.

El análisis cartográfico y estadístico indica que, a pesar de las transformaciones morfológicas iniciadas en la década de 1960 por la apertura de vías vehiculares, el 95.00% de la población de Las Lagunas identifica estos senderos como componentes esenciales de su estructura

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 70 - 95
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.05

identitaria y territorial. Esta persistencia adquiere significado científico al ser evaluada bajo una escala de cuenca. Los trazados geométricos no constituyen líneas aisladas, sino nervaduras ecológicas que articulan la microcuenca, que vincula estratégicamente los puntos de recarga hídrica, los centros ceremoniales y las áreas residenciales. Esta lógica geomorfológica responde al respeto de la topografía y a la comunión con los ciclos del agua como sistema integrador del espacio y de la vida colectiva.

Desde la perspectiva del patrimonio territorial, el chakiñan trasciende su función original de conectividad física para consolidarse como un corredor ecológico y depósito de biodiversidad andina, al albergar especies endémicas (joyapa, penco, aliso) y plantas medicinales, enlazándose hitos de alta significación hídrico-espiritual como El Chorro, El Ushno y la Cascada de Taski. Por consiguiente, la intervención técnica propuesta no se define como una modernización convencional de la infraestructura, sino como una estrategia de reactivación de la memoria social-espacial, que demuestra que la técnica arquitectónica y el diseño del paisaje pueden servir de soporte material para la continuidad de las lógicas comunitarias y simbólicas locales.

Finalmente, este estudio establece un diálogo vinculante entre los saberes vernáculos y la academia, traduciéndose el conocimiento local a un lenguaje técnico universal que fundamenta la vigencia de los sistemas tradicionales en el marco del hábitat sostenible. Para futuros procesos de ordenamiento en territorios de alta pertinencia cultural, se recomiendan tres lineamientos operativos:

Para la investigación territorial: Supeditar los estudios de planificación a los procesos de vida comunitaria y a la praxis local, que evitan la museificación de la identidad y promueven su vigencia como motor de desarrollo sustentable.

Para la formación académica: Reorientar la enseñanza de la arquitectura y el urbanismo hacia intervenciones basadas en la escucha activa y la sensibilidad socio-ecológica, que utiliza la representación gráfica como herramienta de rescate técnico de los sistemas vernáculos.

Para la gestión local: Emplear la catalogación arquitectónica y la cartografía social como instrumentos de mediación interna para la resolución de conflictos de linderos y la consolidación de la seguridad jurídica colectiva, que garantiza la continuidad histórica y espacial del hábitat comunitario.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, Siglas nombres F.M.L.G.; Curación de datos, Siglas F.M.L.G.; Análisis formal, Siglas nombres F.M.L.G; Adquisición de financiación Siglas nombres S.D. ARQUITECTURA; Investigación, Siglas nombres F.M.L.G, A.K.K.L.G.; Metodología, Siglas nombres F.M.L.G; Administración de proyecto, Siglas nombres F.M.L.G.; Recursos, Siglas nombres S.D.ARQUITECTURA; Software. Siglas nombres ARCHICAD, LUMION; Supervisión, Siglas nombres A.K.K.L.G.; Validación, Siglas nombres A.K.K.L.G.; Visualización, Siglas nombres F.M.L.G; Escritura – borrador original, Siglas nombres F.M.L.G.; Escritura – revisión y edición, Siglas nombres. A.K.K.L.G.

AGRADECIMIENTOS

Comunidad Las Lagunas Chukidel Ayllullacta. SD ARQUITECTURA.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alegría, L., & Valencia, M. (Eds.). (2024). *Patrimonios emergentes en Chile contemporáneo*. Colección Cultural y Patrimonio (Vol.7). Servicio Nacional del Patrimonio Cultural – Subdirección de Investigación. https://www.investigacion.patrimoniocultural.gob.cl/sites/www.investigacion.patrimoniocultural.gob.cl/files/2025-07/libro_patrimonios_emergentes_vf_baja.pdf#page=141

Arango-Marín, M., Cardona-González, M., Mejía-Amézquita, V., & Zapata-Arango, L. F. (2025). Voces que resguardan al territorio de Riosucio (Caldas). Prácticas comunitarias como redes de cuidado. *Bitácora Urbano Territorial*, 35(1), 77-88. https://revistas.unal.edu.co/index.php/bitacora/article/view/117304/94953

Borja, J., & Muxi, Z. (2003). *El espacio público, ciudad y ciudadanía*. Editorial Electa.

Calderón, A. (1985). *Saraguro huasi: La casa en la "tierra del maíz"*. Banco Central del Ecuador.

Canziani Amico, J. (2012). *Ciudad y territorio en los Andes: Contribuciones a la historia del urbanismo prehispánico.* Pontificia Universidad Católica del Perú. https://doi.org/10.18800/9786124146022

Cerasi, M., & Quaroni, L. (1990). *El espacio colectivo de la ciudad: construcción y disolución del sistema público en la arquitectura de la ciudad moderna* (1a ed.). Oikos-Tau.

Cevallos Salas, P. (2003). El bahareque en zonas sísmicas. En J. A. Cordero, E. J. Martínez, y C. Martins Neves (Eds.), *Técnicas mixtas de construcción con tierra* (pp. 37-48). Proterra. https://redproterra.org/wp-content/uploads/2020/06/3_PP-T%C3%A9cnicas-Mixtas_2003.pdf

Colosi, F., Bacigalupo, C., De Meo, A., Kobata Alva, S. A., Orazis, R., Rojas Vasquez, G. E., & León Trujillo, F. J. (2025). Chan Chan (Perú), la ciudad de tierra. La amenaza al paisaje cultural de un sitio Patrimonio Mundial. *ACE: Architecture, City and Environment*, 20(58), 12658. https://doi.org/10.5821/ace.20.58.12658

Corrales Blanco, J. C., Pineda Iriarte, A. P., & Salazar Rodríguez, C. C. (2021). Revalorización de la arquitectura vernácula. Módulo de vivienda para una comunidad asháninka de Alto Kamonashiarii.

Limaq, 7(007), 175–200. https://doi.org/10.26439/limaq2021.n007.5185

Cristancho Barrios, K. J. (2024). *Análisis del comportamiento de muros en bahareque de tierra ante cargas horizontales* [Tesis de Magíster, Pontificia Universidad Javeriana]. Centro de recursos para el Aprendizaje y la Investigación. https://doi.org/10.71618/pe8z-e834

Dávila Egüez, R. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de Loja 2015-2025*. Prefectura de Loja. https://prefecturaloja.gob.ec/documentos/lotaip/GPL/2017/Enero/Documentos/PDOT_PROV_LOJA.pdf

Gonzalo Sánchez, V. (2012). *Morteros de barro estabilizados con fibras de paja, esparto y sisal para su uso como revestimientos* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio Institucional Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/14429/

Guerrero Baca, L. F. (2017). *Pasado y porvenir de la construcción con bahareque. Gremium, 4*(8), 69-80. https://doi.org/10.56039/rgn08a07

Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES. http://www.biblioteca.cij.gob.mx/archivos/materiales_de_consulta/drogas_de_abuso/articulos/sampierilasrutas.pdf

INPC - Instituto Nacional de Patrimonio Cultural. (2014). Guía de identificación y registro del Qhapaq Ñan. Perú. https://qhapaqnan.cultura.pe/sites/default/files/mi/archivo/rcq.pdf

Lozano Guamán, A. K. (2014). *Análisis de la arquitectura tradicional en el cantón Saraguro, como base para una propuesta de diseño contemporáneo* [Tesis de Pregrado no publicada]. Universidad Central del Ecuador.

Lozano Guamán, A. K. K. (2021). Los valores formales de la arquitectura tradicional del pueblo Saraguro, pertinentes al movimiento moderno. Estudio tipológico de la arquitectura tradicional en la comunidad Lagunas, parroquia Saraguro [Tesis de Maestría, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional UCUENCA. http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/37454

Lozano Guamán, F. M. (2022). Recuperación de los caminos antiguos "chakiñanes" y sitios sagrados de la comunidad las lagunas del cantón Saraguro, provincia de Loja. [Tesis de Pregrado, Universidad Internacional del Ecuador]. Repositorio Digital UIDE. https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/4964

Lozano Guamán, F. M., Jaramillo-Benavides, A., & Lozano-Guamán, K. K. (2025). Revitalización del Bahareque ancestral del pueblo Kichwa Saraguro, Ecuador: conservación, adaptación y difusión del patrimonio constructivo. *Revista Hábitat Sustentable*, *15*(1), 116-133. https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.01.09

Marca Chérrez, R. V. (2011). El Qhapaq Ñan a su paso por el cerro de Shuñin en el cantón Oña. [Tesis de Pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional UCUENCA. http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/1979

Montaño Huerta, M. D. (2017). Paisajes interculturales. Análisis, diagnóstico y planificación para la Ordenación de un Territorio. El caso de Cotogchoa. [Tesis de Maestría, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional UCUENCA https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/9b36eecc-96db-4ed2-abe3-9c0dc4b2a64d

Novoa Rios, I. N., & Hernández García, J. (2026). Más que agua, análisis multidimensional del paisaje fluvial: hacia una rehabilitación integral en Fusagasugá, Colombia. *Bitácora Urbano Territorial*, *36*(1), 175-190. https://doi.org/10.15446/bitacora.v36n1.120120

Ordóñez Suárez, R. I. (2019). Plan de conservación preventiva para el tramo del Qhapac Ñan - Camino del Inca, comprendido entre Migüir y Paredones de Molleturo [Tesis de Maestría, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional UCUENCA. https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/e4b46612-b2c7-4201-b293-79c1f5c3a1b3

Pacheco Arévalo, A. C. (2007). Etnias aborígenes y globalización, estudio de caso de la comunidad de Saraguro-Loja. [Tesis de Pregrado, Universidad del Azuay]. Repositorio Institucional. http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/962

Pérez Bustamante, L., & Parra Ponce, C. (2004). Paisajes culturales: El parque patrimonial como instrumento de revalorización y revitalización del territorio. *Theoria*, 13(1), 9-24. https://www.ubiobio.cl/theoria/v/v13/1.pdf

Qhapaq Ñan-Ecuador. (2019). *Guía para la capacitación en conservación preventiva de estructuras arqueológicas en piedra y tierra Qhapaq Ñan, sistema vial Andino*. Secretaría Técnica del Qhapaq Ñan - Ecuador / Secretaría Técnica del Qhapaq Ñan - Argentina. https://www.patrimoniocultural.gob.ec/wp-content/uploads/2020/07/Guia_conservacion_estructuras_arqueologicas_qhapaq_nan.pdf

Quizhpe Guamán, L. A. (2013). La organización comunitaria una alternativa para los pueblos andinos: caso la comunidad Lagunas, cantón Saraguro, provincia de Loja [Tesis de Pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional Universidad de Cuenca. https://dspace-test.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/3727

Rodríguez Valbuena, D. (2011). Territorio y territorialidad. Nueva categoría de análisis y desarrollo didáctico de la Geografía. *Revista Uni-Pluriversidad, 10*(3), 90-100. https://revistas.udea.edu.co/index.php/unip/article/view/9582

Van Der Voordt, D. J. M., & De Jong, T. M. (Eds.). (2002). *Ways to study and research: urban, architectural and technical design*. Delft University Press.

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 96 - 107
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.06

EVALUACIÓN SOCIOESPACIAL DE LA POBREZA ENERGÉTICA Y SU DIMENSIÓN DE GÉNERO EN ÁREAS VULNERABLES DE GRANADA, ESPAÑA

Recibido 13/02/2026
Aceptado 27/05/2026

SOCIOSPATIAL ASSESSMENT OF ENERGY POVERTY AND ITS GENDER DIMENSION IN VULNERABLE AREAS OF GRANADA, SPAIN

AVALIAÇÃO SOCIOESPACIAL DA POBREZA ENERGÉTICA E SUA DIMENSÃO DE GÊNERO EM ÁREAS VULNERÁVEIS DE GRANADA, ESPANHA

Susana Clavijo-Núñez (Autor de Correspondencia)
Doctora en Arquitectura Investigadora postdoctoral,
Departamento de Ingeniería Agraria y del Medio Natural
Universidad de La Laguna
San Cristóbal de La Laguna, España
https://orcid.org/0000-0002-8969-754X
sclavijo@ull.edu.es

Antonio Aguilar-Aguilera
Doctor en Ingeniería Civil Investigador postdoctoral,
Departamento Construcciones Arquitectónicas
Universidad de Granada
Granada, España
https://orcid.org/0000-0001-5045-8560
antojes@ugr.es

María De-la-Hoz-Torres
Doctora en Ingeniería Civil
Profesora Permanente Laboral, Departamento de Expresión Gráfica
Arquitectónica y en la Ingeniería
Universidad de Granada, España
https://orcid.org/0000-0003-1657-1572
mlhoz@ugr.es

Antonio Serrano-Jiménez
Doctor en Arquitectura
Profesor Permanente Laboral, Departamento Construcciones Arquitectónicas
Universidad de Granada, España
https://orcid.org/0000-0002-8585-857X
serranojimenez@ugr.es

David Bienvenido-Huertas
Doctor en Arquitectura
Profesor Titular, Departamento Construcciones Arquitectónicas
Universidad de Granada, España
https://orcid.org/0000-0003-0716-8589
dbienvenido@ugr.es

CC BY SA

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 96 - 107
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.06

RESUMEN

A pesar de que la pobreza energética es un problema ampliamente abordado, aún persisten lagunas de conocimiento sobre cómo afecta de manera diferenciada a las mujeres. El estudio analiza la vulnerabilidad energética y la dimensión de género desde una perspectiva socioespacial, tomando como caso de estudio la ciudad de Granada. La metodología emplea datos públicos a escala censal para combinar indicadores energéticos y de género y analizar su prevalencia en áreas categorizadas como vulnerables. Los resultados evidencian una relación entre áreas vulnerables, bajos ingresos y construcciones energéticamente ineficientes. Se identifican como grupos de riesgo las mujeres mayores en hogares unipersonales, los hogares encabezados por mujeres y las mujeres extranjeras, que presentan ingresos significativamente reducidos. Se concluye que es necesario redefinir las áreas vulnerables, promover la rehabilitación energética e integrar el enfoque de género, a fin de diseñar políticas públicas integrales que contribuyan a una transición energética justa.

Palabras clave
energía, mujeres, áreas residenciales

ABSTRACT

Although energy poverty is a widely addressed issue, significant knowledge gaps persist regarding how it disproportionately affects women. This study analyses energy vulnerability and the gender dimension from a socio-spatial perspective, using the city of Granada as a case study. The methodology draws on publicly available census-level data to combine energy and gender indicators and examine their prevalence in areas categorized as vulnerable. The findings reveal a relationship between vulnerable areas, low-income levels, and energy-inefficient buildings. Older women living alone, female-led households, and foreign-born women are identified as at-risk groups, all presenting significantly reduced income levels. The study concludes that there is a need to redefine vulnerable areas, promote energy retrofitting, and incorporate a gender perspective to design comprehensive public policies that contribute to a fair energy transition.

Keywords
energy, women, residential areas

RESUMO

Embora a pobreza energética seja uma questão amplamente abordada, ainda persistem lacunas de conhecimento sobre como ela afeta as mulheres de forma diferenciada. Este estudo analisa a vulnerabilidade energética e a dimensão de gênero sob uma perspectiva socioespacial, tomando como caso de estudo a cidade de Granada. A metodologia utiliza dados públicos em escala censitária para combinar indicadores energéticos e de gênero, com o intuito de analisar sua prevalência em áreas classificadas como vulneráveis. Os resultados evidenciam uma relação entre áreas vulneráveis, baixa renda e edifícios energeticamente ineficientes. São identificados como grupos de risco as mulheres idosas em domicílios unipessoais, os domicílios chefiados por mulheres e as mulheres estrangeiras com rendimentos significativamente reduzidos. Conclui-se que é necessário redefinir as áreas vulneráveis, promover a reabilitação energética e integrar a perspectiva de gênero, com o objetivo de elaborar políticas públicas integrais que contribuam para uma transição energética justa.

Palavras-chave
energia, mulheres, áreas residenciais

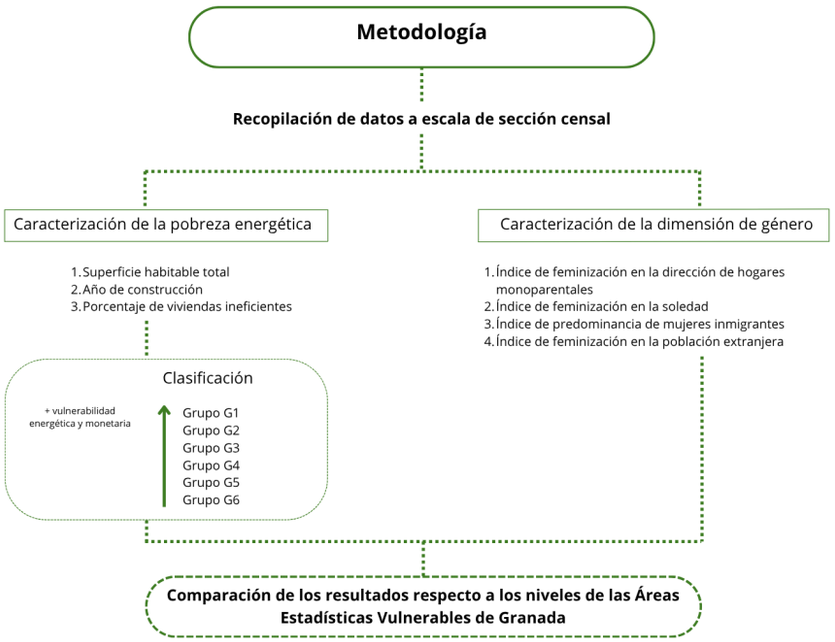


Figura 1. Esquema de la metodología aplicada. Fuente: Elaboración de los Autores.

INTRODUCCIÓN

La pobreza energética (PE), problemática multidimensional que se sitúa en "la intersección entre los ingresos de los hogares, los costes energéticos y la eficiencia energética del parque inmobiliario" (Faiella & Lavecchia, 2021), se vincula con otras dimensiones de la pobreza y la desigualdad, como la brecha de género. La feminización de la pobreza energética, aunque relevante, presenta un desarrollo académico limitado (Longhurst & Hargreaves, 2019). Desde la perspectiva de género, las mujeres continúan asumiendo en mayor proporción las tareas de cuidado y mantenimiento del hogar. Como resultado, han sido las más afectadas históricamente por la falta de acceso seguro a servicios básicos, al mismo tiempo que enfrentan la carga de las responsabilidades domésticas y situaciones como la dificultad para pagar las facturas de energía (McDowell, 1999).

Un problema clave es la falta de datos sobre la dimensión de género en la PE (Clancy, 2016), inicialmente analizada desde aspectos técnicos como consumo o percepción térmica (Cecelski, 2004) y posteriormente en su impacto integral en la PE (Clancy et al., 2017). Actualmente persisten limitaciones por la falta de datos desagregados (Bradshaw, Chant & Linneker, 2017), así como de conceptualizaciones y prejuicios sobre la feminización de la PE (Listo, 2018). Se evidencia además la necesidad de incluir un enfoque interseccional, donde factores como el género, la edad o la clase social se entrelazan, generándose tanto privilegios como desventajas (Viveros Vigoya, 2016).

En Europa y España, más de la mitad de los hogares monoparentales se encuentran en riesgo de pobreza o exclusión social, especialmente los sustentados por mujeres, quienes cobran un 18,6% menos que los hombres y tienen mayor tasa de desempleo (Alguacil Denche, Llano Ortiz & Sanz Angulo, 2024; Secretaría Técnica de European Anti-Poverty Network [EAPN-ES], 2024). Andalucía presenta una de las mayores incidencias de PE de España (Romero Mora, Barrella & Centeno Hernáez, 2024), debido a la combinación de salarios bajos, una mayor severidad climática y un entorno construido deficiente (Castaño-Rosa, Solís-Guzmán& Marrero, 2020). Granada es una de las ciudades más afectadas, con problemas estructurales documentados como los cortes de luz continuos en los barrios del norte (Ramírez, 2023),una fuerte demanda energética debido a condiciones climáticas severas (Bienvenido-Huertas et al., 2020) y un deficiente rendimiento energético en viviendas sociales desde el punto de vista del confort adaptativo (Calama-González et al., 2024). Sin embargo, la literatura carece de estudios que integren la dimensión de género desde un enfoque interseccional en el análisis de la PE en Granada.

Resulta necesario incorporar esta dimensión mediante un enfoque socioespacial, que hace referencia a la susceptibilidad de entornos espaciales (p. ej. barrios) a riesgos derivados por determinadas dinámicas. La utilización de este análisis en problemas sociales permite considerar factores temporales y diferentes variables de entrada (Panda, 2017). En el caso de la PE, este enfoque permite detectar su imprevisibilidad, ya que puede oscilar en función de las características de los hogares y las desigualdades sociales dentro de una misma área (Pérez-Fargallo et al., 2026).

El objetivo general del artículo es determinar la relación entre la pobreza energética y la dimensión de género a escala censal en áreas categorizadas como vulnerables en Granada. Los hallazgos, que incorporan una aproximación de enfoque de género interseccional, permiten analizar la influencia de la feminización de la pobreza energética en Granada, lo que servirá de base para desarrollar políticas públicas que sean eficientes para avanzar en una transición justa.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta combina un análisis cuantitativo de variables energéticas y de género en Granada, tal y como se detalla en las distintas fases de la Figura 1.

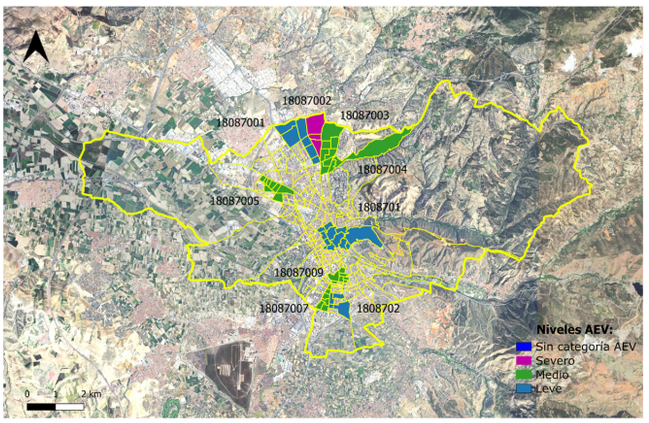
CASO DE ESTUDIO

La ciudad de Granada (España) fue seleccionada como zona de estudio, se incluyeron las áreas estadísticas vulnerables (AEV) del Catálogo de Barrios Vulnerables (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2021). La caracterización de las AEV permite clasificar las secciones censales en cinco niveles (no vulnerable, leve, medio, severo y crítico) a partir de tres indicadores: población en paro, población sin estudios y viviendas en mal estado de conservación.

Granada cuenta con AEV de niveles leve, medio y severo (Figura 2). En el caso del leve, se detectan 3 AEV, en que destaca el barrio del Almanjáyar, una de las zonas con más casos reportados de pobreza energética en la ciudad. El nivel medio concentra la mayoría de AEV de la ciudad (6 en total). Abarcan los barrios de Cartuja, La Chana, Monteverde-Caserío de Montijo, Zaidin chico, y Zaidín-Vergeles. Finalmente, las zonas de La Paz-Rey Badis corresponden con la AEV más severa.

MATERIALES

En primer lugar, se recopilaron datos públicos técnicos y socioeconómicos del parque inmobiliario a partir de fuentes con información desagregada (Tabla 1). En el caso



Código	Nivel de vulnerabilidad	Nº viviendas	Superficie (Ha)	Nº secciones censales
1808701	Leve	10615	135,95	12
1808702	Leve	2810	37,07	5
18087001	Leve	4065	106,69	5
18087003	Medio	-	77,81	5
18087005	Medio	5610	48,49	9
18087004	Medio	2860	121,66	4
18087007	Medio	3775	25,09	6
18087009	Medio	3900	26,75	8
18087002	Severo	1.555	64,20	4

Figura 2. Ubicación de las áreas estadísticas vulnerables de Granada. Fuente: Elaboración de los Autores.

de las bases de datos del Instituto Nacional de Estadística [INE] de los años 2021 y 2023, la resolución desagregada fue en las secciones censales, mientras que para los certificados energéticos se obtuvo a escala de vivienda, las que fueron agrupadas en las correspondientes secciones para unificar la unidad de análisis. Los datos se han recabado para 180 secciones censales de la ciudad de Granada.

La base de certificados energéticos fue sometida a un proceso de depuración que incluyó la eliminación de registros duplicados, la exclusión de certificados con campos vacíos y el descarte de registros con errores en la referencia catastral. Tras este proceso, la base quedó compuesta por 27.484 certificados energéticos residenciales, cuya cobertura por sección censal se calculó como la relación entre certificados disponibles y el total de viviendas (Tabla 2).

Encuesta / base de datos	Año	Escala espacial	Referencia
Atlas de Distribución de Renta de los Hogares	2023	Sección censal	(INE, 2025)
Censo de población y viviendas	2021	Sección censal	(INE, 2023)
Registro de certificados energéticos de Andalucía	2025	Vivienda	(Junta de Andalucía, 2025)

Tabla 1. Bases de datos de carácter socioeconómico y técnico del entorno construido utilizadas en el estudio. Fuente: Elaboración de los Autores.

Media (%)	Mediana (%)	Q1 (%)	Q3 (%)	Min. (%)	Max. (%)
16,3%	13,7%	8.8%	19,3%	2,5%	65,3%

Tabla 2. Cobertura de los certificados de eficiencia energética en Granada. Fuente: Elaboración de los Autores.

CARACTERIZACIÓN DE LA POBREZA ENERGÉTICA

Se realizó un análisis con tres indicadores energéticos sobre las características de la vivienda, seleccionados según la metodología de Aguilar, Guerrero-Rivera y de la Hoz-Torres (2025) y obtenidos, a través de las bases de datos disponibles de los certificados energéticos de edificios. No se incorporaron indicadores adicionales dada la ausencia de fuentes de datos energéticos a nivel censal. Los indicadores utilizados fueron: superficie habitable total; año de construcción; y porcentaje de viviendas ineficientes (Ecuación 1).

$$ID_i = \frac{D_{i,E} + D_{i,F} + D_{i,G}}{D_i} \cdot 100 \quad [\%] \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde ID_i es el porcentaje de viviendas ineficientes; $D_{i,E}$ es el número de viviendas con etiqueta E; $D_{i,F}$ es el número de viviendas con etiqueta F; $D_{i,G}$ las viviendas con etiqueta G; y D_i es el número total de viviendas etiquetadas.

Estos indicadores energéticos se complementaron con el uso del indicador de PE, basado en la adaptación socioespacial del indicador 2M utilizado en una variedad de estudios de la literatura científica (Antepara et al., 2020; Sánchez-Guevara Sánchez et al., 2020a). Como apuntan dichas investigaciones (Ecuación 2), dado que el valor medio del gasto energético en España es de aproximadamente 5%, se considera un umbral de 10%.

$$EPR = \frac{EC}{DI} \cdot 100 \quad [\%] \qquad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde EPR es la tasa de PE; EC es el coste o gasto anual del consumo energético obtenido a través de los certificados energéticos (€); y DI es la renta neta media anual de la vivienda (€).

El cálculo del coste energético se determinó mediante el desglose del coste de los diferentes vectores energéticos que tenía la vivienda: electricidad, gas natural, gases licuados del petróleo (GLP) y biomasa (Ecuación 3); determinados en función de los datos de consumo incluidos en el certificado energético.

$$EC = ECC + NGCC + LPGCC + BCC \quad [€] \qquad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde ECC es el coste anual del consumo eléctrico de la vivienda (€); NGCC es el coste anual del consumo de gas natural (€); LPGCC es el coste anual del consumo de GLP (€); y BCC es el coste anual del consumo de biomasa de la vivienda (€).

El cálculo del coste de consumo eléctrico se determinó en función de una serie de consideraciones de las características propias de España (Ecuación 4). En este sentido, se consideró la aplicación de la tarifa del Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor (PVPC), sin discriminación horaria (Real Decreto 216, 2014).

$$ECC = 1{,}21 \cdot \left(\left((C_e \cdot P_e) + CP\right) \cdot (1 + ElT) + RM\right) \quad [€] \qquad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde C_e es el consumo energético obtenido del certificado energético de la vivienda (kWh); P_e es el precio de la tarifa eléctrica del PVPC (€/kWh); CP es el coste de la potencia contratada (€); ElT es el impuesto de la electricidad; y RM es el alquiler del contador (€). Los valores asociados a las tarifas se obtuvieron con los valores promedios del PVPC en 2025. Con respecto a la potencia, se consideró una contratación de 4,6 kW, representativa con la potencia promedio contratada en el país (Endesa, 2025).

Con respecto al gas natural, se consideró una facturación con la tarifa de último recurso (TUR). La formulación utilizada sería la Ecuación 5:

$$NGCC = 1{,}21 \cdot \left((C_{NG} \cdot P_{NG}) \cdot (1 + T) + FC + RM\right) \quad [€] \qquad \text{(Ecuación 5)}$$

Donde C_{NG} es el consumo de gas natural (kWh); P_{NG} es el precio del término variable del gas natural (€/kWh); T es el impuesto sobre hidrocarburos; FC es el precio del término fijo del gas natural (€); y RM es el alquiler del contador (€).
Finalmente, el coste de GLP y de biomasa se obtuvo mediante la Ecuación 6 y Ecuación 7.

$$LPGCC = C_{LPG} \cdot P_{LPG} \quad [€] \qquad \text{(Ecuación 6)}$$

$$BCC = C_B \cdot P_B \quad [€] \qquad \text{(Ecuación 7)}$$

Donde C_{LPG} es el consumo de GLP (kWh); P_{LPG} es el precio del propano (€/kWh); C_B es el consumo de biomasa (kWh); y P_B es el precio de la biomasa (€/kWh).

CLASIFICACIÓN DE LA POBREZA ENERGÉTICA

Una vez que se dispuso de los resultados de PE, las secciones censales se clasificaron en distintos niveles se siguieron metodologías propuestas en estudios previos de la Comunidad de Madrid (Sanz-Fernández et al., 2016; Sánchez-Guevara Sánchez, Sanz Fernández & Núñez Peiró, 2020b). La metodología consiste en la ubicación bidimensional de los hogares, al comparar las variables de ingreso (DI) y gasto energético (EC). Dicho enfoque

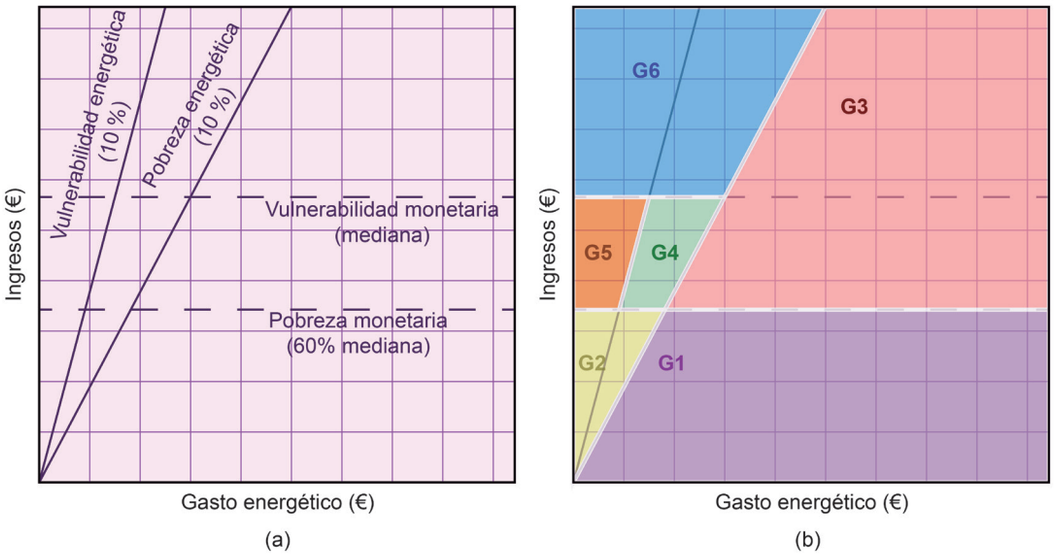


Figura 3. Clasificación de los hogares: (a) umbrales y (b) grupos. Fuente: Elaboración de los Autores a partir de la metodología de Ana Sanz-Fernández (Sanz-Fernández et al., 2016) y Carmen Sánchez-Guevara Sánchez (Sánchez-Guevara Sánchez et al., 2020b).

incluye unas líneas-umbrales, que desembocaron en seis grupos diferentes (Figura 3):

- Grupo G1: secciones censales con hogares que sufren tanto pobreza monetaria (60% de la mediana de los ingresos) como PE (10% del gasto energético con respecto a los ingresos).
- Grupo G2: secciones censales que sufren pobreza monetaria.
- Grupo G3: secciones censales que sufren PE, pero no pobreza monetaria (estarían en vulnerabilidad monetaria, mediana de los ingresos).
- Grupo G4: secciones censales con hogares en categoría de vulnerabilidad energética (5% del gasto energético) y vulnerabilidad monetaria.
- Grupo G5: secciones censales en categoría de vulnerabilidad monetaria.
- Grupo G6: secciones censales sin vulnerabilidad energética ni monetaria.

CARACTERIZACIÓN DE LA FEMINIZACIÓN DE LA POBREZA ENERGÉTICA

Para analizar la feminización de la pobreza energética, se emplearon cuatro indicadores parciales de género basados en datos desagregados del INE y en la limitación de aplicar índices de feminización existentes en la literatura (Capetillo-Ordaz et al., 2024). Los indicadores parciales considerados fueron: índice de feminización en la dirección de hogares monoparentales (FHH_i); índice de feminización en la soledad (FL_i); índice de predominancia de mujeres inmigrantes ($PFoW_i$) e índice de feminización en la población extranjera (FFo_i).

El refleja la predominancia de hogares monomarentales (Ecuación 8). Este indicador es clave, ya que, las mujeres ganan salarios más bajos, reciben pensiones más bajas y experimentan tasas de desempleo más altas, lo que reduce estructuralmente sus ingresos disponibles para las facturas de energía.

$$FHH_i = \frac{H_{i,w<65} + H_{i,w>65}}{H_i} \cdot 100 \quad [\%] \qquad \text{(Ecuación 8)}$$

Donde $H_{i,w<65}$ es el número total de hogares encabezados por mujeres menores de 65 años; $H_{i,w>65}$ es el número total de hogares encabezados por mujeres mayores de 65 años; y H_i es el número total de hogares.

El índice de feminización en la soledad (FL_i) refleja la situación de las mujeres mayores de 65 años que viven solas y con los ingresos dependientes de su pensión. El cálculo de este índice se basó en el comparativo respecto a los hogares constituidos por hombres mayores (Ecuación 9).

$$FL_i = \frac{H_{i,w,l>65}}{H_{i,m,l>65} + 1} \cdot 100 \quad [\%] \qquad \text{(Ecuación 9)}$$

Donde $H_{i,w,l>65}$ es el es el número total de hogares encabezados por mujeres mayores de 65 años que viven solas; y $H_{i,m,l>65}$ es el es el número total de hogares encabezados por hombres mayores de 65 años que viven solos.

El índice de predominancia de mujeres inmigrantes, $PFoW_i$ se incluyó para explorar la relación entre la inmigración y las desigualdades de género en la PE (Ecuación 10); pues a menudo enfrentan desventajas socioeconómicas, como trabajos peor remunerados o tasas de desempleo más altas.

$$PFoW_i = \frac{W_{i,Fo}}{W_{i,Fo} + W_{i,So}} \cdot 100 \quad [\%] \qquad \text{(Ecuación 10)}$$

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 96 - 107
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.06

Donde $W_{i,Fo}$ es el número de mujeres nacidas fuera de España residentes en el área de análisis; y $W_{i,Sp}$ es el número de mujeres nacidas en España en el área de análisis.

Finalmente, el FFo_i refleja la composición de género de las comunidades inmigrantes y puede utilizarse para identificar grupos de mujeres extranjeras que podrían estar desproporcionadamente expuestas a la PE debido a desventajas socioeconómicas (Ecuación 11).

$$FFo_i = \frac{W_{i,Fo}}{M_{i,Fo} + 1} \cdot 100 \quad [\%] \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde $M_{i,Fo}$ es el número de hombres nacidos fuera de España.

En último lugar, se aplica el Índice de Moran a las variables analizadas, con el objetivo de estudiar la autocorrelación espacial de estos indicadores en las secciones. Los valores cercanos a 1 muestran una agrupación espacial positiva fuerte, los valores cercanos a 0 una distribución aleatoria y los valores cercanos a -1 indican una alta dispersión espacial. La significación estadística se evalúa mediante un pseudo p-valor obtenido a través de 999 permutaciones aleatorias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis comenzó con la evaluación de los indicadores energéticos y su relación con las AEV de Granada, y se consideró además las zonas que no estaban clasificadas como AEV. Como se aprecia en la Figura 4, existen claras coincidencias entre AEV en algunos de los indicadores energéticos como año de construcción, superficie habitable y gasto energético anual; con un menor rango intercuartílico en las AEV de mayor riesgo, fruto de su menor extensión espacial. El año de construcción promedio de estas zonas fue 1974. El análisis de viviendas ineficientes refleja una clara relación entre la severidad del AEV y la eficiencia de la vivienda. La AEV de mayor riesgo (11% del territorio vulnerable) muestra un porcentaje cercano al 100% en todas las secciones. En el caso de las otras AEV y zonas sin riesgo, hay una coincidencia en los porcentajes de viviendas ineficientes. Dado que existe una correlación entre eficiencia energética y superficie habitable (viviendas más grandes requieren mayor consumo energético), para la evaluación final del riesgo de PE resulta conveniente el análisis del indicador EPR. Se consideró el umbral del 10% del indicador 2M, el 28% de las secciones sin catalogación de AEV estaban en PE, porcentaje que aumenta progresivamente según el riesgo: 53% en AEV 1, 75% en AEV 2 y 100% en AEV 3.

El análisis continuó con los grupos de riesgo de la metodología de Sánchez-Guevara Sánchez et al. (2020b). Como se representa en la Figura 5, en las AEV de categoría severo el 100% de las unidades censales estaban en G1, casos más extremos de pobreza energética y monetaria. Tanto en las AEV de menor riesgo como para las zonas sin catalogación de AEV, se observaron secciones censales dentro del G1. Si bien esto supone una falta de correlación entre la catalogación de AEV y el riesgo de PE, los valores porcentuales asociados de registros en el G1 fueron dependientes del nivel de AEV: 0,8% en zonas sin AEV, 20% en nivel leve y 25% en nivel medio. Así pues, nuevamente se detectó una cierta relación entre el nivel de AEV y el riesgo de PE. En el resto de los grupos, se observaron ciertas asociaciones entre AEV y grupo predominante. En este sentido, en el nivel leve y nivel medio predominó el grupo G3 (Figura 5). Estos casos se caracterizan por la combinación de ingresos medio-bajos y una falta de eficiencia energética en las viviendas. En las zonas sin catalogación de AEV predominó G6 (nulo riesgo energético y monetario), lo que se debe fundamentalmente a un nivel de ingresos más elevado que en zonas vulnerables. No obstante, incluso en zonas sin catalogación de AEV se registran casos en situación de PE, con valores porcentuales que llegan hasta un 27,6%. La Figura 6 recoge la distribución espacial de las secciones en cada grupo: G2 y G5 son más uniformes, mientras que el resto de categorías agrupa las secciones censales con mayor coherencia respecto a su clasificación como AEV.

La relación entre ineficiencia residencial, bajos ingresos y PE ya había sido documentada tanto en Madrid (Sanz Fernández et al., 2016) como en Barcelona (Delgado, 2018). Los casos de PE en zonas sin catalogación de AEV evidencian la importancia de aplicar una combinación de múltiples indicadores.

Cabe destacar cómo la mayor parte de las viviendas son previas a la norma básica del 79, que estableció la necesidad de poner soluciones aislantes en las envolventes de los edificios. No obstante, esta relación puede variar por posibles rehabilitaciones posteriores. En líneas generales, el porcentaje de viviendas sostenibles y altamente eficientes en Granada es bajo, lo que refleja la necesidad de adoptar estrategias de rehabilitación energética. Respecto a la relación entre eficiencia energética y superficie habitable, evaluar únicamente la variable de consumo podría conducir a conclusiones engañosas, ya que la AEV de mayor severidad obtuvo los menores valores de consumo como consecuencia de la menor superficie de sus viviendas.

Estos casos de PE se vinculan con la ineficiencia energética de las viviendas y los bajos ingresos en estas AEV. A pesar de que los criterios de definición de las AEV no consideraron originalmente criterios de PE, su interrelación con los problemas económicos y de eficiencia genera una mayor predominancia de PE en las zonas más vulnerables, que incluye algunas sin catalogación de AEV, pudiéndose reflejar la necesidad de reclasificar algunas unidades censales.

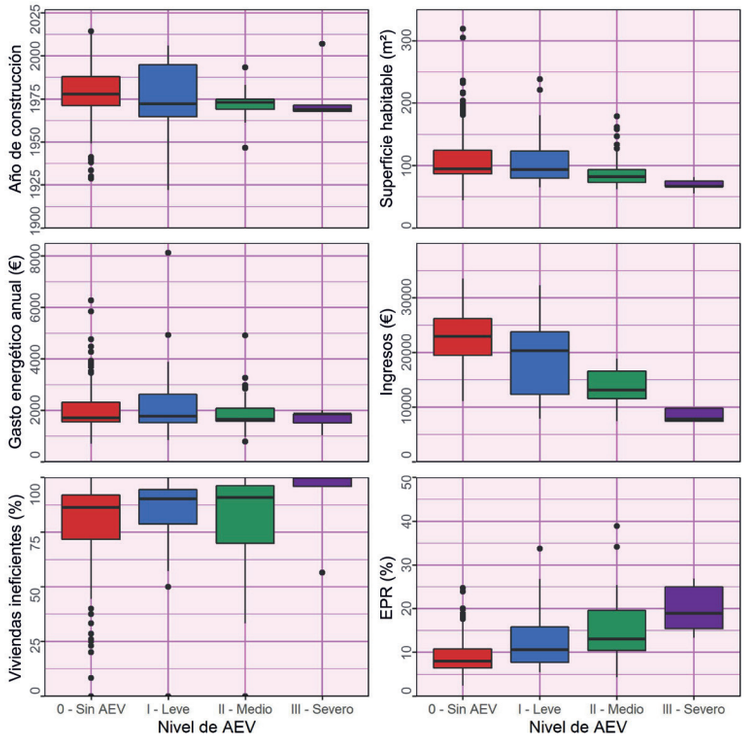


Figura 4. Diagramas de caja de los resultados obtenidos en los indicadores energéticos. Fuente: Elaboración de los Autores.

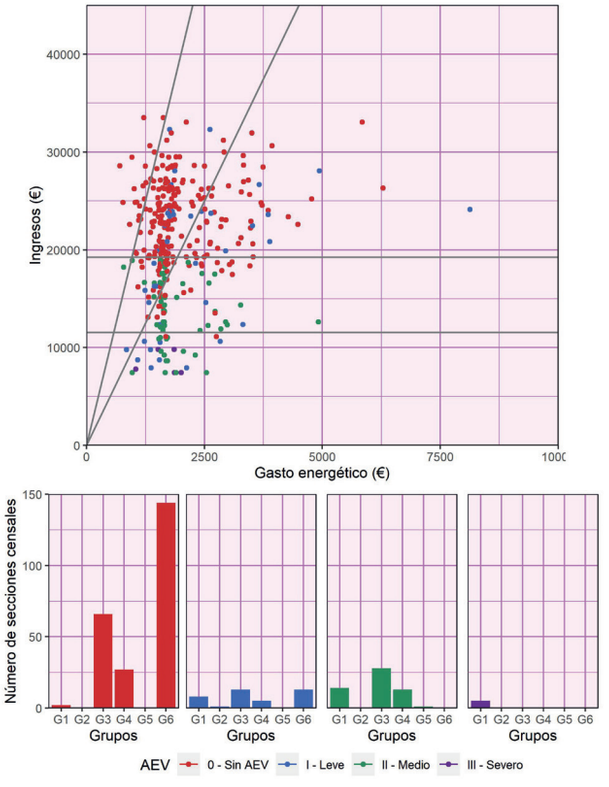


Figura 5. Ubicación de los hogares según el grupo de riesgo de pobreza energética, clasificados según el AEV. Fuente: Elaboración de los Autores.

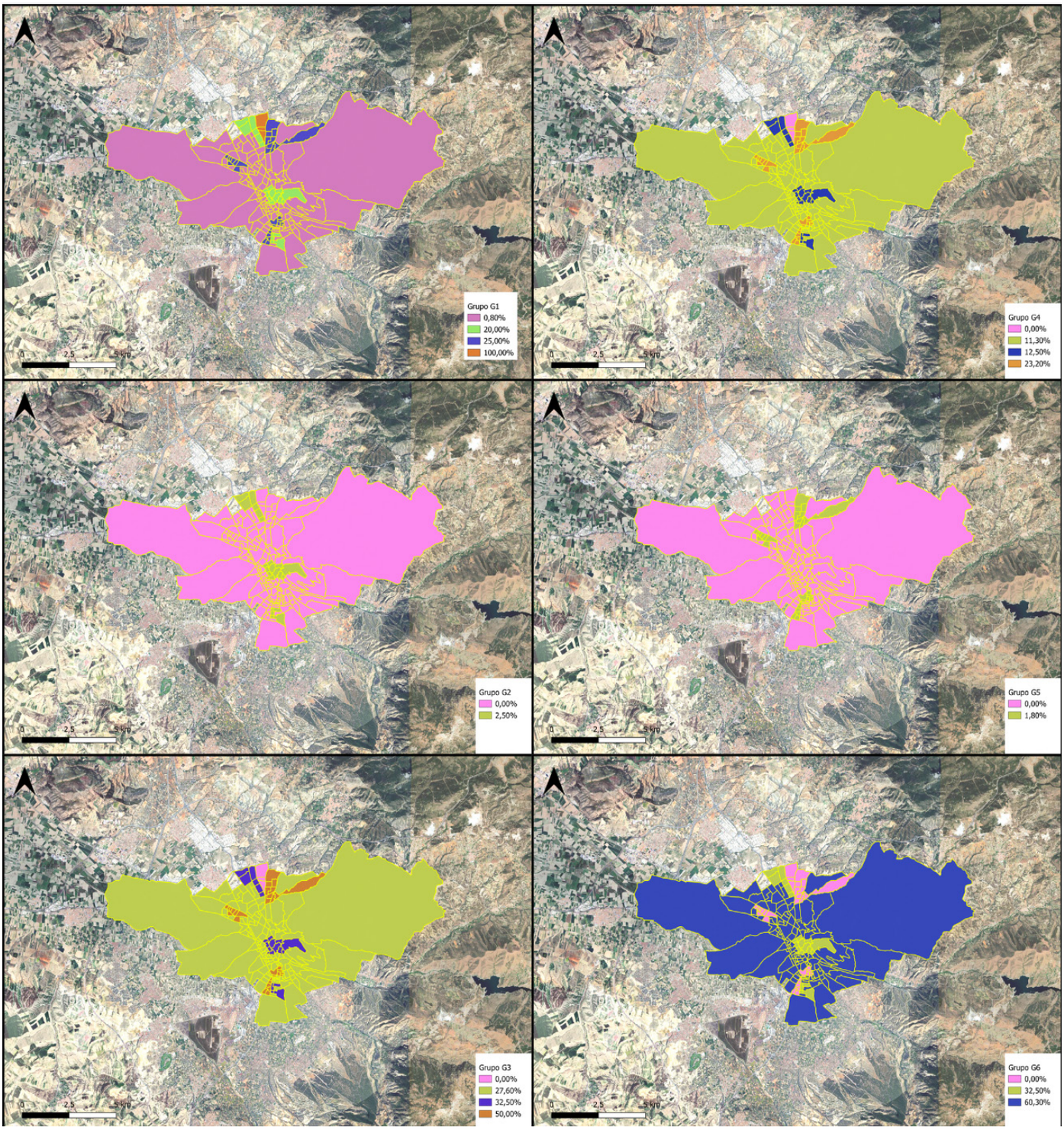


Figura 6. Distribución espacial de los grupos de PE. Fuente: Elaboración de los Autores.

Una vez caracterizada la PE, se evaluó la dimensión de género. A través de la Figura 7 se observa cierta similitud en las distribuciones de todas las zonas, excepto en la categoría severo. Los indicadores de feminización en la dirección de hogares (FHH_i), feminización en la soledad (FL_i) y de población extranjera ($PFoW_i$) y (FFo_i) fueron menores en las secciones censales de La Paz-Rey Badis. El índice de feminización de la soledad muestra porcentajes superiores al 100% sobre los hogares masculinos. El índice de feminización de la población extranjera presenta igualmente valores superiores al 100% en la gran mayoría de casos. Los hogares monomarentales también son predominantes en la región.

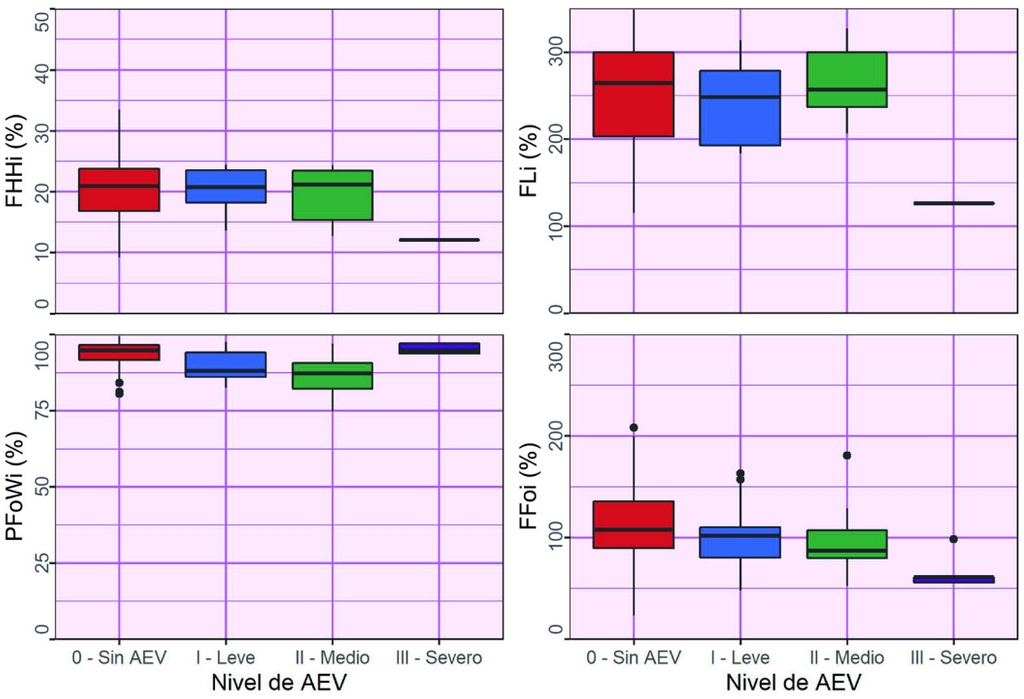


Figura 7. Diagramas de caja de los indicadores de género, clasificados según el AEV. Fuente: Elaboración de los Autores.

La menor concentración de indicadores de género en La Paz-Rey Badis puede estar asociada a la pequeña extensión de la AEV 3 de Granada, que desemboca en una concentración de los resultados. Por otro lado, se obtiene una alta proporción de hogares vulnerables dirigidos por mujeres ancianas solas, que podría explicarse dado que el sustento económico suelen ser pensiones (que serían menor cuantía que en el caso de los hombres). En esta misma línea, los hogares monomarentales pueden desembocar en nuevas situaciones de PE si los ingresos de dichos hogares cumplen con las tendencias habituales del sector empresarial.

Respecto al análisis de autocorrelación espacial, la mayoría de los indicadores muestran una agrupación espacial moderada-alta y, en algunos casos, débil, con una significancia estadística alta en todos los casos. Por ejemplo, el año de construcción presenta un I de Moran de 0,455 (p-value=0,001) y la superficie habitable de 0,468 (p-value=0,001), que reflejan la segregación residencial característica de las ciudades. El índice de feminización de población extranjera presenta una autocorrelación débil positiva (I=0,113; p-value=0,005), consecuencia de una distribución más dispersa en el territorio.

Los resultados evidencian la necesidad de complementar las herramientas oficiales de definición de áreas vulnerables al incorporar criterios energéticos y de género, con el objetivo de representar aquellas zonas urbanas más vulnerables sobre las que es prioritario actuar. Entre las limitaciones del estudio destacan la falta de datos individuales, la ausencia de mediciones reales de consumo y el uso de tarifas promedio estimadas. Futuras investigaciones deberían incorporar más variables de género para profundizar en el análisis de la feminización de la PE.

CONCLUSIONES

A pesar que la ciudad de Granada ha sido identificada con una alta vulnerabilidad energética, no se había analizado hasta el momento las interrelaciones entre los niveles de las áreas estadísticas vulnerables, reconocidas oficialmente en la ciudad de Granada, y su realidad energético-social. Tal y como se ha reflejado en los resultados, existe una relación entre niveles elevados de AEV y la pobreza energética, a través de diferentes dimensiones. La principal causa de esta relación es el bajo nivel de ingresos de las familias (factor socioeconómico), ya que el entorno construido de la ciudad se caracteriza por presentar un comportamiento energético muy deficiente. En este sentido, incluso en zonas que no tienen riesgo de AEV, aparecen porcentajes significativos de casos en pobreza energética. Esto plantea un binomio en el recorrido de las estrategias: por un lado, la necesidad de redefinir la metodología de catalogación de las AEV si se pretende utilizar como un referente en la identificación de las zonas de mayor riesgo de pobreza energética de la ciudad. Por otro lado, la apuesta por la rehabilitación energética, para actuar en una de las vertientes que generan la proliferación de la pobreza energética: la ineficiencia de las viviendas de la ciudad. Esto es especialmente relevante en la ciudad, dado

que, gran parte de las secciones censales de la ciudad no se encuentran en pobreza monetaria (salvo los casos señalados en la sección de resultados).

Asimismo, los resultados han puesto de relieve la posible asociación de la dimensión de género en la pobreza energética de la ciudad. En este sentido, dimensiones como la feminización de la soledad o de la población extranjera, son mayoritarios en la ciudad, y suelen estar asociados con un menor nivel de ingresos para las familias. A raíz de este estudio, se espera que estos resultados supongan un punto de partida para la integración de estudios de género en los casos de pobreza energética, tanto en Granada como en otras ciudades. La ampliación de la escala de análisis y la incorporación de datos desagregados en otros niveles permitirá establecer correlaciones más robustas en las implicaciones de pobreza energética y género.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, D.B.H.; Curación de datos, A.A.A. y M.D.H.T.; Análisis formal, S.C.N. y A.S.J.; Adquisición de financiación D.B.H.; Investigación, D.B.H., S.C.N. y A.S.J.; Metodología, A.A.A. y M.D.H.T.; Administración de proyecto, D.B.H.; Recursos, D.B.H., S.C.N. y A.S.J.; Software, A.A.A. y M.D.H.T.; Supervisión, D.B.H. y S.C.N.; Validación, S.C.N.; Visualización, A.S.J.; Escritura – borrador original, D.B.H. y S.C.N.; Escritura – revisión y edición, A.A.A., M.D.H.T. y A.S.J.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Ministerio de Igualdad y el Instituto de las Mujeres del Gobierno de España en el marco del proyecto 31-01-ID25 titulado "Perspectiva de género en la pobreza energética de España. Análisis holístico desde el entorno urbano de las ciudades españolas". Asimismo, se enmarca dentro del proyecto INV-INC300 2025 "Caracterización de la feminización de la pobreza energética del entorno construido del área metropolitana de Granada" financiado a través de la Universidad de Granada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar, A. J., Guerrero-Rivera, M. F., & de la Hoz-Torres, M. L. (2025). Identifying urban energy-vulnerable areas: a machine learning approach. *Journal of Building Engineering*, *109*, 113047. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113047

Alguacil Denche, A., Llano Ortiz, J. C., & Sanz Angulo, A. (2024a). *14º informe. El Estado de la Pobreza. Seguimiento de los indicadores de la Agenda UE 2030 (2015-2023)*. European Anti-Poverty Network [EAPN]. https://www.eapn.es/publicaciones/566/xiv-informe-sobre-el-estado-de-la-pobreza-seguimiento-de-los-indicadores-de-la-agenda-ue-2030-informe-estatal

Antepara, I., Papada, L., Gouveia, J. P., Katsoulakos, N., & Kaliampakos, D. (2020). Improving energy poverty measurement in southern European regions through equivalization of modeled energy costs. *Sustainability,12*(14), 5721. https://doi.org/10.3390/su12145721

Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., Farinha, F., Oliveira, M. J., & Pérez-Ordóñez, J. L. (2020). Evaluating the potential of adaptive comfort approach using historic data to reduce energy consumption in buildings in southern Spain. *Building and Environment*, *185, 107313*. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107313

Bradshaw, S., Chant, S., & Linneker, B. (2017). Gender and poverty: what we know, don't know, and need to know for Agenda 2030. *Gender, Place & Culture*, *24*(12), 1667–1688. https://doi.org/10.1080/0966369X.2017.1395821

Calama-González, C. M., Escandón, R., Suárez, R., Alonso, A., & León-Rodríguez, Á. L. (2024). Household energy vulnerability evaluation in southern Spain through parametric energy simulation models and socio-economic data. *Sustainable Cities and Society*, *103*, 105276. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105276

Capetillo-Ordaz, N. B., Martín-Consuegra, F., Alonso, C., Terés-Zubiaga, J., & Koutra, S. (2024). Inclusivity in urban energy transitions: A methodological approach for mapping gendered energy vulnerability. *Energy Research and Social Science*, *109*, 103426. https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103426

Castaño-Rosa, R., Solís-Guzmán, J., & Marrero, M. (2020). Energy poverty goes south? Understanding the costs of energy poverty with the index of vulnerable homes in Spain. *Energy Research and Social Science*, *60*, 101325. https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101325

Cecelski, E. (2004). *Re-thinking gender and energy: Old and new directions*. ENERGIA/EASE Discussion Paper. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/57a08ccded915d3cfd001612/R8346-ConceptRev.pdf

Clancy, J. S. (2016). *In the light of what we know: Gender and energy transformations*. University of Twente.

Clancy, J. S., Daskalova, V. I., Feenstra, M. H., Franceschelli, N., & Sanz, M. (2017). *Gender perspective on access to energy in the EU*. Publications Office of the European Union.

Delgado, L. (Coord.). (2018). *Radiografies de la situació del dret a l'habitatge, la pobresa energètica i el seu impacte en la salut a Barcelon*. Dilogic S.L. https://www.aspb.cat/wp-content/uploads/2018/05/Informe1-Radiografies-DretHabitatge-PobresaEnergetica-Salut-Barcelona.pdf

Endesa. (01 de diciembre de 2025). *¿Qué potencia necesitan los electrodomésticos de tu casa? Guía práctica con ejemplo y tabla*. Endesa S.A. https://www.endesa.com/es/blog/blog-de-

endesa/luz/que-potencia-electrica-necesitas

Faiella, I., & Lavecchia, L. (2021). Energy poverty. How can you fight it, if you can't measure it? *Energy and Buildings*, *233*, 110692. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110692

Instituto Nacional de Estadística [INE]. (30 de junio de 2023). *Censo de Población y Viviendas - 2021*. INE base. https://www.ine.es/dyngs/INEbase/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736177108&menu=ultiDatos&idp=1254735572981

Instituto Nacional de Estadística [INE]. (21 de octubre de 2025). *Atlas de Distribución de Renta de los Hogares. Año 2023*. INE base. https://www.ine.es/dyngs/INEbase/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736177088&menu=ultiDatos&idp=1254735976608

Junta de Andalucía. (01 de junio de 2025). *Registro de certificados energéticos de Andalucía*. Datos.gob.es. Gobierno de España - Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública https://datos.gob.es/es/catalogo/a01002820-registro-de-certificados-energeticos-de-andalucia

Listo, R. (2018). Gender myths in energy poverty literature: A Critical Discourse Analysis. *Energy Research and Social Science*, *38*, 9–18. https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.01.010

Longhurst, N., & Hargreaves, T. (2019). Emotions and fuel poverty: The lived experience of social housing tenants in the United Kingdom. *Energy Research and Social Science*, *56*, 101207. https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.05.017

McDowell, L. (1999). *Gender, identity and place: Understanding feminist geographies*. University of Minnesota Press.

Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. (2021). *Catálogo de Barrios Vulnerables de España 2011*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana / Universidad Politécnica de Madrid. https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/vivienda/barrios_vunerables/bbvv_2011_01_andalucia.pdf

Panda, A. (2017). Climate change, drought and vulnerability. In S. Iradaya Rajan & R.B. Bhagat (Eds.), *Climate Change, Vulnerability and Migration*. Routledge India. https://doi.org/10.4324/9781315147741-10

Pérez-Fargallo, A., Clavijo-Núñez, S., Rubio-Bellido, C., Bienvenido-Huertas, D., & Serrano-Jiménez, A. (2026). Defining socio-climate-energy zones based on photovoltaic potential to support new standards for eliminating energy poverty in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 554, 148127. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.148127

Ramírez, M. J. (14 de enero de 2023). *Granada, tercera capital andaluza que más padece la pobreza energética*. GranadaDigital. https://www.granadadigital.es/granada-pobreza-energetica-tercera-capital-andaluza/

Real Decreto 216 de 2014 [Ministerio de Industria Energía y Turismo]. Por el que se establece la metodología de cálculo de los precios voluntarios para el pequeño consumidor de energía eléctrica y su régimen jurídico de contratación. 28 de marzo de 2014. BOE, (77). https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2014-3376

Romero Mora, J. C., Barrella, R., & Centeno Hernáez, E. (2024). *Informe de Indicadores de Pobreza Energética en España 2023*. Cátedra de Energía y Pobreza. Escuela Técnica Superior de Ingeniería [ICAI] – Universidad Pontificia Comillas. https://www.iit.comillas.edu/documentacion/informetecnico/IIT-24-303I/Informe_de_Indicadores_de_pobreza_energ%C3%A9tica_en_Espa%C3%B1a_2023.pdf

Sánchez-Guevara Sánchez, C., Sanz Fernández, A., Núñez Peiró, M., & Gómez Muñoz, G. (2020a). Energy poverty in Madrid: Data exploitation at the city and district level. *Energy Policy*, *144*, 111653. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111653

Sánchez-Guevara Sánchez, C., Sanz Fernández, A., & Núñez Peiró, M. (2020b). Feminisation of energy poverty in the city of Madrid. *Energy and Buildings*, *223*, 110157. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110157

Sanz Fernández, A., Gómez Muñoz, G., Sánchez-Guevara Sánchez, C., & Núñez Peiró, M. (2016). *Estudio técnico sobre pobreza energética en la ciudad de Madrid*. Ayuntamiento de Madrid. https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Consumo/NuevaWeb/pobreza%20energ%C3%A9tica/Copy%20of%20Estudio%20Pobreza%20energ%C3%A9tica%204%20febrero%202017.pdf

Secretaría Técnica de European Anti-Poverty Network [EAPN-ES]. (Coodr.). (2024). *Informe Poverty Watch 2024*. European Anti-Poverty Network - España [EAPN-ES]. https://www.eapn.es/ARCHIVO/documentos/documentos/1734609856_informe_poverty_watch_eapn2024.pdf

Viveros Vigoya, M. (2016). Interseccionalidad: Una Aproximación Situada a La Dominación. *Debate Feminista*, *52*, 1–17. https://doi.org/10.1016/j.df.2016.09.005

Field-validated parametric analysis of outdoor thermal comfort in parking environments in Tiruchirappalli, India
Amalan-Sigmund Kaushik-S, Gopalakrishnan Padmanaban, Subbaiyan Gnanasambandam
Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 108 - 125
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.07

FIELD-VALIDATED PARAMETRIC ANALYSIS OF OUTDOOR THERMAL COMFORT IN PARKING ENVIRONMENTS IN TIRUCHIRAPPALLI, INDIA

Recibido 13/02/2026
Aceptado 27/05/2026

ANÁLISIS PARAMÉTRICO VALIDADO MEDIANTE MEDICIONES EN TERRENO DEL CONFORT TÉRMICO EXTERIOR EN ESTACIONAMIENTOS EN TIRUCHIRAPPALLI, INDIA

ANÁLISE PARAMÉTRICA VALIDADA EM CAMPO DO CONFORTO TÉRMICO EXTERNO EM AMBIENTES DE ESTACIONAMENTO EM TIRUCHIRAPPALLI, ÍNDIA

Amalan-Sigmund Kaushik-S (Autor de Correspondencia)
Master's in Architecture
Assistant Professor, Department of Architecture
National Institute of Technology Tiruchirappalli
Tiruchirappalli, India
https://orcid.org/0000-0003-3260-4485
kaushik@nitt.edu

Gopalakrishnan Padmanaban
Ph.D. in Architecture
Assistant Professor, Department of Architecture
National Institute of Technology Tiruchirappalli
Tiruchirappalli, India
https://orcid.org/0000-0002-4762-4430
gopal@nitt.edu

Subbaiyan Gnanasambandam
Ph.D. in Architecture
Professor, Department of Architecture
National Institute of Technology Tiruchirappalli
Tiruchirappalli, India
https://orcid.org/0000-0003-4406-034X
subbaiah@nitt.edu

CC BY SA

ABSTRACT

Rapid urbanization in warm–humid cities has intensified thermal stress in impervious parking environments. This study evaluates the combined influence of surface albedo, roof Solar Reflectance Index (SRI), vegetation cover, and orientation on outdoor thermal comfort in Tiruchirappalli, India, using field measurements and microclimate simulations. Field measurements from three parking typologies were used to validate ENVI-met simulations (R^2 = 0.931 for MRT). A parametric matrix generated thirty-two design iterations across four orientations. Results indicate that mean radiant temperature is the dominant driver of thermal discomfort. Increasing surface albedo and roof SRI alone did not consistently reduce UTCI due to reflected radiation effects. In contrast, 60% vegetation cover significantly reduced peak thermal stress across all orientations. East–West alignment intensified afternoon heat accumulation, whereas Northwest–Southeast orientation moderated peak stress. The optimal configuration of albedo 0.2, SRI 30, and 60% vegetation under NW–SE orientation produced the lowest mean UTCI (32.49 °C).

Keywords
outdoor thermal comfort, universal thermal climate index (UTCI), surface albedo

RESUMEN

La rápida urbanización en ciudades de clima cálido-húmedo ha intensificado el estrés térmico en los estacionamientos con superficies impermeables. Este estudio evalúa la influencia combinada del albedo superficial, del Índice de Reflectancia Solar (SRI, por su sigla en inglés) de la cubierta, de la cobertura vegetal y de la orientación sobre el confort térmico exterior en Tiruchirappalli, India, mediante mediciones en terreno y simulaciones microclimáticas. Este tipo de mediciones, realizadas en tres tipologías de estacionamiento, se utilizaron para validar simulaciones con ENVI-met (R^2 = 0.931 para MRT). Una matriz paramétrica generó treinta y dos iteraciones de diseño en cuatro orientaciones. Los resultados indican que la temperatura radiante media es el principal factor del disconfort térmico. El aumento del albedo superficial y del SRI de la cubierta no redujo de forma consistente el UTCI debido a los efectos de la radiación reflejada. En contraste, una cobertura vegetal del 60 % redujo significativamente el estrés térmico máximo en todas las orientaciones. La orientación este–oeste intensificó la acumulación de calor por la tarde, mientras que la orientación noroeste–sudeste moderó el estrés térmico máximo. La configuración óptima del albedo de 0,2, SRI de 30 y vegetación al 60% en la orientación noroeste-sureste produjo el UTCI medio más bajo (32,49 °C).

Palabras clave
confort térmico exterior, índice universal de clima térmico (UTCI), albedo superficial

RESUMO

A rápida urbanização em cidades de clima quente e úmido tem intensificado o estresse térmico em ambientes de estacionamento impermeáveis. Este estudo avalia a influência combinada do albedo de superfície, do Índice de Refletância Solar (SRI, do inglês Solar Reflectance Index) da cobertura, da cobertura vegetal e da orientação sobre o conforto térmico externo em Tiruchirappalli, Índia, por meio de medições em campo e simulações microclimáticas. Medições de campo em três tipologias de estacionamento foram utilizadas para validar as simulações no ENVI-met (R^2 = 0,931 para a TRM). Uma matriz paramétrica gerou trinta e duas iterações de projeto distribuídas em quatro orientações. Os resultados indicam que a temperatura radiante média é o principal fator determinante do desconforto térmico. O aumento isolado do albedo de superfície e do SRI da cobertura não reduziu de forma consistente o UTCI, devido aos efeitos da radiação refletida. Em contrapartida, uma cobertura vegetal de 60% reduziu significativamente o pico de estresse térmico em todas as orientações. O alinhamento leste–oeste intensificou o acúmulo de calor no período da tarde, ao passo que a orientação noroeste–sudeste atenuou o pico de estresse. A configuração ideal de albedo de 0,2, SRI de 30 e 60% de cobertura vegetal, com orientação noroeste-sudeste, resultou no menor UTCI médio (32,49 °C).

Palavras-chave
conforto térmico externo, índice climático térmico universal (UTCI), albedo de superfície

INTRODUCTION

Rapid urbanization has intensified the Urban Heat Island (UHI) effect by replacing vegetated land with impervious materials, elevating land surface temperatures (LST) in rapidly growing cities such as Tiruchirappalli (Calhoun et al., 2024; Deepthi et al., 2024). The magnitude of UHI is strongly shaped by urban morphology and surface characteristics, including reflectivity, density, and vegetation distribution (Huang et al., 2025). Among horizontal impervious typologies, parking lots represent a thermally critical yet under-examined infrastructure (Sen, Fernandéz & Roesler, 2020). The expansion of private vehicle ownership in residential and institutional contexts has substantially increased the extent of paved parking areas, exacerbating localized heat accumulation and outdoor discomfort (Lin, Song & Qin, 2021; Patel & Kaushik, 2023).

Warm–humid climates pose distinct thermal challenges. Elevated humidity constrains evaporative cooling, amplifying physiological stress even under moderate variation in air temperature (Ta). In such environments, mean radiant temperature (MRT) frequently dominates outdoor thermal perception. Open asphalt, concrete, and paver surfaces absorb and store solar radiation, increasing surface temperature and longwave re-radiation (Sen et al., 2020). Low-albedo materials intensify this heat buildup (Ghenai et al., 2023), while limited shading exposes pedestrians to sustained direct solar radiation. Consequently, parking areas often exceed thermal comfort thresholds during peak summer hours.

Material-based mitigation strategies, particularly surface albedo enhancement and reflective roofing, have been widely investigated. Increasing pavement albedo reduces solar absorption (Ghenai et al., 2023), and reflective parking lots have been proposed as microscale UHI mitigation strategies (Sen et al., 2020). However, higher albedo may increase reflected shortwave radiation at the pedestrian level, elevating MRT and offsetting potential comfort gains (Taleghani, 2018; Ghoniem, Fahmy & Kamel, 2025). Similarly, roofing systems with high Solar Reflectance Index (SRI) values reduce surface heating and contribute to broader UHI mitigation (Nutakki et al., 2023; Jandaghian, Lacasse & Guar, 2025). However, in semi-covered parking typologies, reflected radiation may redistribute thermal load rather than eliminate it, particularly in spaces lacking vegetation and effective airflow.

Vegetation consistently demonstrates stronger cooling potential than reflective materials. Converting paved parking areas into tree-covered spaces significantly reduces thermal stress (Parison et al., 2023). Trees lower MRT through shading and evapotranspiration while moderating Ta (Rodriguez et al., 2025; Wei, Cheng & Lin, 2025). Broader urban greening strategies have demonstrated evening cooling and improved thermal stability (Calhoun et al., 2024), and green infrastructure enhances thermal comfort across climatic contexts (Gidey & Mhangara, 2025; Silva Nascimento et al., 2025). Vegetation structure, including canopy density and configuration, further influences pedestrian comfort outcomes (He & Reith, 2023; Pattnaik, Rahman & Pauleit, 2025). In fact, comparative analyses indicate that tree planting may outperform low-albedo pavements in optimizing summer comfort (Zhang et al., 2025).

Spatial orientation introduces an additional, albeit less integrated, parameter. Urban alignment influences solar interception, shadow dynamics, and airflow distribution (Abdelwahab, Fekry & Hamed, 2025; Huang et al., 2025). Certain orientations prolong afternoon exposure and intensify radiant accumulation, whereas oblique configurations can moderate peak stress (Rachidi et al., 2026). Studies in Indian contexts confirm that orientation significantly affects solar heat gain and microclimatic performance (Kaushik S. & Amraotkar, 2026; Peter & Kaushik, 2024; Pachauri & Kaushik S., 2025). However, the combined effects of orientation, surface reflectivity, and vegetation density across parking typologies remain insufficiently quantified.

Outdoor thermal comfort assessment relies on indices integrating meteorological and radiative parameters. The Universal Thermal Climate Index (UTCI), Physiological Equivalent Temperature (PET), and Heat Index (HI) are widely applied to evaluate pedestrian heat stress (Silva Nascimento et al., 2025; Peter & Kaushik, 2024). Outdoor thermal comfort indices such as UTCI and PET both incorporate MRT and are therefore particularly suitable for evaluating pedestrian thermal conditions in highly radiative outdoor environments. In contrast, HI primarily considers air temperature and relative humidity and does not explicitly account for radiative exchange or wind effects. UTCI was selected in this study due to its extensive application in outdoor urban climate research and its suitability for evaluating dynamic outdoor thermal conditions in warm–humid environments (Wang et al., 2020; Kafy, Alsulamy & Alsaleh, 2026). Since the study was conducted in a tropical warm–humid climate, UTCI values were interpreted using the calibrated hot–humid climate scale proposed in recent literature, where 21.8–30.9 °C corresponds to no thermal stress and 30.9–39.0 °C corresponds to moderate heat stress (Chen, Fang & Hwang, 2025). Recent studies in tropical climates have also combined ENVI-met validation with field measurements and assessments of pedestrian thermal comfort to evaluate the effectiveness of integrated bioclimatic mitigation strategies in outdoor environments (Austin, Solano & Chen Austin, 2025).

Despite extensive research on albedo, cool roofs, vegetation, and orientation independently, integrated, field-validated analyses that combine these parameters in warm–humid parking environments remain limited. Most studies focus on isolated interventions or on hot–

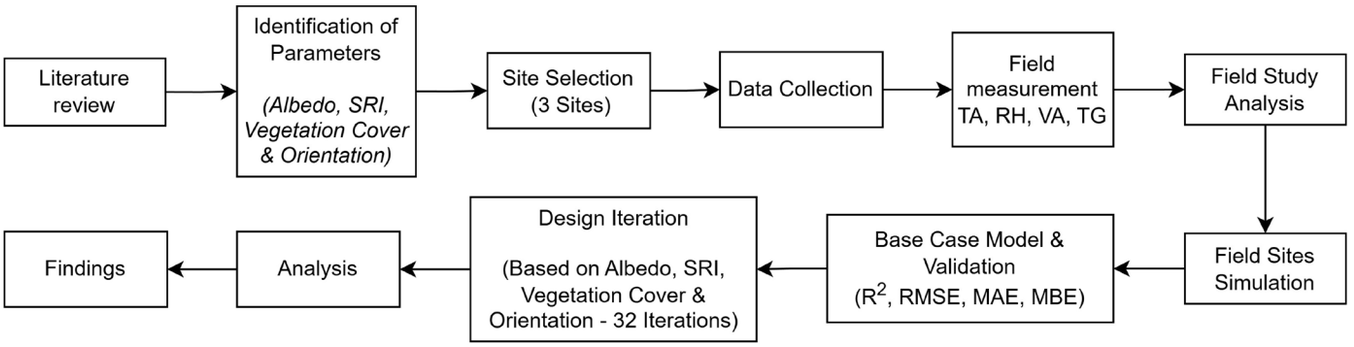


Figure 1. Methodology. Source: Prepared by the authors.

arid and temperate climates, where evaporative and radiative balances differ substantially. This gap restricts the development of climate-responsive design guidelines and may lead to oversimplified reflectivity-based solutions that inadvertently increase pedestrian radiant exposure.

This study addresses this deficiency through a combined field measurement and simulation-based investigation in Tiruchirappalli, India. Three representative parking typologies were instrumented during peak summer conditions, and the data were used to validate ENVI-met simulations (R^2 up to 0.931 for MRT). A structured parametric matrix subsequently evaluated thirty-two design iterations across four orientations, systematically varying surface albedo, roof SRI, and vegetation cover. By integrating radiative management, canopy density, and solar alignment within a validated warm–humid framework, this research advances understanding of pedestrian-level thermal dynamics in parking environments and proposes an orientation-sensitive optimization strategy for climate-responsive tropical design.

Although prior studies have examined vegetation, reflective pavements, cool roofs, and orientation independently, few investigations have quantified their combined interaction within parking environments under warm–humid climatic conditions using field-validated simulations. Existing literature generally evaluates these mitigation measures in isolation, which limits the development of practical design guidance for real urban settings where vegetation may be constrained by space, maintenance, or water availability. This study addresses this gap by identifying how orientation modifies the thermal performance of surface reflectivity and canopy cover, and by establishing a hierarchy of mitigation strategies for parking microclimates.

Accordingly, this study aims not only to quantify the individual and combined influence of surface albedo, roof SRI, vegetation cover, and spatial orientation on pedestrian-level outdoor thermal comfort in parking environments, but also to identify the relative effectiveness and interaction hierarchy of these design variables under warm–humid climatic conditions. A further aim is to translate the simulation outcomes into a practical decision-support framework for contexts where vegetation is limited or infeasible.

Based on previous urban thermal comfort studies, the research hypothesizes that: (1) vegetation cover exerts a stronger influence on pedestrian thermal comfort than reflective material properties; (2) increasing surface albedo and roof SRI may not proportionally improve UTCI due to enhanced reflected shortwave radiation and elevated MRT; (3) diagonal orientations such as Northwest–Southeast reduce peak thermal stress more effectively than East–West alignment under tropical solar conditions and (4) the thermal effectiveness of reflective mitigation strategies is dependent on orientation and vegetation context, indicating that albedo and roof SRI cannot be evaluated independently of solar geometry and canopy conditions.

METHODOLOGY

This study adopted an integrated empirical computational framework to evaluate outdoor thermal comfort in urban parking environments under warm–humid climatic conditions. The methodological approach combined field-based microclimatic measurements, three-dimensional numerical simulations using ENVI-met v5.7.2, statistical validation of simulated outputs, and systematic parametric evaluation of design variables. The sequential workflow from site characterization to optimization analysis is illustrated in Figure 1.

The study was conducted in Tiruchirappalli (10.79°N), Tamil Nadu, India, a rapidly urbanizing Tier-2 city characterized by high solar radiation intensity, elevated humidity, and persistent summer heat stress (Kaushik S. & Amraotkar, 2026; Pachauri & Kaushik S., 2025). Three representative parking typologies were selected to capture variation in surface materials, roofing conditions, vegetation presence, and spatial orientation. Site 01 (S01) comprises

Site	Orientation	Ground Surface (Albedo)	Roof Condition (SRI)	Vegetation – On Site	Vegetation – Context (N / S / E / W)
S01	330°–150° (N–S)	Driveway: Paver (0.25) Parking: Paver (0.25)	Driveway: Uncovered. Parking: Blue GI sheet (SRI 24)	3 trees; trunk height 4–5 m; sparse canopy	N: 4–5 Neem (Dia 1.5–2.5 m) S: 3 Neem (Dia 2–3 m) + shrubs + grass E: 1 large thick trunk (Dia 2 m) + 1 short dense tree (Dia 4–5 m) W: 2 medium trunk trees (Dia 3–4 m; medium dense)
S02	0°–180° (N–S)	Driveway: Paver (0.25) Parking: PCC (0.30)	Driveway: Uncovered Parking: Green-coated metal sheet (SRI 31)	Nil	N: 1 medium dense (Dia 4–5 m) + 4 small low dense (Dia ~1 m) S: No vegetation E: No vegetation W: 3 medium trunk trees (Dia 2–3 m; medium dense)
S03	0°–180° (N–S)	Driveway: Paver (0.25) Parking: Paver (0.25)	Driveway: Partially tree-shaded Parking: Fully under tree shade	7 Neem trees; low–medium density; long trunk; no shrubs; LAD: 3.5; LAI: 0.4 m²/m³	N: 2 Neem (Dia 4–5 m; medium dense; long trunk) + 1-storey building S: 2 Neem (Dia 4–5 m; medium dense) E: 2 Neem (Dia 4–5 m; medium dense) + Bank (1-storey) W: 1 Neem (Dia 4–5 m; medium dense) Note: Trunk angles vary; sparse branching

Table 1. Characteristics of Site 01 (S01), Site 02 (S02) and Site 03 (S03). Source: Prepared by the authors.

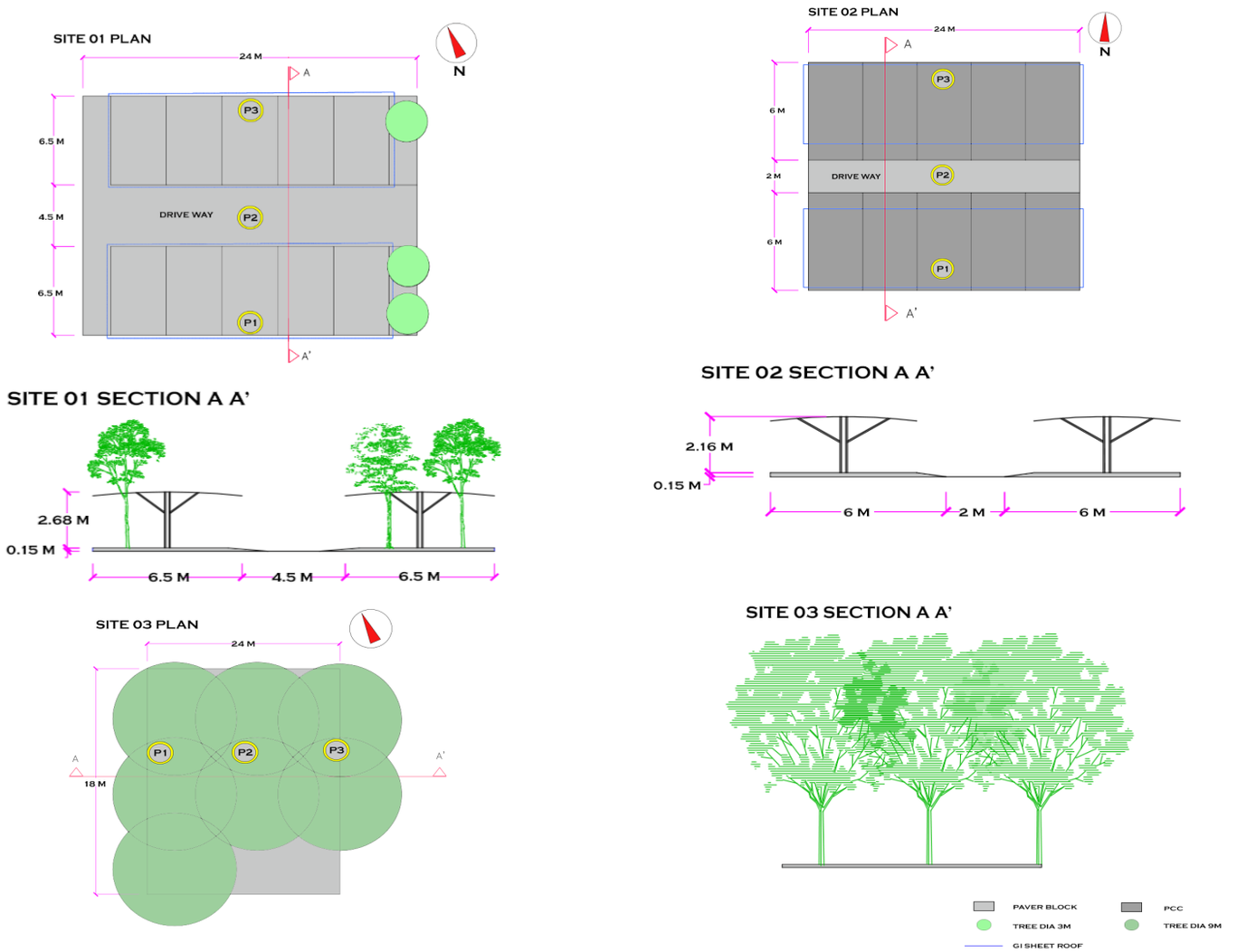


Figure 2. Illustration of the Site 01, Site 02, and Site 03. Source: Prepared by the authors.

Parameters	Units	Instrument	Accuracy	Image
Ta	°C	DeltaOHM_ HD32.3	1/3 DIN	
RH	%		±1.5% (0…90%RH) / ±2% (90…100%RH) @T=15…35°C (1.5 + 1.5% reading) % @ T= remaining range	
Tg	°C		Class 1/3 DIN	
Va	m/s		± 0.2 m/s (0.1÷1 m/s) ± 0.3 m/s (1÷5 m/s)	

Table 2. Parameters and Instruments used for field Measurements. Source: Prepared by the authors.

a semi-covered configuration with blue galvanized metal roofing (SRI 24) and paver block flooring (albedo 0.25). Site 02 (S02) incorporates green-coated metal roofing (SRI 31) with mixed paver and PCC surfaces (albedo 0.25–0.30). Site 03 (S03) represents an open typology, shaded predominantly by mature neem trees (Azadirachta indica), with no artificial roofing. Spatial layouts and sectional characteristics are illustrated in Figure 2, while detailed physical attributes are provided in Table 1.

Field measurements were conducted on 28 May 2025, which was identified as the hottest day in the region based on decadal meteorological data. The selected day was characterized by high solar radiation intensity, predominantly clear-sky conditions, and elevated ambient temperatures representative of extreme summer heat exposure in Tiruchirappalli. The measurement campaign was therefore intended to evaluate pedestrian-level thermal stress under peak warm–humid climatic conditions. While the selected extreme-day approach enables assessment of maximum thermal stress conditions relevant to climate-responsive parking design, additional multi-day and multi-season investigations would further improve the generalization to broader climates. Data were recorded during three representative pedestrian exposure periods: morning (MRG), 9:45–10:45; afternoon (AFT), 12:45–13:45; and evening (EVE), 16:45–17:45. At each site, three measurement points were established to represent exposed and shaded/covered zones. All measurements were taken at 1.5 m above ground level to reflect pedestrian thermal exposure. MRT was calculated from globe temperature (Tg) measurements following ISO 7726 procedures for outdoor thermal environments. Measurements were obtained using a standard black globe thermometer with an emissivity of 0.95 and a diameter of 150 mm. The MRT calculation incorporated Tg, air temperature (Ta), and wind speed (Va) to account for convective heat transfer effects under outdoor conditions (Equation 1). The estimated MRT values are subject to uncertainty associated with measurement variability in globe temperature, air temperature, and wind speed under outdoor field conditions. All instruments were field-checked prior to measurements to ensure operational consistency under outdoor summer conditions and were compliant with ISO 7726. Measurement specifications, units, and accuracy ranges are summarized in Table 2.

$$MRT = \left((T_g + 273.15)^4 + \left(\frac{1.10 \times 10^8 \times V_a^{0.6}}{\varepsilon \times D^{0.4}} \right) \times (T_g - T_a) \right)^{0.25} - 273.15 \quad \text{(Equation 1)}$$

Where:
Tg is globe temperature (°C)
Ta is air temperature (°C)
Va is wind speed (m/s)
E is globe emissivity
D is globe diameter (m).

Microclimatic simulations were performed using ENVI-met v5.7.2, a three-dimensional non-hydrostatic model capable of resolving radiative transfer, airflow dynamics, vegetation processes, and surface–atmosphere interactions at microscale resolution. The computational domain replicated the parking typology with a horizontal extent of 24 m × 22 m. A 2 m × 2 m grid resolution was applied in the horizontal directions, with a base vertical resolution of 0.1 m to capture near-ground gradients relevant to pedestrian comfort. Simulations were conducted for the same time intervals as field observations. Output variables were extracted using the Leonardo post-processing tool.

The ENVI-met simulations were initialized using meteorological conditions corresponding to the field measurement period. Initial atmospheric temperature, relative humidity, and wind conditions were taken from field observations and regional meteorological data for 28 May 2025. Simulations were conducted continuously for 24 hours, from 10 pm on 27 May 2025 to 10 pm on 28 May 2025, to stabilize surface–atmosphere energy exchange processes prior to daytime analysis. Wind speed at a height of 10 m above ground was specified based on measured site conditions, with a prevailing south–southwesterly wind direction. Clear-sky boundary conditions were adopted to represent the extreme summer heat event investigated in this study. Model inputs

Parameter	Specification
Software	ENVI-met v5.7.2
Simulation Date	28 May 2025
Grid Resolution	2 m (X), 2 m (Y), 0.1 m (Z)
Domain Size	24 m × 22 m
Evaluation Metrics	Ta; RH; Va; MRT; UTCI
Vegetation Model	Neem (Azadirachta indica); Height: 9 m; Crown Diameter: 9 m; LAI: 3.5
Design Variables	Albedo: 0.2, 0.4, 0.6SRI: 30, 60, 90Vegetation Cover: 0%, 20%, 40%, 60%
Simulation Periods	Morning (09:00–10:00); Afternoon (13:00–14:00); Evening (16:00–17:00)
Iterations	32 simulation scenarios

Table 3. Model Inputs and Assumptions. Source: Prepared by the authors.

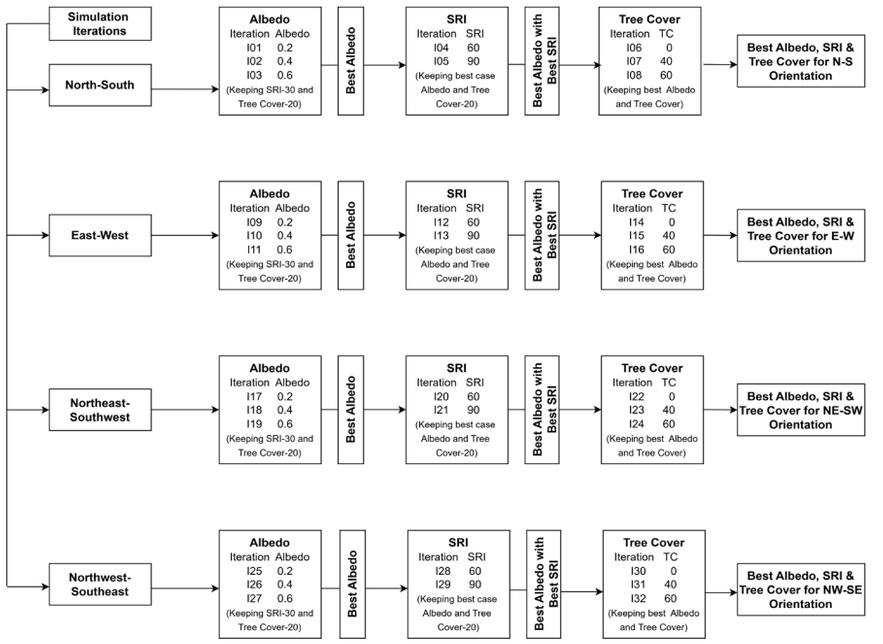


Figure 3. Parametric Design Iterations. Source: Prepared by the authors.

and assumptions are summarized in Table 3. ENVI-met resolves direct, diffuse, and reflected radiative exchange through integrated radiative transfer algorithms. This study focused primarily on the resulting MRT and UTCI responses rather than on the decomposition of individual radiative flux components. The computational domain was developed to represent the immediate parking microclimate and the surrounding contextual elements that influence pedestrian-level thermal conditions. While the selected domain size enabled detailed microscale analysis with manageable computational demand, possible edge effects associated with localized simulation domains are acknowledged as a limitation of the study.

Model validation was conducted by directly comparing simulated and measured values under identical spatial and temporal conditions. Predictive reliability was evaluated using the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and mean bias error (MBE). These indicators quantify explanatory strength, dispersion accuracy, and systematic deviation. Validation statistics are presented in Table 4. Strong agreement between measured and simulated Ta and MRT confirmed the suitability of the ENVI-met model for subsequent parametric assessment.

Following validation, a structured parametric matrix was developed to evaluate the combined influence of surface albedo, roof SRI, vegetation cover, and spatial orientation. Surface albedo values of 0.2, 0.4, and 0.6 represented

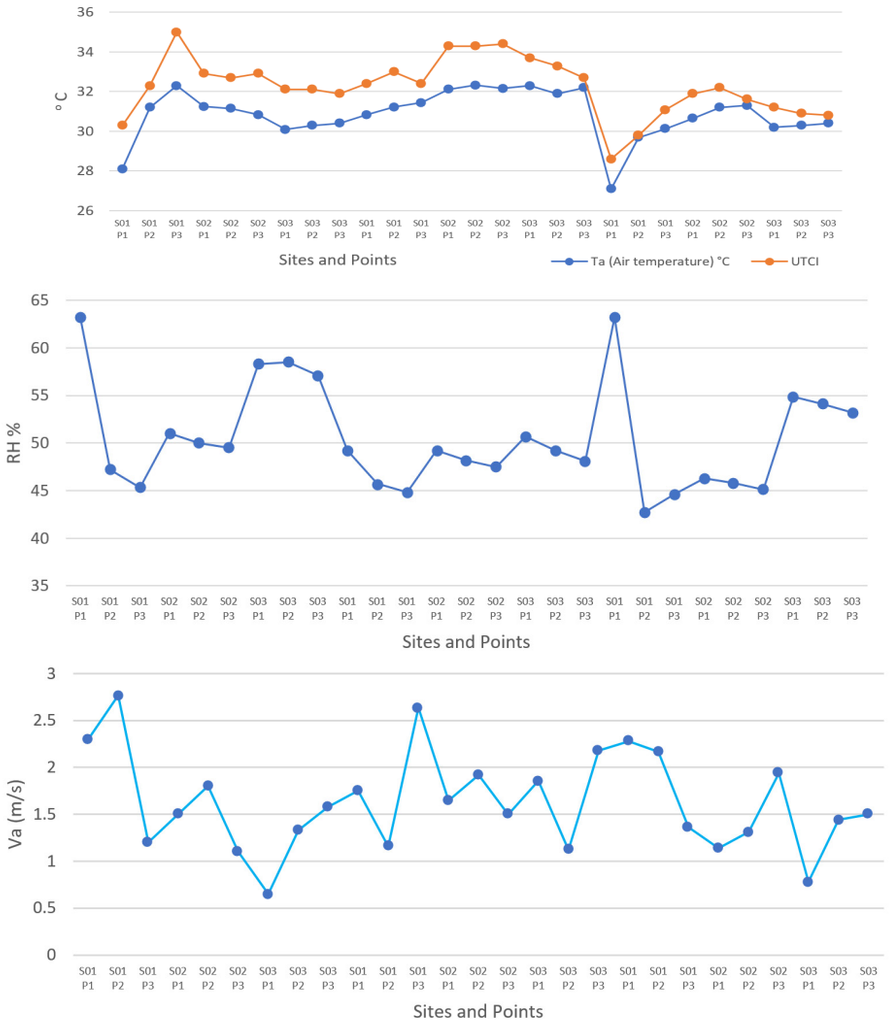


Figure 4. Time series field measurement data of Ta, UTCI, RH, Va for S01, S02, S03. Source: Prepared by the authors.

low-, medium-, and high-reflectivity pavements. Roof SRI values of 30, 60, and 90 simulated varying levels of reflective performance. Vegetation scenarios modeled Azadirachta indica with a height of 9 m, a crown diameter of 9 m, and a Leaf Area Index (LAI) of 3.5 to represent mature canopy conditions. Vegetation cover was varied at 0%, 20%, 40%, and 60% along the site perimeter to evaluate the effects of shading and evapotranspiration.

The parametric evaluation followed a stepwise matrix approach. For each orientation, North–South, East–West, Northeast–Southwest, and Northwest–Southeast, a base configuration reflecting prevalent local practice (albedo 0.2, SRI 30, 20% vegetation) was first modeled. Subsequently, albedo was varied while keeping SRI and vegetation constant to determine the optimal surface reflectivity. Using the identified albedo value, the roof SRI was varied, followed by systematic modifications to vegetation cover. This structured approach resulted in eight iterations per orientation, producing a total of thirty-two simulation scenarios (I01–I32). This matrix-based design enabled the evaluation of both individual parameter effects and their interactions under the different solar alignments (Figure 3). Thermal performance across all scenarios was assessed primarily using the UTCI, with support from analyses of Ta and MRT. The comparative framework allowed identifying optimized configurations to reduce pedestrian-level heat stress in tropical parking environments.

RESULTS AND ANALYSIS

FIELD MEASUREMENT ANALYSIS

Field measurements demonstrated pronounced diurnal variation across the three parking typologies (Figure 4). All sites exhibited progressive thermal escalation from morning to afternoon, with peak stress occurring between

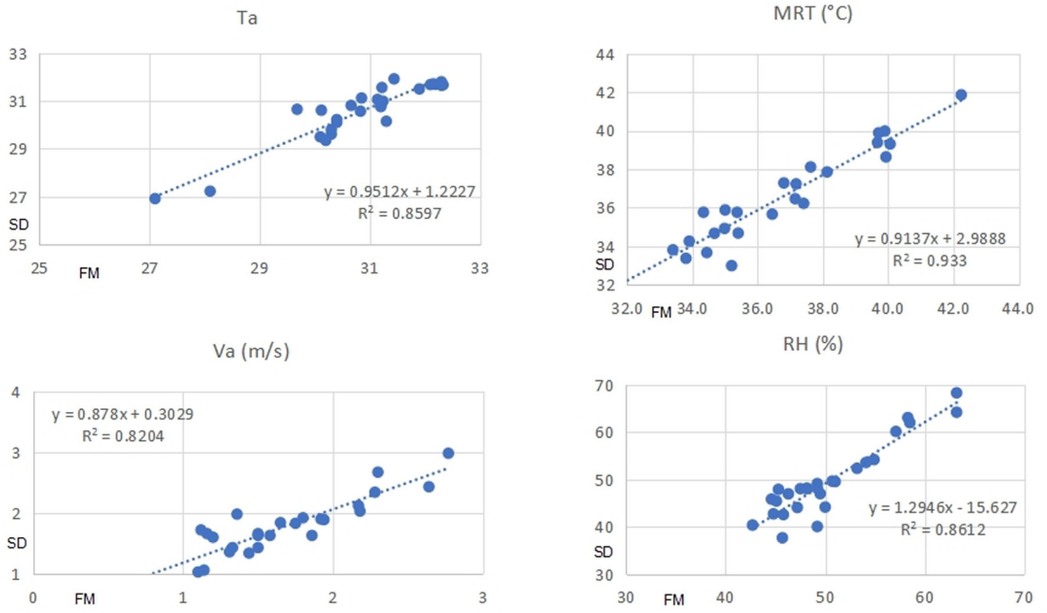


Figure 5. Field Measurement (FM) and Simulation Data (SD) Validation. Source: Prepared by the authors.

Variable	R^2	RMSE	MAE	MBE
Ta	0.795	0.55 °C	0.48 °C	−0.28 °C
RH	0.624	3.37 %	2.42 %	−0.76 %
Va	0.776	0.25 m/s	0.18 m/s	+0.10 m/s
MRT	0.931	0.77 °C	0.59 °C	−0.13 °C

Table 4. Validation Statistics Comparing Field-Measured and Simulation Variables. Source: Prepared by the authors.

12:45 and 1:45 PM, followed by partial evening recovery. However, the magnitude and persistence of thermal stress varied systematically with surface characteristics, roofing configuration, and the presence of vegetation.

Sites S01 and S02, both incorporating metal roofing sheets with low-to-moderate SRI 24 and 31, recorded elevated MRT and UTCI during peak hours. Despite partial shading, afternoon UTCI values exceeded 33–34°C in semi-covered areas and were higher in exposed driveway zones. The combined effect of low-albedo paving and re-radiation from heated metal roofing intensified the radiant load. Wind speeds beneath sheds were comparatively reduced, limiting convective dissipation and further amplifying thermal accumulation.

In contrast, Site S03, fully shaded by a mature neem canopy and lacking artificial roofing, demonstrated consistently lower MRT during peak hours despite comparable air temperature. Vegetation reduced direct solar interception and moderated longwave exchange, resulting in lower UTCI across measurement points. Moreover, S03 exhibited more rapid evening recovery, indicating reduced thermal storage and enhanced microclimatic stabilization via evapotranspiration. These field observations establish MRT as the dominant differentiator among typologies and provide empirical grounding for subsequent simulation-based analysis.

Correlation Analysis

Pearson correlation analysis confirms the dominant role of radiative exposure. Ta ($r = 0.894$, $p < 0.001$) and MRT ($r = 0.668$, $p < 0.001$) showed strong positive associations with UTCI, whereas wind speed exhibited a weak and statistically insignificant correlation. The findings reinforce the conclusion that in warm–humid parking environments, radiant heat exchange exerts a greater influence on pedestrian stress than convective mechanisms.

MODEL VALIDATION

Model validation was performed by comparing field-measured and ENVI-met simulated parameters under

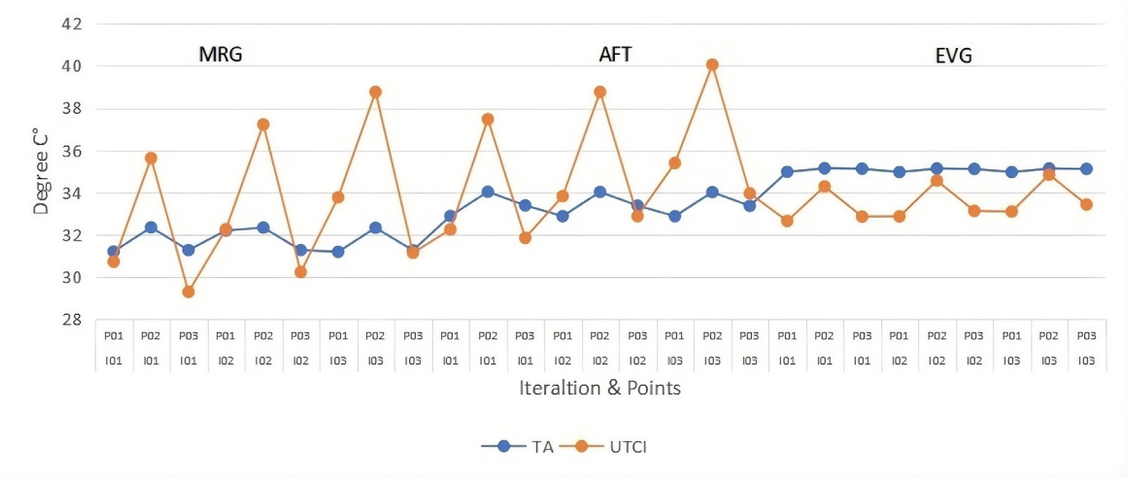


Figure 6. Time series data of Ta & UTCI for I01, I02, I03. Source: Prepared by the authors.

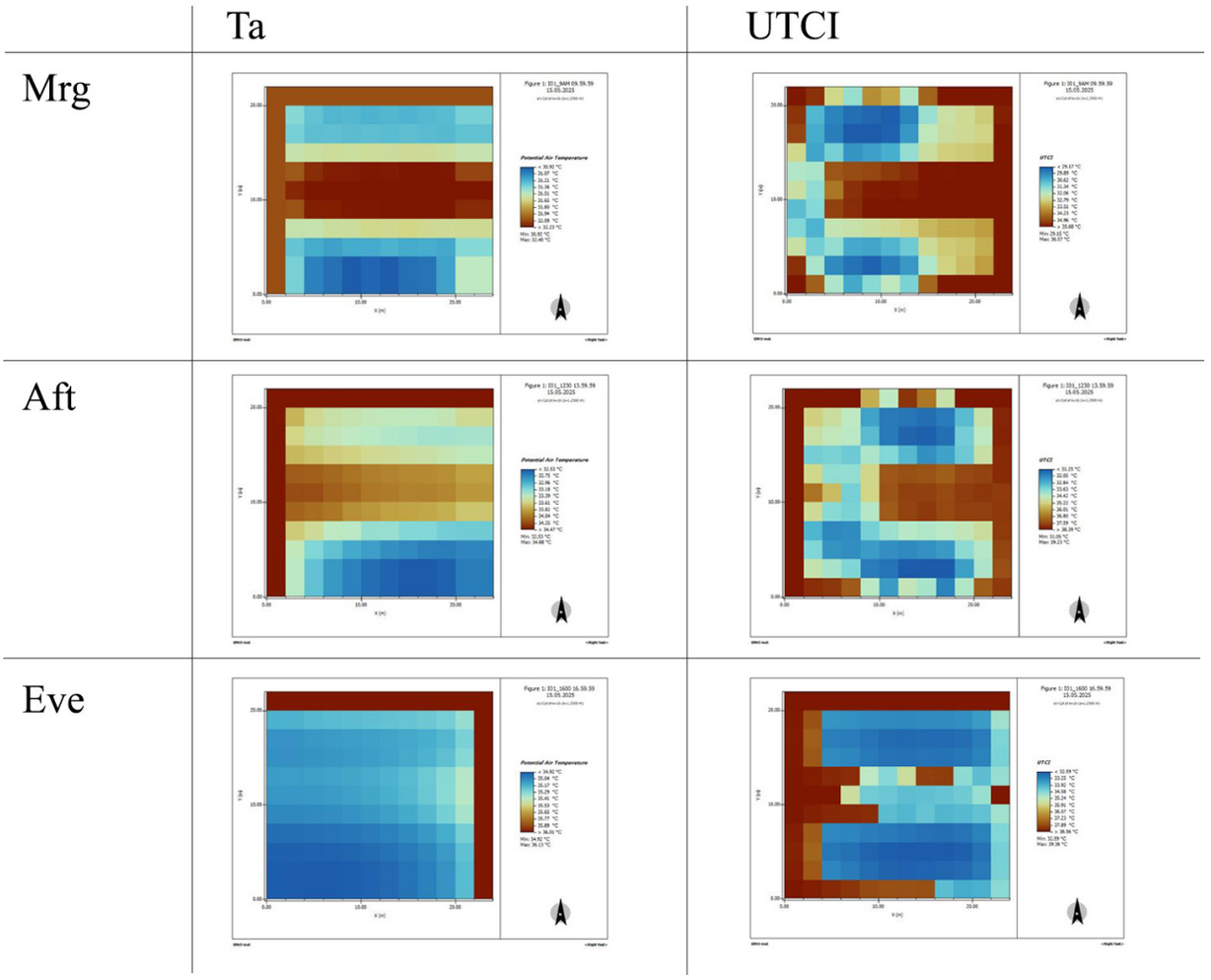


Figure 7. Ta and UTCI Map of I01.Source: Prepared by the authors using Envi met-v5.7.2.

identical temporal and spatial conditions (Figure 5). The validation results demonstrate acceptable agreement (R^2 = 0.931; RMSE = 0.77 °C) between measured and simulated thermal parameters under the investigated climatic conditions, indicating that the ENVI-met model is suitable for comparative parametric assessment of parking microclimates (Table 4). Ta also showed robust performance (R^2 = 0.795; RMSE = 0.55 °C). Wind speed achieved satisfactory correlation (R^2 = 0.776), while relative humidity presented moderate but acceptable agreement (R^2 = 0.624). Mean Bias Error values for Ta and MRT remained within ±1 °C, indicating minimal systematic deviation. Overall, the validation statistics confirm that the ENVI-met framework reliably captures microclimatic dynamics and is suitable for parametric evaluation of outdoor thermal comfort in parking typologies.

PARAMETRIC SIMULATION RESULTS

North–South Orientation

Under North–South alignment, simulations reveal distinct sensitivity to vegetation density, with comparatively limited responses to variations in albedo and SRI (Figure 6). Across iterations, UTCI peaked at the exposed driveway point (P2), confirming direct solar exposure as the primary stress driver. Evening recovery remained incomplete under low-vegetation scenarios (Figure 7).

Increasing surface albedo from 0.2 to 0.6 did not result in proportional reductions in UTCI. In exposed zones, higher albedo marginally increased peak UTCI, indicating enhanced shortwave reflection and elevated MRT. Similarly, increasing roof SRI from 30 to 90 produced negligible pedestrian-level improvement, suggesting that reflective gains were offset by radiative redistribution.

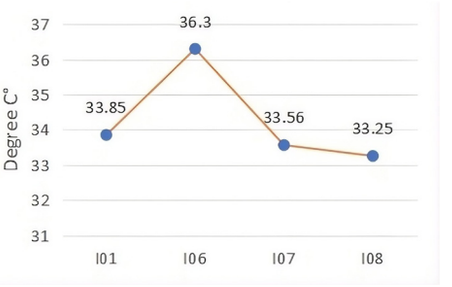


Figure 8. UTCI Average over time for I01, I06. I07, and I08. Source: Prepared by the authors.

In contrast, vegetation exerted substantial mitigation. As shown in Figure 8, increasing canopy cover from 0% to 60% consistently reduced the average UTCI across time periods, with the greatest reduction during the afternoon peak. Shading significantly reduced MRT and limited heat accumulation. Under this orientation, vegetation clearly dominated over material reflectivity as the principal determinant of thermal comfort.

East–West Orientation

The East–West configuration recorded the highest peak UTCI values among orientations (Figure 9). Afternoon escalation was steeper than for the North–South alignment, reflecting prolonged solar exposure along the parking axis. Albedo and SRI adjustments produced minimal mitigation under this configuration. The orientation intensified both direct and reflected radiation, reducing the effectiveness of reflectivity-based strategies. Although vegetation contributed measurable cooling, its impact was moderated by sustained solar incidence during peak hours. East–West alignment, therefore, exhibited the greatest susceptibility to midday thermal accumulation, particularly in exposed zones.

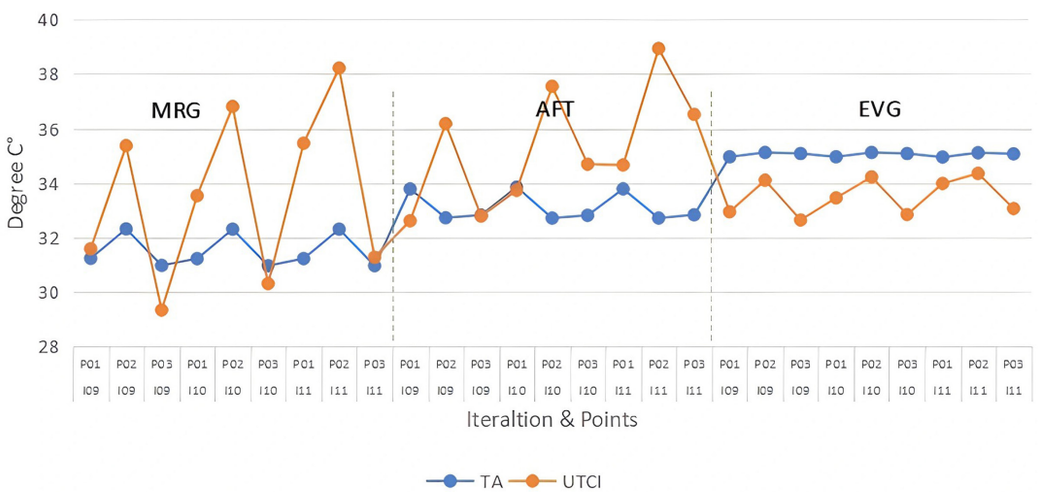


Figure 9. Time-series data for Ta & UTCI for I09, I10, and I11. Source: Prepared by the authors.

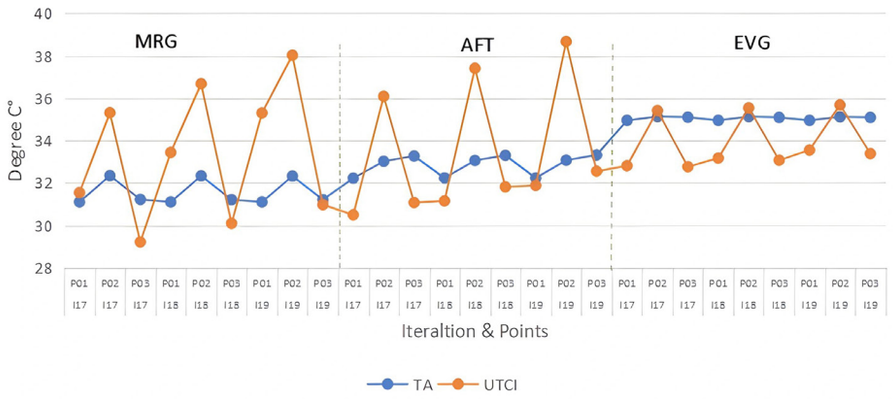


Figure 10. Time-series data for Ta & UTCI for I17, I18, and I19. Source: Prepared by the authors.

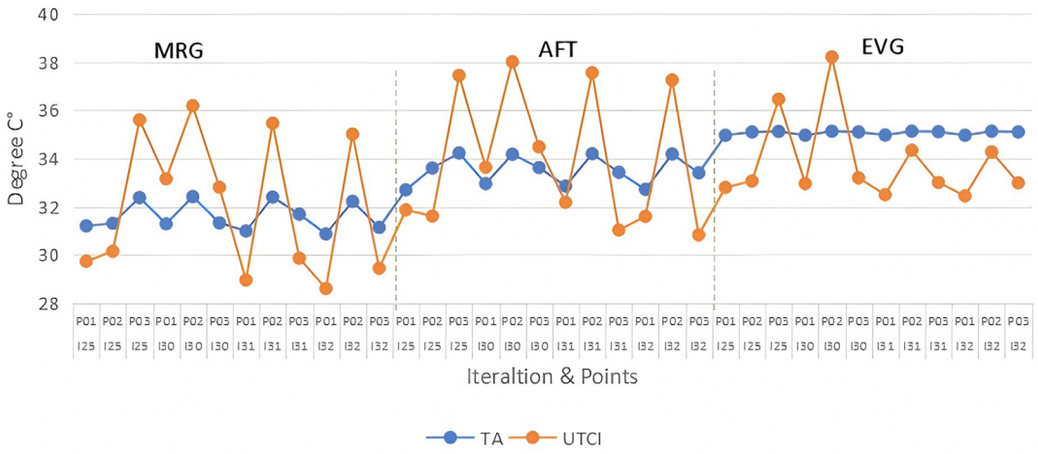


Figure 11. Time-series data for Ta & UTCI for I25, I30, I31, and I32. Source: Prepared by the authors.

Northeast–Southwest Orientation

The Northeast–Southwest (NE–SW) orientation demonstrated moderated diurnal variation relative to East–West alignment (Figure 10). Peak UTCI at P2 remained lower than under the orthogonal East–West configuration, indicating reduced duration of direct solar incidence.

As in other orientations, albedo and SRI adjustments produced limited changes in pedestrian-level UTCI. Vegetation, however, consistently reduced peak values, particularly in semi-exposed zones. The oblique solar alignment reduced radiant accumulation and, when combined with canopy shading, produced more balanced afternoon conditions. This orientation exhibited a moderated peak stress and comparable evening recovery.

Northwest–Southeast Orientation

The Northwest–Southeast (NW–SE) orientation demonstrated the lowest peak UTCI among the tested alignments (Figure 11). The angular solar trajectory reduced prolonged direct exposure at P2, limiting MRT escalation during peak hours. Material modifications again produced marginal differences. However, vegetation integration resulted in a substantial reduction in the average UTCI (Figure 12). The 60% canopy scenario exhibited the lowest peak stress across all orientations. Shading reduced radiative load and enhanced microclimatic stability in both covered and semi-exposed zones. This orientation, when combined with high vegetation density, exhibited the most favorable thermal performance.

CROSS-ORIENTATION COMPARATIVE ANALYSIS

Comparative analysis reveals systematic differences in peak thermal response (Figure 13). Although the different parking configurations produced measurable reductions in UTCI, most scenarios remained within the calibrated moderate-heat-stress category. Accordingly, the results are interpreted in terms of relative thermal improvement rather than categorical thermal transition. East–West

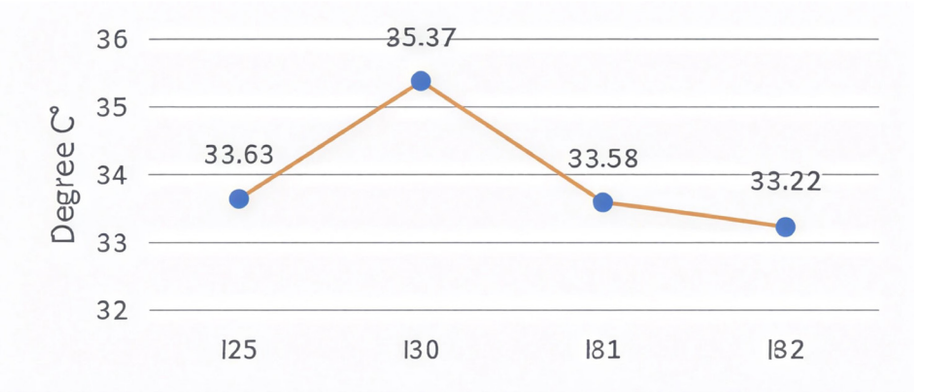


Figure 12. UTCI Average for I25, I30, I31, and I32. Source: Prepared by the authors.

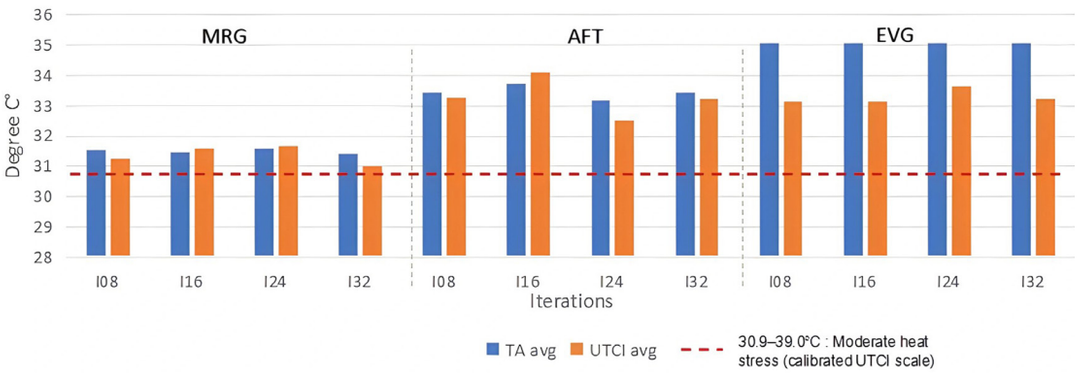


Figure 13. Time series comparison of Ta and UTCI for best-performing iterations (I08, I16, I24, I32). Source: Prepared by the authors.

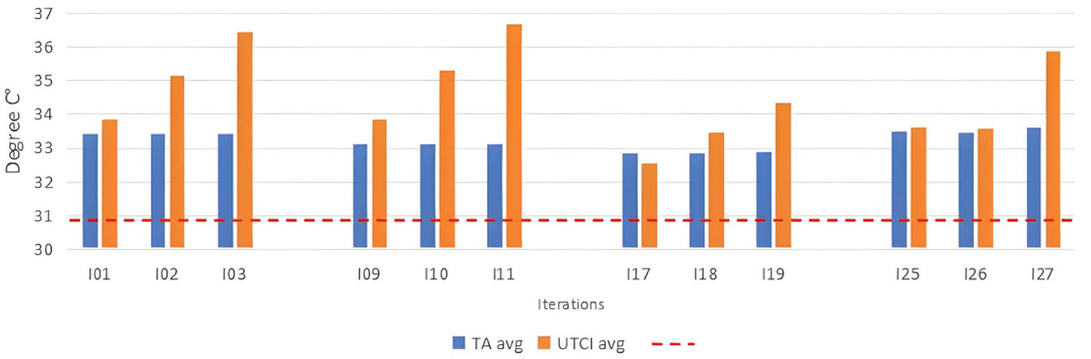


Figure 14. Afternoon comparison of Ta and UTCI across iterations with varying surface albedo values. Source: Prepared by the authors

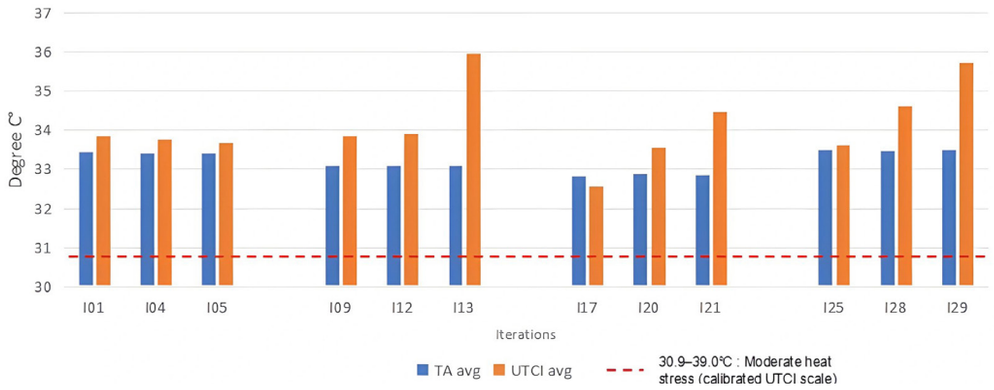


Figure 15. Afternoon comparison of Ta and UTCI across iterations with varying roof SRI values. Source: Prepared by the authors.

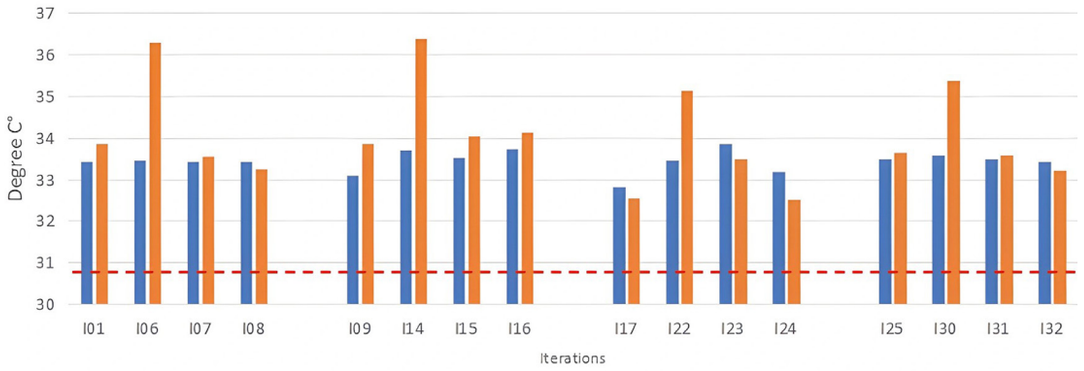


Figure 16. Afternoon comparison of Ta and UTCI across iterations with varying Tree cover. Source: Prepared by the authors.

alignment produced the highest afternoon UTCI, while NW–SE alignment consistently achieved the lowest peak values under equivalent vegetation conditions. North–South and NE–SW orientations exhibited intermediate performance.

Morning conditions were similar across orientations, indicating that alignment primarily influences midday radiative accumulation rather than baseline thermal state. Differences intensified during peak solar intensity, when geometric orientation directly governed duration and angle of incident radiation on exposed surfaces.

Diagonal alignments, particularly NW–SE, reduced peak accumulation more effectively than orthogonal East–West configurations, demonstrating the interaction between solar geometry and surface exposure.

PARAMETER-SPECIFIC EFFECTS

Surface Albedo

Afternoon comparison indicates that increasing albedo from 0.2 to 0.6 did not consistently reduce the UTCI (Figure 14). In exposed zones, higher reflectivity marginally elevated UTCI due to increased shortwave reflection and MRT. Effects were amplified in orthogonal orientations with sustained solar incidence.

Roof Solar Reflectance Index (SRI)

Increasing SRI from 30 to 90 yielded limited pedestrian-level cooling (Figure 15). Although roof surfaces experienced reduced heating, reflected radiation beneath semi-covered areas redistributed radiant energy toward occupants, constraining overall benefit.

Vegetation Cover

Vegetation demonstrated the strongest mitigation effect (Figure 16). Increasing canopy from 0% to 60% consistently reduced UTCI across orientations, with peak reductions during afternoon stress. Shading significantly lowered MRT and suppressed radiant accumulation, establishing vegetation as the dominant parameter influencing thermal comfort.

Urban condition	Primary design priority	Expected thermal implication
Vegetation feasible	60% canopy cover + NW–SE orientation	Lowest pedestrian thermal stress
Vegetation partially feasible	Moderate canopy + low albedo + moderate SRI	Balanced mitigation with reduced MRT
Vegetation not feasible	Orientation optimization + controlled reflectivity	Orientation becomes the dominant passive strategy
Retrofit context	Shading first, reflectivity second	Avoid reliance on reflective materials alone
Budget-constrained context	Orientation and selective shading	Higher benefit than material-only upgrades

Table 5. Design hierarchy for parking environments under different urban constraints. Source: Prepared by the authors.

Interaction effects between orientation, vegetation, and reflective materials

The results show that the thermal response of surface albedo and roof SRI is not uniform across the study domain but is strongly moderated by orientation and vegetation density. Under low-vegetation conditions, increases in albedo produced limited or adverse UTCI responses because reflected shortwave radiation increased pedestrian-level radiant loading. In contrast, when vegetation cover increased, the negative impact of reflected radiation was reduced due to shading and lower MRT. Orientation also modified the magnitude of these responses: East–West alignment amplified afternoon radiative accumulation, whereas NW–SE alignment moderated peak exposure. These findings indicate that parking thermal performance arises from the interaction among radiative materials, canopy configuration, and solar geometry rather than from any single design variable in isolation.

Table 5 represents a key contribution of this study by translating the field-validated parametric analysis into an operational design hierarchy for parking environments in warm–humid climates. The framework demonstrates that the thermal effectiveness of mitigation strategies is not universal but strongly depends on the interaction of vegetation availability, orientation, and reflective surface properties. While vegetation consistently exhibited the greatest reduction in pedestrian heat exposure, the results reveal that orientation becomes the dominant passive design determinant when canopy integration is restricted. Furthermore, the limited and context-dependent benefits of high-albedo pavements and reflective roofing suggest that material-based interventions should be implemented in conjunction with, rather than as substitutes for, spatial and landscape design strategies. Consequently, the proposed framework moves beyond isolated parameter evaluation and provides a decision-support tool that links microclimatic performance with realistic urban design constraints, thereby facilitating more effective climate-responsive planning and retrofit decisions.

STATISTICAL ANALYSIS

Statistical analysis was performed on the complete dataset (n = 288) to quantify the relationship between environmental parameters and outdoor thermal comfort. Pearson correlation analysis revealed a strong positive association between MRT and UTCI ($r = 0.653$, $p < 0.001$), confirming the dominant role of radiative heat exchange in influencing pedestrian thermal stress. Ta demonstrated a moderate positive correlation ($r = 0.358$, $p < 0.001$), while relative humidity showed a negative correlation ($r = -0.432$, $p < 0.001$), indicating partial moderation of UTCI under simulated conditions. Wind speed exhibited a weak and statistically insignificant correlation, suggesting limited convective influence within the parking configuration.

A multiple linear regression model was developed to predict UTCI as a function of air temperature, MRT, relative humidity, and wind speed. The regression model demonstrated strong explanatory capability within the investigated dataset ($R^2 = 0.87$, $p < 0.001$) and was used to evaluate the relative influence of environmental variables on UTCI under the investigated climatic conditions. The derived predictive relationship (Equation 2) is expressed as:

$$UTCI = -2.658 + 0.841(Ta) + 0.229(MRT) - 0.003(RH) - 0.614(Wind)$$

(Equation 2)

Standardized regression coefficients indicate that MRT exerts the strongest influence on UTCI among the evaluated environmental variables, confirming radiative exposure as the dominant contributor to pedestrian thermal stress. The results further indicate that vegetation cover and orientation primarily influence outdoor comfort by modulating MRT and solar exposure. The Variance Inflation Factor (VIF < 5) indicates the absence of multicollinearity. These results reinforce radiative load as the governing mechanism of thermal stress.

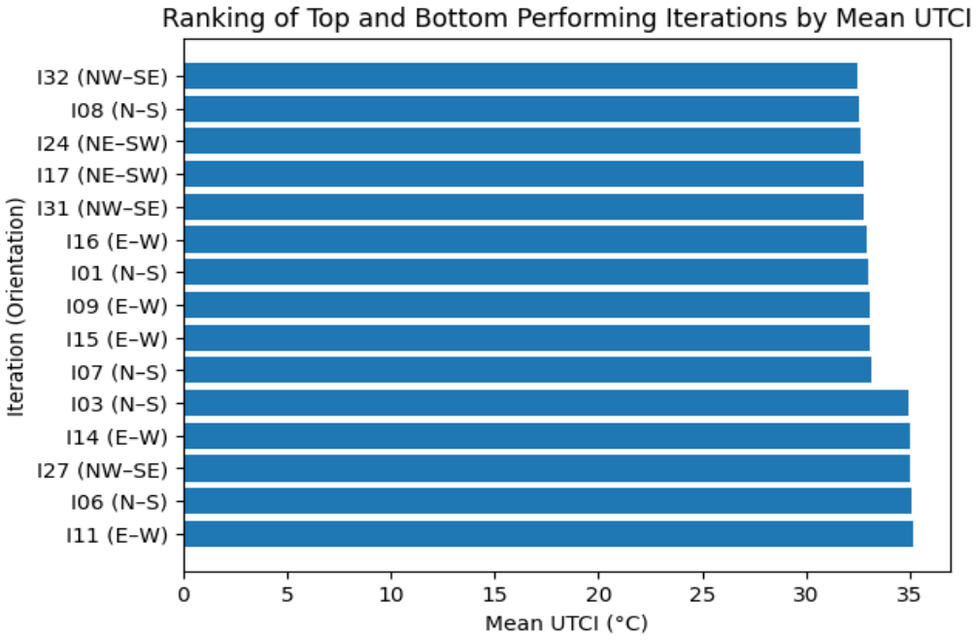


Figure 17. Top and Bottom Performing Iterations Based on Mean UTCI. Source: Prepared by the authors

OPTIMIZATION RANKING

Evaluation of all thirty-two iterations demonstrates clear performance stratification (Figure 17). High vegetation density consistently aligned with lower mean UTCI across orientations. Iteration I32 (NW–SE; albedo 0.2; SRI 30; 60% vegetation) achieved the lowest mean UTCI (32.49°C), reflecting the synergistic interaction between canopy shading and favorable solar alignment. Conversely, minimal vegetation under the East–West alignment (I11) recorded the highest mean UTCI (35.16°C). The ranking pattern unequivocally identifies vegetation integration and orientation as dominant determinants of thermal performance, whereas reflectivity adjustments alone produced limited improvement.

DISCUSSION

The findings confirm that MRT is the dominant driver of outdoor thermal comfort in parking environments, consistent with studies emphasizing the primacy of radiative exchange in pedestrian heat stress (Taleghani, 2018) Increasing surface albedo did not consistently improve comfort, as higher reflectivity elevated pedestrian-level radiant exposure, a phenomenon previously reported where albedo increases from 0.2 to 0.6 raised MRT and thermal stress indices (Ghoniem et al., 2025). Although reflective pavements reduce surface temperatures, their effectiveness depends on shading and spatial context (Taleghani, 2018).

Similarly, higher roof SRI values produced limited pedestrian-scale cooling. While cool materials can reduce surface temperatures and mitigate the UHI (Jandaghian et al., 2025), their impact on comfort is contingent upon surrounding geometry and exposure conditions. In semi-covered parking typologies, reflected radiation may redistribute rather than eliminate thermal load.

Vegetation demonstrated the most substantial cooling effect, corroborating evidence that tree shading reduces thermal stress more effectively than albedo modification (Zhang et al., 2025). The observed reductions under increased canopy cover align with documented cooling through shading and evapotranspiration (He & Reith, 2023). The influence of vegetation density and structure on pedestrian comfort further supports these findings (Pattnaik et al., 2025).

Orientation shaped the magnitude and timing of thermal stress, with East–West alignment intensifying afternoon exposure, consistent with research linking urban morphology and solar penetration to pedestrian comfort (Rachidi et al., 2026). Integrated strategies that combine vegetation, reflective materials, and orientation-sensitive planning therefore offer the most effective pathway to improving thermal comfort in warm–humid parking environments.

Using the calibrated UTCI scale, the investigated parking environments predominantly exhibited moderate heat stress conditions. Within this range, increased vegetation cover and favorable orientation reduced pedestrian thermal exposure more effectively than modifications to

reflective materials alone, by limiting direct solar exposure and lowering MRT. Regression analysis and parametric comparisons further indicate that the thermal influence of albedo, roof reflectivity, vegetation, and orientation is strongly interconnected through their collective impact on pedestrian radiative conditions.

Beyond reaffirming the cooling benefits of vegetation, this study reveals that the thermal effectiveness of reflective materials is highly dependent on orientation and canopy context. While higher albedo and roof SRI reduced surface heat absorption, they did not consistently improve pedestrian thermal comfort due to increased radiative exposure. Under vegetation-constrained conditions, orientation emerged as a more influential determinant of thermal comfort than material reflectivity. These findings underscore the need for integrated mitigation strategies and establish a hierarchy of design interventions for parking environments in warm–humid climates.

STUDY LIMITATIONS AND FUTURE RESEARCH

This study was designed to evaluate the thermal performance of parking under representative peak summer conditions in a warm–humid climate. Consequently, the model validation focused on an extreme summer day and may not fully capture seasonal variability. In addition, MRT was estimated using the ISO 7726 globe-temperature formulation, and thermal comfort was assessed using UTCI as the primary evaluation index. While these methodological choices do not affect the comparative assessment of the investigated design scenarios, future studies should incorporate multi-season observations, uncertainty analysis of derived thermal parameters, alternative comfort indices, and occupant-based thermal perception surveys to further enhance the generalizability of the findings.

CONCLUSION

This study investigated the combined influence of surface albedo, roof SRI, vegetation cover, and orientation on pedestrian-level thermal comfort in warm–humid parking environments. Through field measurements and validated ENVI-met simulations, the results demonstrate that MRT is the dominant determinant of outdoor thermal stress, outweighing isolated modifications in air temperature.

Reflectivity-based strategies alone proved insufficient. Increasing surface albedo and roof SRI reduced material heat absorption but did not consistently lower UTCI due to reflected radiation and radiative redistribution effects. In contrast, vegetation emerged as the most effective mitigation strategy. Increasing canopy cover to 60% consistently reduced peak thermal stress across orientations by lowering MRT through shading and evapotranspiration.

Orientation further mediated thermal accumulation: East–West alignment intensified afternoon exposure, whereas Northwest–Southeast configuration moderated peak stress. The optimal performance was achieved through the combined integration of low albedo (0.2), moderate SRI (30), 60% vegetation cover, and diagonal alignment. These findings underscore that climate-responsive parking design in tropical cities must prioritize radiative management through canopy integration and orientation-sensitive planning rather than reliance on reflective materials alone. While the findings provide important insights into thermal comfort under peak summer conditions, future studies incorporating extended monitoring periods and occupant-based thermal perception assessments would further strengthen the generalization to broader climatic conditions.

Beyond confirming the thermal benefits of vegetation, this study establishes a field-validated hierarchy of mitigation strategies for parking environments in warm–humid climates. The results demonstrate that the thermal effectiveness of reflective materials is not universal but depends on orientation and vegetation context. This provides a decision-support framework for climate-responsive parking design, particularly in urban settings where extensive vegetation cannot be introduced.

AUTHOR CONTRIBUTION CRediT

Conceptualization: A.S.K.S., P.G.; Data Curation: A.S.K.S.; Formal Analysis: A.S.K.S., P.G.; Funding Acquisition: P.G., G.S.; Investigation: A.S.K.S.; Methodology: A.S.K.S., P.G.; Project Administration: P.G., G.S.; Resources: P.G., G.S.; Software: A.S.K.S.; Supervision: P.G., G.S.; Validation: A.S.K.S., P.G., G.S.; Visualization: A.S.K.S.; Writing – Original Draft: A.S.K.S.; Writing – Review & Editing: P.G., G.S.; Writing – Revision & Editing: ASKS, P.G., G.S.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors declare that no funding was received for this research.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

Abdelwahab, R. A., Fekry, A. A., & Hamed, R.E.-D. (2025). The effective landscape design parameters with high reflective hardscapes: guidelines for optimizing human thermal comfort in outdoor spaces by design -a case on hot arid climate weather. *Computational Urban Science, 5*,28. https://doi.org/10.1007/s43762-025-00186-w

Austin, D., Solano, T., & Chen Austin, M. (2025). Synergistic Effects of Bioclimatic Strategies on Microclimate Improvement: A Numerical–

Experimental Study at University Campus Scale. *Sustainability, 17*(19), 8867. https://doi.org/10.3390/su17198867

Calhoun, Z.D., Willard, F., Ge, C., Rodriguez, C., Bergin, M., & Carlson, D. (2024). Estimating the effects of vegetation and increased albedo on the urban heat island effect with spatial causal inference. *Scientific Reports, 14*, 540. https://doi.org/10.1038/s41598-023-50981-w

Chen, W.-A., Fang, P.-L., & Hwang, R.-L. (2025). Calibrating the UTCI scale for hot and humid climates through comprehensive year-round field surveys to improve the adaptability. *Urban Climate, 59*, 102267. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102267

Deepthi, S., Sudalaimani, K., Radhakrishnan, S. P., & Radhakrishnan, S. (2024). Evaluating urban heat island to achieve sustainable development goals: A case study of Tiruchirappalli city, India. *Sustainable Cities and Society, 116*, 105865. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105865

Ghenai, C., Rejeb, O., Sinclair, T., Almarzouqi, N., Alhanaee, N., & Rossi, F. (2023). Evaluation and thermal performance of cool pavement under desert weather conditions: Surface albedo enhancement and carbon emissions offset. *Case Studies in Construction Materials, 18,* e01940. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01940

Ghoniem, M., Fahmy, A., & Kamel, T. M. (2025). Evaluating urban surface materials: Albedo optimization and shading for pedestrian thermal comfort in hot-arid environments. *Civil Engineering and Architecture, 13*(6), 4331–4352. https://doi.org/10.13189/cea.2025.130616

Gidey, E., & Mhangara, P. (2025). Improving spatial modeling framework to assess the impact of vegetation cover, water content, and surface temperature on urban heat island effects in Johannesburg, South Africa. *Discover Environment*, 3(1), 74. https://doi.org/10.1007/s44274-025-00264-0

He, Q., & Reith, A. (2023). A study on the impact of green infrastructure on microclimate and thermal comfort. *Pollack Periodica, 18*(1), 42–48. https://doi.org/10.1556/606.2022.00668

Huang, C., Liu, K., Ma, T., Xue, H., Wang. P., & Li, L. (2025). Analysis of the impact mechanisms and driving factors of urban spatial morphology on urban heat islands. *Scientific Reports, 15*, 18589. https://doi.org/10.1038/s41598-025-04025-0

Jandaghian, Z., Lacasse, M., & Gaur, A. (2025). Solar Reflectance Index of Building Envelope Materials: A Comparative Review of North American and European Standards and Long-Term Performance. *Buildings, 15*(6), 888. https://doi.org/10.3390/buildings15060888

Kafy, A. A., Alsulamy, S., & Alsaleh, A. M. (2026). Escalating heat hazard risk in arid urban environments: A two-decade assessment of thermal stress patterns and health risks using UTCI and WBGT indices in Riyadh, Saudi Arabia. *Natural Hazards, 122*, 156. https://doi.org/10.1007/s11069-025-07930-9

Kaushik S., A. S., & Amraotkar, S. (2026). Analyzing the effects of orientation, window size and position on solar heat gain for four Indian cities. *Science, Engineering and Health Studies, 20*, 26040001. https://doi.org/10.69598/sehs.20.26040001

Lin, P., Song, D., & Qin, H. (2021). Impact of parking and greening design strategies on summertime outdoor thermal condition in old mid-rise residential estates. *Urban Forestry & Urban Greening, 63*, 127200. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127200

Nutakki, T.U.K., Kazim, W.U., Alamara, K., Salameh, T., & Abdelkareem, M.A. (2023). Experimental Investigation on Aging and Energy Savings Evaluation of High Solar Reflective Index (SRI) Paints: A Case Study on Residential Households in the GCC Region. *Buildings,13*(2), 419. https://doi.org/10.3390/buildings13020419

Pachauri, R., & Kaushik S., A. S. (2025). A comparative evaluation of the effectiveness of glazed and open balconies in low-rise residences in moderate climates via field measurements and simulations. *Science, Engineering and Health Studies, 19*, 25040004. https://doi.org/10.69598/sehs.19.25040004

Parison, S., Chaumont, M., Kounkou-Arnaud, R., Long, F., Bernik, A., Da Silva, M., & Hendel M. (2023). The effects of greening a parking lot as a heat mitigation strategy on outdoor thermal stress using fixed and mobile measurements: case-study project "tertiary forest." *Sustainable Cities and Society, 98*,104818. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104818

Patel, P., & Kaushik, A. S. (2023). The impact of microclimate on energy performance of office buildings within urban contexts located in a composite climate, the city of Indore. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1210*, 012007. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1210/1/012007

Pattnaik, N., Rahman, M. A., & Pauleit, S. (2025). Urban vegetation structure and composition influence pedestrian thermal comfort in public spaces: A case study in Munich. *Urban Forestry & Urban Greening, 114*, 129162. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.129162

Peter, A., & Kaushik, S. A. S. (2024). A study on the impact of courtyard vegetation on its thermal comfort performance in an educational building of warm and humid climates. *Science, Engineering and Health Studies, 18,* 24040011. https://doi.org/10.69598/sehs.18.24040011

Rachidi, A., Mounir, S. H., Sghir, S., & Lebaut, S. (2026). Urban albedo interventions reshape thermal comfort: A multiscale analysis of heat island, comfort, and energy effects in semi-arid Marrakesh. *Sustainable Cities and Society, 136,* 107090. https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.107090

Rodriguez, A., Wood, S., Carmeliet, J., Kubilay, A., & Derome, D. (2025). Local impact of trees on thermal comfort of pedestrians in streets. *Urban Climate, 61,* 102417. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102417

Sen, S., Fernandez, J.P.R.M.-R., & Roesler, J. (2020). Reflective Parking Lots for Microscale Urban Heat Island Mitigation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2674*(8). 663–71. https://doi.org/10.1177/0361198120919401

Silva Nascimento, A. D., Silva, L.V.A.D., Lisboa, M.A.N., Oliveira Silva, A.D., Rodrigues Ferreira, M.F., Silva, S.C.F.D., Melo, M.J.V.D., Silva, A.C.V.D., & Júnior, J. T. C. (2025). How do visitors perceive the urban greenery microclimate in the city's only green space? A case study in Brazilian semi-arid. *Environmental Development, 56,* 101244. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2025.101244

Taleghani, M. (2018). The impact of increasing urban surface albedo on outdoor summer thermal comfort within a university campus. *Urban Climate, 24,* 175–184. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.03.001

Wei, Y.-Y., Cheng, C.Y., & Lin, T.-P. (2025). The influence of trees shade level on human thermal comfort and the development of applied assessment tools. *Landscape and Urban Planning, 263*, 105436. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2025.105436

Wang, C., Zhan, W., Liu, Z., Li, J., Li, L., Fu, P., Huang, F., Lai, J., Chen, J., Hong, F., & Jiang, S. (2020). Satellite-based mapping of the Universal Thermal Climate Index over the Yangtze River Delta urban agglomeration. *Journal of Cleaner Production, 277*, 123830. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123830

Zhang, T., Fu, X., Qi, F., Shen, Y., Xu, P., Tao, Y., Liu, T., & Song, Y. (2025). Optimizing pedestrian thermal comfort in urban street canyons for summer and winter: Tree planting or low-albedo pavements? *Sustainable Cities and Society, 120*, 106143. https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106143

Shading the Glass Façade: Textile Membrane Strategies for Early-Stage Design for Office Building Energy-Efficiency in Hot–Humid Climates
Chandrasekaran Chockalingam, Madhu Mathi Anbu, Mase Noguchi
Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 126 - 141
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.08

SHADING THE GLASS FAÇADE: TEXTILE MEMBRANE STRATEGIES FOR EARLY-STAGE DESIGN FOR OFFICE BUILDING ENERGY-EFFICIENCY IN HOT–HUMID CLIMATES

Recibido 28/01/2026
Aceptado 27/06/2026

PROTECCIÓN DE LA FACHADA DE VIDRIO: ESTRATEGIAS DE MEMBRANAS TEXTILES PARA EL DISEÑO EN ETAPAS TEMPRANAS PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE EDIFICIOS DE OFICINAS EN CLIMAS CÁLIDOS Y HÚMEDOS

SOMBREAMENTO DE FACHADAS DE VIDRO: ESTRATÉGIAS COM MEMBRANAS TÊXTEIS PARA O PROJETO INICIAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS EM CLIMAS QUENTES E ÚMIDOS

Chandrasekaran Chockalingam (Autor de Correspondencia)
Ph.D. in Fully Glazed Building Facades
Professor, School of Architecture and Planning
Vellore Institute of Technology
Vellore, India
https://orcid.org/0000-0003-4215-0202
chandrasekaran.c@vit.ac.in

Madhu Mathi Anbu
Ph.D. in Building Thermal Performance Professor,
Higher academic grade, School of Architecture and Planning
Vellore Institute of Technology
Vellore, India
https://orcid.org/0000-0002-7478-1183
madhumathi.a@vit.ac.in

Mase Noguchi
Ph.D. in Architecture and Sustainable built environment
Associate Professor, Faculty of Architecture, Building and Planning
The University of Melbourne
Melbourne, Australia
https://orcid.org/0000-0003-1437-5455
masa.noguchi@unimelb.edu.au

CC BY SA

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 126 - 141
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.08

ABSTRACT

In India's hot and humid climate, the prevalence of fully glazed multi-story (FGM) office structures results in higher energy use, primarily due to solar heat ingress through their extensive glass surfaces. While external shading is a well-known solution, designers often lack clarity on which shading type and, specifically, which material performs best during the critical early design stages. This study employs a simulation-based comparative framework to evaluate the integration of sustainable textile membranes across three distinct shading configurations: fixed solar screen, fixed diagrid, and dynamic shading. Using a representative, fully glazed, multi-storied office building model located in Chennai, the research employed Autodesk Revit for modeling, E-Quest for energy analysis, and Dynamo for parametric setup to conduct a multi-objective analysis. The procedures involved quantifying annual cooling loads to assess thermal performance, measuring Useful Daylight Illuminance (UDI) to evaluate visual comfort, and performing an Initial investment cost of the integrated shading devices to determine the economic payback period for each system compared to a non-shaded base case. Comparative analysis demonstrates the potential for considerable energy savings across all options. However, findings revealed pronounced disparities and contradictory trends between thermal and visual performance. Notably, the fixed solar screen emerged as the most effective solution, balancing energy reduction with economic viability. The study concludes that material-driven simulations are essential in the early design phase to enable well-informed choices that align sustainability with building performance.

Keywords
energy saving, fully glazed façade, textile membrane shading, dynamic shading, day lighting, hot and humid

RESUMEN

En el clima cálido y húmedo de la India, la prevalencia de edificios de oficinas de varios pisos totalmente acristalados (FGM, por sus siglas en inglés) conduce a un mayor consumo energético, principalmente debido a la ganancia de calor solar a través de sus extensas superficies de vidrio. Aunque el sombreado exterior es una solución reconocida, los diseñadores a menudo carecen de claridad sobre qué tipo de sistema de sombreado y, en particular, qué material ofrece el mejor rendimiento en las etapas críticas del diseño inicial. Este estudio emplea un marco comparativo basado en simulaciones para evaluar la integración de membranas textiles sostenibles en tres configuraciones de sombreado distintas: pantalla solar fija, estructura fija tipo diagrid y sombreado dinámico. Utilizando un modelo representativo de un edificio de oficinas totalmente acristalado y de varios pisos ubicado en Chennai, la investigación empleó Autodesk Revit para el modelado, eQuest para el análisis energético y Dynamo para la configuración paramétrica, con el fin de realizar un análisis multiobjetivo. Los procedimientos incluyeron la cuantificación de las cargas anuales de enfriamiento para evaluar el rendimiento térmico, la medición de la iluminancia útil de luz diurna (UDI, por su sigla en inglés) para evaluar el confort visual, y el análisis del costo inicial de inversión de los dispositivos de sombreado integrados para determinar el período de retorno económico de cada sistema en comparación con un caso base sin sombreado. El análisis comparativo demuestra el potencial de un ahorro energético considerable en todas las opciones. Sin embargo, los resultados revelaron diferencias marcadas y tendencias contradictorias entre el rendimiento térmico y visual. En particular, la pantalla solar fija se mostró como la solución más eficaz, al equilibrar la reducción de la demanda energética con la viabilidad económica. El estudio concluye que las simulaciones orientadas por materiales son esenciales en la fase inicial del diseño para permitir la toma de decisiones bien fundamentadas que alineen la sostenibilidad con el rendimiento del edificio.

Palabras clave
ahorro energético, fachada totalmente acristalada, sombreado con membrana textil, sombreado dinámico, luz diurna, cálido y húmedo

RESUMO

No clima quente e úmido da Índia, a prevalência de edifícios de escritórios de múltiplos pavimentos totalmente envidraçados (FGM, do inglês fully glazed multi-storey) acarreta um maior consumo de energia, sobretudo devido ao ganho de calor solar por meio de suas extensas superfícies de vidro. Embora o sombreamento externo seja uma solução amplamente conhecida, os projetistas frequentemente carecem de clareza quanto ao tipo de sombreamento e, especificamente, ao material com melhor desempenho nas fases iniciais de projeto, que são críticas. Este estudo emprega uma estrutura comparativa baseada em simulação para avaliar a incorporação de membranas têxteis sustentáveis em três configurações distintas de sombreamento: tela de proteção solar fixa, malha diagonal (diagrid) fixa e sombreamento dinâmico. A partir de um modelo representativo de um edifício de escritórios de múltiplos pavimentos totalmente envidraçado localizado em Chennai, a pesquisa utilizou o Autodesk Revit para a modelagem, o eQuest para a análise energética e o Dynamo para a configuração paramétrica, conduzindo uma análise multiobjetivo. Os procedimentos envolveram a quantificação das cargas anuais de resfriamento para avaliar o desempenho térmico, a medição da Iluminância Útil de Luz Natural (UDI, do inglês Useful Daylight Illuminance) para avaliar o conforto visual e o levantamento do custo de investimento inicial dos dispositivos de sombreamento incorporados, a fim de determinar o período de retorno econômico de cada sistema em comparação com um caso base sem sombreamento. A análise comparativa demonstra o potencial de economias de energia consideráveis em todas as alternativas. Contudo, os resultados revelaram disparidades acentuadas e tendências contraditórias entre os desempenhos térmicos e visuais. Destaca-se que a tela de proteção solar fixa mostrou-se a solução mais eficaz, equilibrando a redução do consumo de energia com a viabilidade econômica. O estudo conclui que simulações orientadas pelo material são essenciais na fase inicial de projeto para viabilizar escolhas bem fundamentadas que conciliem sustentabilidade e desempenho da edificação.

Palavras-chave
economia de energia, fachada totalmente envidraçada, sombreamento por membrana têxtil, sombreamento dinâmico, iluminação natural, ambiente quente e úmido.

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 126 - 141
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.08

List of Abbreviations
AES: Annual energy saving per sqmt of office floor area for space cooling
ASE: Annual sun exposure
API: Application programming interface.
BIM: Building information model
DOE-2: USA Department of Energy software for energy use.
ECBC 17: Energy Conservation Building Code, Version 2017
EEM: Energy-efficient measures in E-Quest.
ESD: Exterior shading device
FGM: Fully glazed multi-storied.
GRIHA V19: Green rating for integrated Habitat assessment, version 2019
HVAC: Heating, ventilation, and cooling
IIC: Initial investment cost per m^2 of office area
IT: Information technology
LEED: Leadership in energy and environmental design
P & C: Polygon clipping methods
PTFE: Polytetrafluoroethylene
PES: Polyester yarns
PVC: Polyvinyl Chloride
SCL: Space cooling load
SHGC: Solar heat gain coefficient.
TNEB: Tamil Nadu Electricity Board.
UDI: Useful daylight Illuminance
USD: United States Dollar
VLT: Visual light transmittance
WWR: Window-to-Wall Ratio

INTRODUCTION

Commercial buildings with fully glazed exteriors maximize natural light and contemporary aesthetics but consume more than double the energy of their international counterparts in India due to a lack of climate responsiveness (Naturak Resources Defense Council [NRDC] & Administrative Staff College of India [ASCI], 2014). In Chennai's hot and humid climate (13.0827 N, 80.2707 E), daytime temperatures require year-round, constant air conditioning. Implementing effective exterior shading based on orientation can significantly reduce cooling loads in these highly glazed facades (Chi et al., 2018), proving far more efficient than internal blinds (Arumugam & Ramalingam, 2024). Crucially, 80% of a building's lifecycle energy performance is determined during the early design stage, making the initial integration of material-specific glazing and shading data vital (Hwang & Chen, 2022; Bhatia et al., 2024). Among the alternatives, architectural textile membranes allow for structurally viable, cost-effective, and complex freeform geometries. They protect structures from UV radiation and harsh weather (São João, Carvalho, & Fangueiro, 2016) while their lightness, transparency, and high solar reflectivity minimize solar heat absorption (Tian et al., 2020).

In tropical regions, adaptive sun shading balances visual and thermal efficiency across all seasons. Designing these smart, dynamic systems requires complex cross-disciplinary engineering (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019), as exemplified by Abu Dhabi's Al-Bahar Towers, which use folding, translucent PTFE fabric umbrellas inspired by traditional Mashrabiya. However, current knowledge regarding façade textile membranes remains fragmented, with applications concentrated in the Middle East and rarely implemented in the tropics. This study looks to fill that gap by comparing a solar screen, a diagrid, and a dynamic shading system—all with the latest textile fabric membrane—to determine the highest energy efficiency, optimal visual comfort, and most cost-effective initial investment for fully glazed multi-story office structures in Chennai.

TEXTILE MEMBRANES FOR FAÇADE SOLAR SHADING

Membrane materials are increasingly popular for their aesthetic appeal and practical use as ultra-lightweight wrapping envelopes or façade cladding in building retrofits (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019). These membranes offer environmental efficiency, organic design, high adaptability, semi-transparency, rapid installation, and minimal upkeep. Made by coating high-performance synthetic fibrous structures with novel polymers, these composites exhibit exceptional durability, hydrophobicity, flame/UV resistance, load-bearing capacity, and tear resistance (Nurazzi et al., 2021).

Commonly used for solar protection and architectural envelopes, these diverse mesh designs maintain two-way visibility and create artistic effects on glass structures (Procaccini et al., 2024). They typically consist of woven Polyester (PES) threads coated with polyvinyl chloride (PVC) or glass fiber strands covered with polytetrafluoroethylene (PTFE) or silicone. Available in various hues, strengths, and customizable prints, these fabric screens provide cost-effective, high-performing thermal insulation (Comitti et al., 2024). Glass/PTFE membranes are the most durable, often lasting over 30 years due to weather resistance (Wang et al., 2022), whereas PVC membranes are less resilient, lasting 10–15 years under high UV exposure (São João, Carvalho, & Fangueiro, 2016). Ongoing research is supported by TensiNet (n.d.) and the COST Action TU 1303 initiative (Mollaert et al., 2017).

Serge Ferrari developed Frontside View 381 (Serge Ferrari group, n.d.b), a recyclable PVC-coated PES yarn membrane. It has been used for aesthetics and climate control in renovations like the Hotel Oasis and the 2008 Westraven Building modernization in Utrecht. Lightweight and translucent, these membranes are integrated into kinetic facades to dynamically respond to solar altitude. While available in India, it is primarily used for aesthetics rather than energy efficiency. However, in warmer climates, Frontside View 381 significantly reduces solar heat gain and energy consumption (Ciampi et al., 2022).

This study utilizes Serge Ferrari's Frontside View 381 for both fixed and dynamic shading systems. Existing literature

confirms that dynamic shading has not been evaluated against fixed systems (like diagrid fins and screens) in hot and humid climates. Furthermore, while exterior shading materials significantly affect the performance of highly glazed façades, there is limited data on how dynamic, diagrid, or screen shading influences the energy and daylight performance of glazed buildings in hot and humid climates like Chennai.

METHODOLOGY

This study employs a simulation-based, parametric workflow to evaluate external shading systems for a Fully Glazed Multi-storied (FGM) office building in Chennai's hot–humid climate. The methodology integrates energy analysis, daylight simulation, and computational modeling within a unified digital environment for comparative evaluation.

- Base Model Development

A representative fully glazed office building was modeled in Autodesk Revit based on typical contemporary office typologies (standard floor plates, glazing ratios, occupancy schedules, and material properties). The unshaded building serves as the reference base case. Chennai's Energy Plus Weather (EPW) data was integrated to accurately simulate local solar radiation, temperature, and humidity levels.

- Shading System Modeling

Three external shading typologies were applied to the base façade geometry:

  - Diagrid fins (angled structural members)
  - Solar screen system (perforated textile membranes parallel to the façade)
  - Dynamic shading system (movable kinetic panels with adjustable opening ratios)

To isolate the effects of geometry and operational behavior, all three systems used the same Serge Ferrari Frontside View 381 textile membrane.

- Parametric Control using Dynamo

The dynamic shading configurations were developed parametrically using Dynamo (n.d.) within Revit. Custom scripts calculated solar vectors based on façade orientation, date, and time, enabling the kinetic panels to adjust their opening ratios dynamically in response to real-time solar exposure.

- Energy Simulation

Thermal performance was analyzed using E-Quest. The Revit model was exported and calibrated with identical operational parameters (HVAC setups, occupancy schedules, lighting loads, and glazing characteristics). Annual cooling energy consumption for each system was compared against the base case to calculate the percentage reduction in cooling demand.

- Daylight Analysis

Visual comfort and indoor daylight availability were assessed using Autodesk Insight, specifically measuring Useful Daylight Illuminance (UDI). This step ensured that minimizing solar heat gain did not inadvertently compromise necessary indoor daylight penetration.

- Economic Evaluation & Comparative Framework

Initial investment costs (fabrication, material, and installation) were estimated for each system. Payback periods were then calculated using the simulated annual energy cost savings to assess long-term financial feasibility. To ensure a fair comparison, all simulations used identical boundary conditions and analysis periods, isolating geometry and system behavior as the primary performance variables.

Overall, the methodology combines parametric modeling, performance simulation, and economic analysis to provide a comprehensive evaluation of shading strategies. The integration of tools such as Revit, Dynamo, E-Quest, and Insight enables a replicable and scalable workflow for early-stage design optimization in climate-responsive architecture. The overall methodology flowchart is shown in Figure 1.

RESEARCH CONTEXT

Climatic Context of Chennai, India

Chennai, situated at 13.0827°N latitude and 80.2707°E longitude, has a warm, muggy climate. The city's position on the thermal equator and coastline prevents drastic seasonal temperature fluctuations. The warmest period occurs from late May to early June, with peak temperatures ranging from 37 to 41 °C. January is the coolest time, with temperatures ranging from 19 to 25 °C.

The selected specimen shading membrane

Frontview 381-3109, manufactured by Serge Ferrari group (n.d.a), is a premium PVC-coated polyester fabric with an open structure that is pre-tensioned during coating (S. A. Industries BEC, 2014). Table 1 presents a summary of the manufacturer's technical specifications. The available data on transmission and reflection are based on measurements taken at normal incidence, without considering other angles.

Simulation tools

This study uses swift, straightforward simulation tools during the initial design phase to identify the optimal shading solution. The workflow employs E-quest for energy modeling alongside Revit + Dynamo for geometric construction, illumination analysis, and shadow/incident angle calculations.

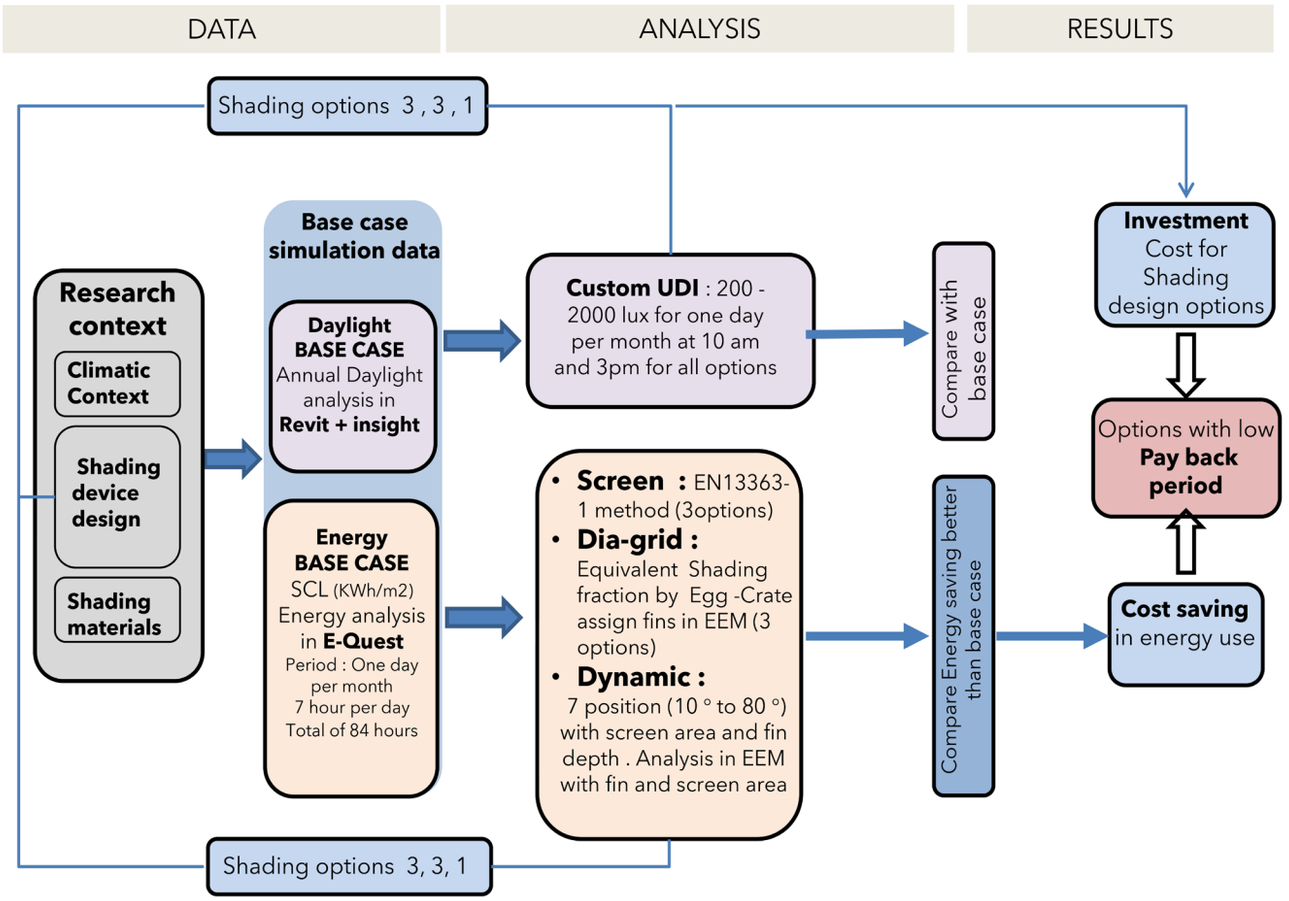


Figure 1. The methodology flow chart. Source: Preparation by the Authors.

Material property	Value / specifications	Image of application	Image of sample
Color	Ash - Blond - 381-3109		
Material	P.V.C. coated polyester		
Yarn	1100 Dtex PET HT		
Weight	600 grams / m^2		
Thickness	1.1 mm		
Tensile Strength (wrap/weft)	330/330 daN/5cm		
Tear resistance (wrap/ weft)	65/65 daN/5cm		
Temperature resistance	- 30 °C to 70 °C		
Flame retardancy	Euroclass B-s2, do/EN 13501-1		
Thermal transmission (Ts) %	29		
Thermal reflection (Rs) %	36		
Thermal Absorption (As) %	35		
Visual transmission (Tv) %	29		

Table 1. Technical specification of Front View 381-3109. Source: Serge Ferrari group, (n.d.b)

- *E-Quest:* Derived from DOE-2, this user-oriented software provides hourly dynamic heat characteristics to analyze building envelope heat transfer, delivering professional-grade results with minimal input (Barozzi et al., 2016). It incorporates Energy Efficiency Measures (EEM) as a sub-simulation of the base model. This study uses the Detailed Design Wizard to calculate the Space Cooling Load (SCL)—the hourly and annual cooling energy (kWh) removed from the cooling coil—which represents a major energy use in hot climates like Chennai.
- *Revit + Insight:* Revit establishes the building geometry, while Insight functions as an integrated plug-in for daylight simulation based on the defined geometry, spaces, location, and components.
- *Dynamo:* Operating as a visual programming application within Revit, Dynamo uses a node-based computational method to encode the design workflow. In this study, shading device geometry is imported into Dynamo to calculate the shading fraction (the percentage of the glazed panel shaded) at specific times and orientations.

DESIGN OF THE SHADING DEVICES

FIXED SOLAR SCREENS

Perforated screens offer visual benefits for minimalist design over projecting fins or louvers. Their effectiveness depends on material, perforation ratio, depth, geometry, and location, with traditional architectural elements further enhancing thermal comfort in hot climates (Alhmoud & Alhmoud, 2024). This study positions a flat screen 20 cm from the glazing plane. The base curtain panel measures 4 m × 2 m, with a floor height of 4 m. The screen covers the top and bottom of the panel, leaving a central viewing gap. The screen area is varied across three configurations: 60%, 80%, and 100% (Figure 2).

FIXED DIAGRID FINS

Diagrids, which emerged in modern steel construction around 2003, use diagonal bracing on framed outer supports (Brake, 2011). This diagonal egg-crate shading system effectively manages daylight harvesting, glare control, and exterior views. This research employs a 4 m × 4 m grid positioned 20 cm from the glazed panel, with fin depths of 400, 500, and 600 mm. Diagonal fins are placed at floor levels and at the center of the panel grid (Figure 3).

DYNAMIC SHADING DEVICE

Dynamic shading systems enhance occupant comfort by adapting to real-time environmental conditions (Sorooshnia et al., 2023). Kinetic rotation and folding mechanisms can reduce cooling and lighting energy

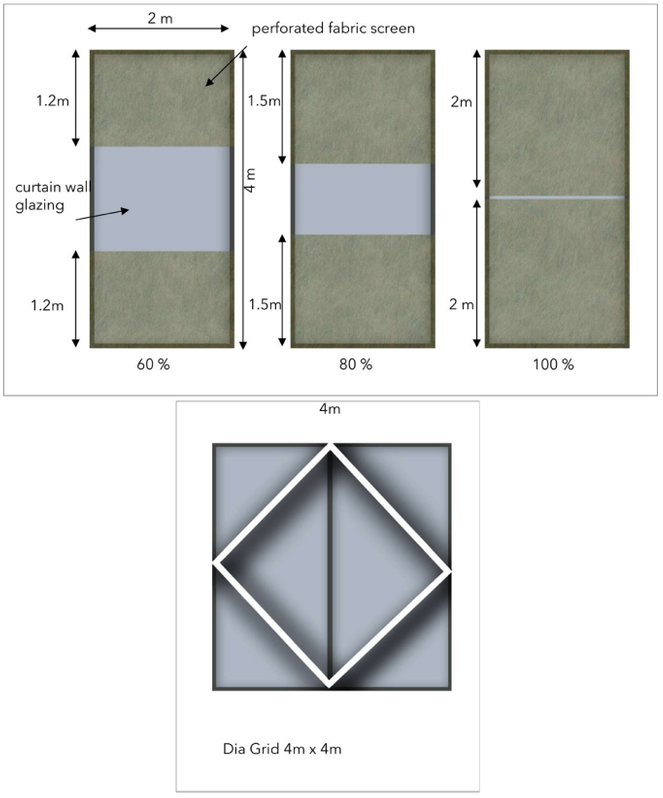


Figure 2. Solar screen options: 60%, 80%, and 100% of the glazing panel area & Diagrid front view. Source: Preparation by the Authors.

demands by 19%–24% in tropical regions (Shi, Tablada & Wang, 2020). This study uses a dynamic solar screen with perforations and an umbrella-type folding mechanism. Operated by a central pneumatic piston, the device extends or retracts in a manner similar to the Al-Bahr Tower system. The 4 m × 4 m panel contains four diagonal arms that fold across seven stages (Figure 3). Modeled via a pattern-based curtain panel family in Revit, the system opens or closes by adjusting the central axis height. The seven operational stages range from 20° to 80° at 10° intervals

ENERGY PERFORMANCE

Annual energy simulations were performed using a standard single-story open-plan office model, consistent with those employed in prior research (Thalfeldt, Kurnitski & Voll, 2015). All three types of shading devices are applied only to East, West, and South orientations. This research did not consider the angle of the fins, the thermal properties of the shading material, or the solar transmittance through the shading material.

ANALYSIS PERIOD

- One day per month: The dates used for simulation are one day per month, the 21st day of every month

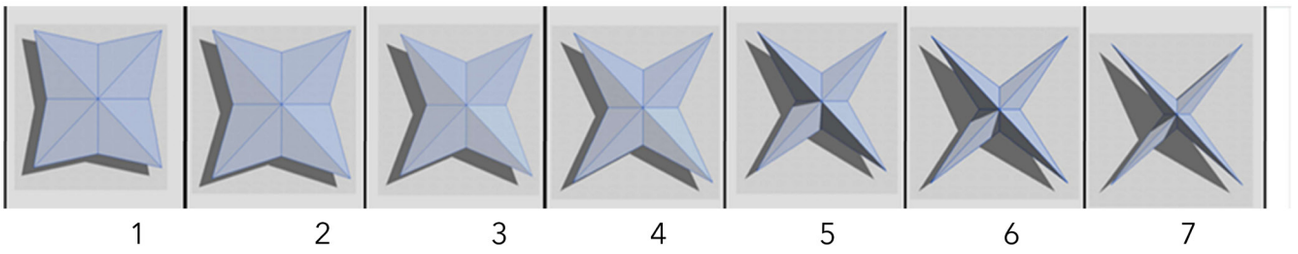


Figure 3. Image of the dynamic shading geometry and 7 folding stages. Source: Preparation by the Authors.

(Coakley, Raftery, & Keane, 2014). As the dynamic shading is based on hourly data, it would be complex to take all days of the year as the analysis days. Data from one day per month is compiled to produce the annual results.

- Shading Analysis Hours: For the influence of the shading design on the energy, this is taken from 10 am to 4 pm, as it is the peak hours for solar radiation on the façade plane.

The covers 12 days at 7 hours per day, totaling 84 hours out of the 2880 daytime hours.

BASE CASE ENERGY MODEL

Based on prior research findings, a shading element is necessary for a typical story in Chennai, where the glazed surface area exceeds 25% of the office floor area (Chockalingam, 2021). The base-case model is created in E-Quest with more than 25% of the office's glazing area. The office building is a rectangular block measuring 30m x 45m, with the longer side facing east/west, and 60 meters in height. The building was created with 15 floors, with a floor-to-floor height of 4m. Simulation was run in the floor-multiplier mode for the mid-floors (between the ground and top floors). The total built area is 13,500 m^2, and the total fully air-conditioned office area is 10,800 m^2. Each standard floor has 1350 m^2, with 1080 m^2 of office area on each floor, four zones per orientation, and a non-air-conditioned core area in the center, as shown in Figure 4.

The following are the assumptions for the energy analysis based on default data and from case studies (Chockalingam, 2021):

- Location & Climate : Chennai & weather data*. E.P.W. file.
- Project North : True North
- Office space planning/activity zones : 50% Open office plan with 25 % cubicles, 10% corridors, 5% lobby, and 10% utilities.
- Floor-to-floor height : 4 meters
- Floor to false ceiling height : 3 meters
- Zoning pattern : perimeter and core
- A/C Zones : office area is 80% air-conditioned, and 20% core area as non- A/C
- Occupancy rate : 12.5 persons per m^2
- Occupancy hours : 9 am to 6 pm & 6 days a week.
- Walls : 150mm A.A. block with no insulation.
- Glazing : single grey-tinted clear 6mm thick in an aluminum framework
- Glazing no 1205 as per DOE glass Library with SHGC : 0.59
- Visual transmittance : 0.43
- WWR % : 95 % in all orientations.

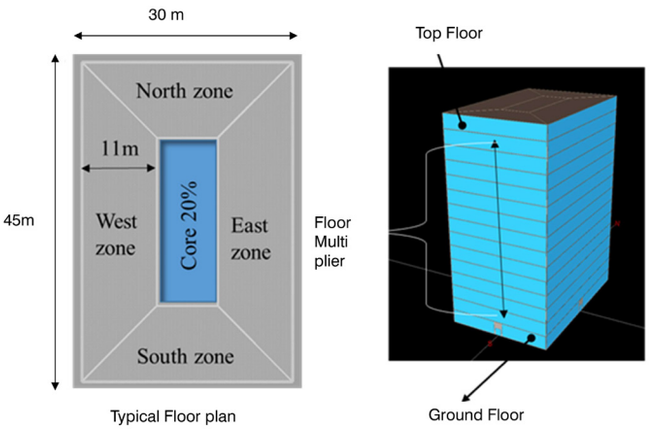


Figure 4: Base case model in E-Quest. Source: Preparation by the Authors.

- Window size : 2m x 4m.
- Lighting load : 1 watt / m^2
- Power load : 2 watts/m^2
- Cooling set point : 23.3 ° C
- HAVC Type : VAV with a chilled water system per floor.
- Supply air temperature : 12 ° C
- Relative Humidity (RH) : 50 %
- Latent Heat gain per person : 58 W
- Sensible heat gain per person : 73W

The energy base-case model is created using a detail design wizard to obtain hourly SCL and EUI results. The simulated results for each hour of the day produce a total of 3,000 hours (9 am to 6 pm, 6 days a week, with SCL density of 96.5 kWh/m^2 and EUI of 219 kWh/m^2).

ENERGY ANALYSIS FOR SOLAR FABRIC SCREEN

EN 13363-1 offers a straightforward approach to revising the SHGC of façade glazing. Laboratory findings demonstrate a reduction in SHGC for specific glazing types when paired with particular solar screens. In E-quest, Energy-Efficient Measure (EEM) façade components are created by incorporating an additional glazing type with

Description	Value	Units
Stg (solar transmittance of glazing)	0.46	
St (solar transmittance of fabric)	0.29	
g (SHGC of glass)	0.59	
Sa (solar absorbance of fabric)	0.35	
Ug - U factor of glazing	1.19	w/m2
G	1.14	w/m2
G2	10	w/m2
G1	5	w/m2
g tot	0.23	
Glazing no. equal to gtot	1403	

Table 2. The EN 13363-1 method for the selected glazing and the revised SHGC value as per the equations. Source: Preparation by the authors.

a lower SHGC value, as determined by the EN13363-1 method (Carletti, Sciurpi, & Pierangioli, 2014). To determine the adjusted SHGC for the chosen single-tinted glass from the DOE glass library, specifically no 1205 (SHGC = 0.59) (Lawrence Berkeley National Laboratory – James J. Hirsch & Associates, 2009), Equation 1 and Equation 2 must be used.

$$g_{tot} = S_{tg} + S_a (G/G_2) + St((1- g)G/G_1)$$

(Equation 1)

Where g_{tot} is the revised SHGC by adding an exterior screen over the glazing, S_{tg} is the Solar transmittance of the glazing, S_t is the solar transmittance value of the screen, S_a is the solar absorbance of the screen, G_1 and G_2 are fixed values defined by the standards, g is the SHGC of the glazing, and G is derived from equation 2.

$$G = (1/Ug)+(1/G_1)+(1/G_2)$$

(Equation 2)

Where U_g is the U-value of the glazing. The area of the solar screen is revised in the base-case model to include another type of glass with an SHGC of 0.23, as per the DOE glass library no. 1405. In the EEM of the E-Quest base case model, the window glazing is replaced with a solar screen (60% screen area), as shown in Figure 2. The 84 hours for the analysis period are compared with the base case in Table 2.

ENERGY ANALYSIS FOR THE DIAGRID SHADING DEVICE

In E-Quest, complex fins like the diagonal egg crate cannot be created. Hence, we have created equivalent horizontal and vertical fins based on the shadow fraction of the diagrid fins. The Dynamo script is used to calculate the shadow area using the P & C method (Murta, 2015) for the Diagrid, as shown in Figure 2, and the equivalent egg-crate fin's depth, as shown in Table 3. In E-Quest, we create window shading using the table and run EEM to get the space cooling energy use.

ENERGY ANALYSIS FOR THE DYNAMIC SHADING DEVICE

The dynamic shading device combines fins and a screen that transforms its shape according to the sun's angle. The Dynamo script calculates the shading panels' sun angle and the corresponding open angle. To simplify, only 7 positions were taken, ranging from 10 ° to 80 ° in 10 ° intervals. Using the geometric calculations from the elevations, we can determine the screen area and fin depth for each step, as shown in Table 5. The calculations for this information are performed over the 84-hour analysis timeframe. For each hour, the base case model is updated with revised specific fin depth and screen area as an EEM simulation. Subsequently, the results from 84 EEM simulations are aggregated and evaluated against the base case for the identical analysis period. Energy savings exceed those with no shading for all types of shading devices, as shown in Figure 6.

As illustrated in Table 4, the computed incidental angle is shown for each hour and orientation on March 21st. Based on this, the dynamic device steps were assigned, and their equivalent WWR % and fin depth were assigned in the EEM runs. For example, at stage one, WWR % is 20, and the fin depth from the shadow area calculation is 400mm, no. 2, as shown in Table 5. And for stage 7, WWR is 80% with a fin depth of 200 mm (no. 2), as shown in Table 4. The Sun's path, the Sun vector, and the incident angle of the dynamic panel calculation

DIAGRID 4m x 4m Simulation Day	Hour	Orientation	Diagrid SF %			Equivalent Fin SF %		
			600	500	400	800	660	520
21 st March	11 am	East	55	47	37	52	44	33
	3 pm	West	42	35	28	40	34	25
	11 am	South	72	60	48	74	62	46
	3 pm	South	72	60	48	82	69	51
21st June	11 am	East	70	59	47	49	41	31
	3 pm	West	49	41	33	35	30	22
21st September	11 am	East	65	54	43	61	52	38
	3 pm	West	37	31	25	35	29	22
	11 am	South	73	61	49	71	66	44
	3 pm	South	73	61	49	88	74	55
21st December	11 am	East	55	46	37	69	58	43
	3 pm	West	37	31	25	45	38	28
	11 am	South	27	22	18	29	24	18
	3 pm	South	24	20	16	32	27	20
TOTAL			751	628	503	762	648	476
Average			53.6	44.9	35.9	54.4	46.3	34.0

Table 3. Table of equivalent H.F. and V.F. depth as per SF% of the Diagrid options. Source: Preparation by the authors.

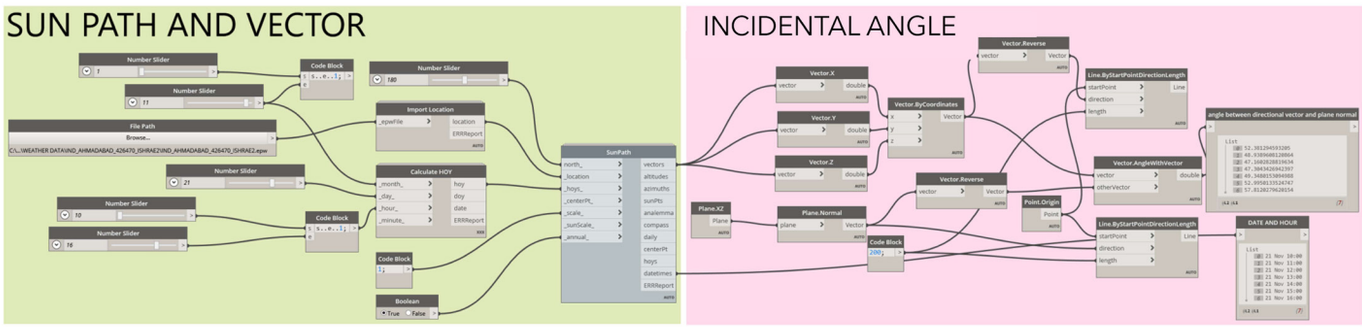


Figure 5. Sun path, sun vector, and the incidental angle of the dynamic panel calculation script in Dynamo. Source: Preparation by the authors.

21st March - orientation	Hour - Dynamic device step number						
	10am	11am	12pm	1pm	2pm	3pm	4pm
East/ West	42	27	0	4	19	24	49
South	17	21	23	23	22	19	15
East/ West	5	3	1	1	2	3	5
South	2	3	3	3	3	2	2

Table 4. Incidental angle on March 21st and its dynamic shading device step no for each hour and orientation. Source: Preparation by the authors.

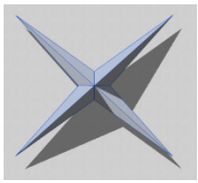
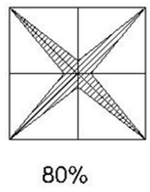
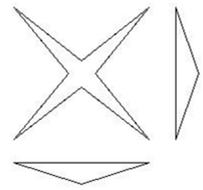
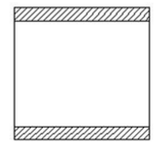
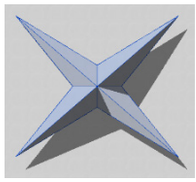
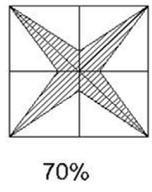
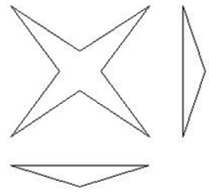
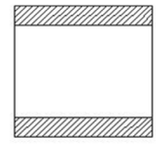
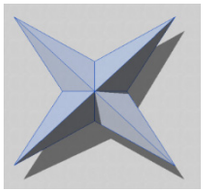
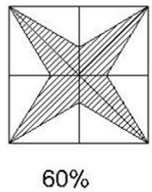
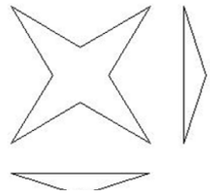
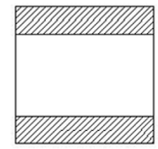
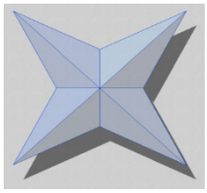
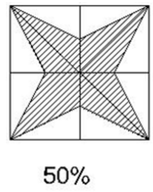
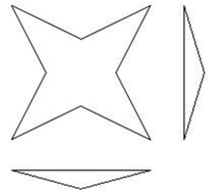
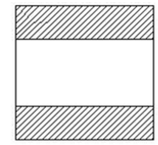
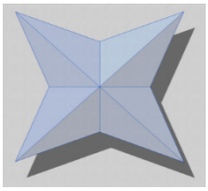
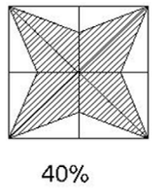
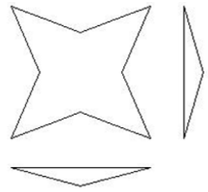
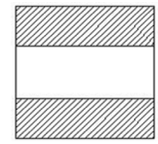
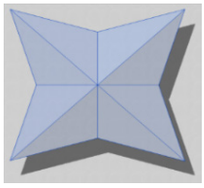
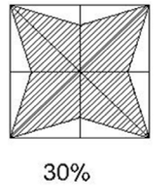
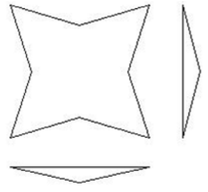
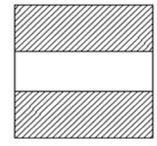
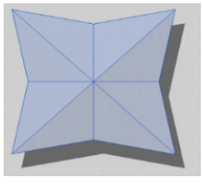
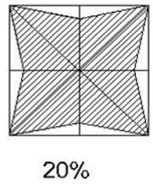
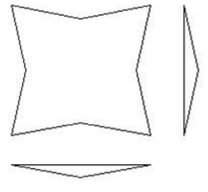
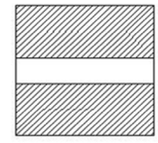
Stage	Image	Description	Values	Plan view	View of the fin area	View of the screen area
1		Stage	8	 80%		
		WWR	20%			
		Projection	650			
		G2	400 x 2			
		HF/VF dep	375			
2		Stage	7	 70%		
		WWR	30%			
		Projection	630			
		G2	600 x 2			
		HF/VF dep	315			
3		Stage	6	 60%		
		WWR	40%			
		Projection	610			
		G2	800 x 2			
		HF/VF dep	305			
4		Stage	5	 50%		
		WWR	50%			
		Projection	575			
		G2	1000 x 2			
		HF/VF dep	287			
5		Stage	4	 40%		
		WWR	60%			
		Projection	532			
		G2	1200 x 2			
		HF/VF dep	266			
6		Stage	3	 30%		
		WWR	70%			
		Projection	475			
		G2	1400 x 2			
		HF/VF dep	237			
7		Stage	2	 20%		
		WWR	80%			
		Projection	400			
		G2	1600 x 2			
		HF/VF dep	200			

Table 5: The 7 steps of the dynamic shading device and its respective fin depth and percentage of screen area for E-Quest E.E.M. runs. Source: Preparation by the authors.

script in Dynamo are shown in Figure 5.

OBSERVATIONS

1. The energy saved by the solar screen is the highest for the shading devices, followed by the Dynamic and the Diagrid options, as shown in Figure 6
2. The solar screen's energy saving of 60% of the glazed area is almost equal to the dynamic shading at 50% of the glazed area, as shown in Figure 6
3. The increased energy saving is greater with the screen area than with the Diagrid fin depth, as shown in Figure 6.

DAYLIGHT PERFORMANCE

Annual daylight analyses were conducted using an open-plan office model for each shading device type. The visual and optical properties of the fabric were specified in the Revit model, with a visible light transmittance (VLT) of 29%. Daylight analysis was conducted using the Insight plugin Lighting Analysis for Revit. The Useful Daylight Illuminance (UDI) was employed as the metric; the analysis was performed on the 21st day of each month (García-Martín et al., 2025), as dynamic shading uses hourly data. Shading performance was evaluated at 10 am and 3 pm (Ahmed, 2021)–10 am for the east, 3 pm for the west, and both times for the south orientations. The analysis adhered to a threshold range of 200-2000 lux per ECBC (NRDC & ASCI, 2017), encompassing 24 hours of the total 2880 occupancy hours.

BASE CASE DAYLIGHTING MODEL

The base-case geometry was developed in Revit, incorporating shading-device options for each floor. The simulation assumptions are as follows:

- No window coverings or interior partitions are present.
- Reflectivity is set at 80% for ceilings, 20% for floors, and 50% for walls
- Glazing is specified as no 1205 from the D.O.E. glass library, with a visual transmittance of 0.43
- The analysis plane is positioned at 0.8 meters, with a grid size of 0.6 x 0.6 meters
- Analyses are conducted at 10 am and 3 pm
- The shading fabric has a visual light transmittance (VLT) of 0.29 and an optical reflectance of 30%
- The sky component is based on annual weather data from Chennai

Twelve analyses are conducted one day per month at 10 am and 3 pm, with the results averaged and presented in Figure 7.

OBSERVATIONS

1. The Diagrid configuration demonstrates superior performance, as shown in Figure 7.

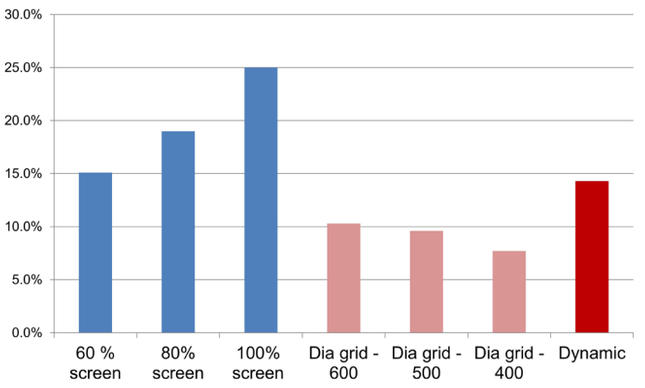


Figure 6. Energy-saving is better than no shading at all with the types of shading devices. Source: Preparation by the authors.

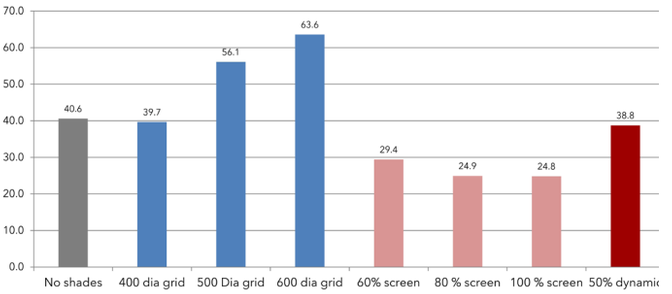


Figure 7. Daylight analysis by a custom range of 200-2000 lux for the percentage of the usable floor area at 9 am and 3 pm . Source: Preparation by the authors.

2. The solar screen performs below the no-shade baseline, while dynamic shading achieves results equivalent to the no- shade condition as shown in Figure 7.
3. Shading effectively controls glare above the 2000 lux threshold, outperforming the no-shade scenario as shown in Figure 7.

PAYBACK PERIOD

The payback period is an efficient method for evaluating the economic feasibility of solutions at the initial design stages (Malatji et al., 2013; Chidiac et al., 2011). It represents the time needed for an initiative to recover its initial investment through cost reductions. This research shows that only energy conservation for space cooling exceeds the baseline scenario. The payback period calculation accounts for the shading device's initial investment cost, as determined by the case study data and Equation 3.

$$Pb = IIC - Ofa / AES\text{-}Ofa \quad \text{(Equation 3)}$$

Shading device options	cost per panel	ICC for one floor in the east, west, and south facades, area of 600 m2	ICC cost per office floor area in R/ m2	ASE per m2 of office area kWh/ m2/year	Payback period in years
400 Diagrid	36250	978750	725	63.2	11.48
500 Diagrid	41650	1124550	833	78.7	10.58
600 Diagrid	46600	1258200	932	84.5	11.03
60% screen	20800	561600	416	123.9	3.36
80 % screen	26400	712800	528	155.8	3.39
100 % screen	32000	864000	640	205.1	3.12
Dynamic	98000	2646000	1960	117.3	16.71

Table 6: Cost of shading panel in USD with installation and other costs per m2 of office floor, and its energy-saving cost. Source: Preparation by the authors.

Where Pb = Payback period, IIC-Ofa = initial investment cost per sqmt of office floor area for the retrofit options, AES-Ofa = annual energy saving per sqmt of office floor area for space cooling. The initial investment costs were based on the Indian national average trade prices and Chennai building practitioners. The shading device costs per m^2 of façade area (Table 6) use a $1 = □78 conversion rate (IRS, 2022). This cost, multiplied by the façade area and divided by the office area, gives the IIC per option. Using the TNEB commercial rate of Rs. 8.5/kWh (Tamil Nadu Electricity Regulatory Commission [TNERC], 2017), annual space cooling energy savings per m^2 are calculated. Figure 8 shows the payback period for all options based on energy savings and investment costs.

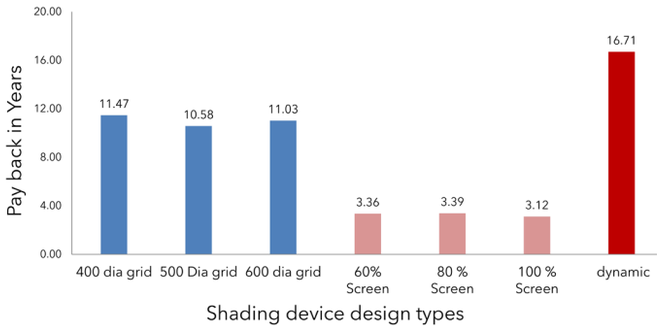


Figure 8. Payback period in years for all the selected shading device types. Source: Preparation by the authors.

RESULTS AND DISCUSSION

The findings indicate that the efficacy of external shading systems in hot–humid climates is influenced not solely by the presence of shading but also by the interplay among material properties, geometric configuration, and operational behavior. Previous research has underscored the environmental advantages of textile membranes, notably their lightweight nature, high solar reflectance, adaptability, and semi-transparent characteristics (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019; Nurazzi et al., 2021). This study advances understanding by quantitatively comparing fixed solar screens, dynamic shading systems, and diagrid shading, using the same Serge Ferrari Frontside View 381 membrane material in the climatic context of Chennai. By maintaining material consistency, the study isolates the impact of shading typology and system behavior on cooling-energy performance.

Among the three typologies examined, the solar screen system achieved the most significant reduction in cooling energy demand, approximately 25%. This finding corroborates earlier research by Ciampi et al. (2022), which identified Frontside View 381 fabric shades as highly effective in mitigating solar heat gain in warm climates. However, this study advances the literature by demonstrating that membrane performance is enhanced when integrated with a continuous, uniformly distributed screen geometry. The results also align with Kirimtat & Manioğlu (2024), who contend that static perforated skins can surpass more complex adaptive systems in tropical latitudes due to their consistent protection against high-angle solar radiation. Thus, the study suggests that in hot–humid climates, climatic responsiveness and geometric stability may be more influential than technological sophistication. Furthermore, the relatively low cost and

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 126 - 141
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.08

shorter payback period enhance the feasibility of fixed shading systems for large-scale commercial applications.

The material-based simulation approach also highlights the importance of the textile membrane's high solar reflectance in minimizing surface heat absorption compared to conventional high-thermal-mass materials such as concrete or aluminum. However, because all three shading systems employed the same membrane material, the variation in energy performance is primarily attributable to differences in geometric configuration and system behavior. This demonstrates that façade form should be understood as an active environmental parameter rather than merely an aesthetic decision.

The dynamic shading system achieved a moderate reduction in cooling energy consumption, approximately 15%. Existing literature frequently highlights the adaptability and responsiveness of kinetic façades and textile-based movable systems (Gonçalves et al., 2024). However, the present findings indicate that adaptive capability does not necessarily equate to enhanced energy efficiency in tropical climates. Although the system effectively responded to changing solar conditions, its overall performance was inferior to that of the fixed screen due to inconsistent shading coverage and increased operational complexity. This finding addresses a significant gap identified in the literature review, in which dynamic membrane shading systems had not previously been evaluated relative to fixed systems in hot–humid climates.

Conversely, the diagrid shading system achieved energy savings of less than 10%, indicating that increased openness and visual permeability may reduce thermal performance. While previous research has emphasized the aesthetic and visual potential of textile façades (Procaccini et al., 2024), the present study elucidates the trade-off between daylight access, outward visibility, and cooling-load reduction. Although less thermally effective, the system facilitates greater daylight penetration and outward views, aligning with architectural priorities regarding occupant experience and spatial quality (Sawyer et al., 2022). Overall, the study suggests that fixed solar screen systems offer the most balanced solution for hot–humid office buildings by integrating thermal efficiency, economic feasibility, and indoor environmental quality. More importantly, the findings advance climate-responsive façade research by challenging the assumption that complex adaptive technologies invariably surpass passive design strategies.

CONCLUSION

This study emphasizes the essential role of incorporating shading system design at the initial stages of architectural development, particularly for fully glazed, air-conditioned office buildings in hot–humid climates such as Chennai. The findings indicate that early-stage decisions significantly impact cooling energy demand, underscoring the necessity for performance-driven design approaches rather than post-design optimization. By employing a parametric computational framework, the research systematically assessed multiple external shading strategies using textile membrane materials. Among the evaluated options, the perforated solar screen positioned parallel to the glazed façade proved to be the most effective solution, offering an optimal balance between energy efficiency, daylight performance, and economic feasibility. In contrast, while dynamic shading systems provide adaptive control, their high initial capital cost, system complexity, and extended payback periods limit their practical applicability in developing economies such as India.

The study contributes to the field by introducing a material-based simulation methodology that enables consistent comparisons across different shading typologies using the same textile membrane material. This approach isolates the influence of geometry and system behavior, thereby providing clearer insights into performance outcomes. The results confirm that well-designed solar shading can significantly reduce energy consumption while maintaining adequate daylighting and visual comfort, all with relatively low investment costs. However, the scope of this research is limited to specific textile membrane materials, three façade orientations, and three shading device types, with a primary focus on controlling direct solar radiation on glazed surfaces. Future research should expand this framework to include a wider range of materials, alternative geometrical configurations, additional climatic variables, and integrated performance parameters such as ventilation and embodied energy. Overall, the study highlights the substantial potential of textile membrane façade systems as a sustainable and cost-effective strategy for reducing building energy consumption. It establishes a foundation for further exploration of membrane-based shading solutions, contributing to the advancement of climate-responsive and performance-driven architectural design.

AUTHOR CONTRIBUTION CRediT

Conceptualization: C.C.; Data Curation: C.C.; Formal Analysis: C.C.; Investigation: C.C.; Methodology: C.C.; Project Administration: C.C.; Resources: A.M.; Software: C.C.; Supervision: C.C.; Validation: A.M.; Visualization: A.M.; Writing – Original Draft: A.S.K.S.; Writing – Review & Editing: N.M.; Writing – Revision & Editing: M.N.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the anonymous reviewers for their constructive comments that helped improve the manuscript. The authors received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

Ahmed, E.B. (2021). Utilizing dynamic shading system to achieve daylight performance according to LEED standards V.4: case study, university classrooms in Egypt. *HBRC Journal, 17*(1), 177-200. http://doi.org/10.1080/16874048.2021.1920138

Alhmoud, S.H., & Alhmoud, H.H. (2024). Analysis of thermal comfort techniques for the performance conserving of buildings and interior spaces. *International journal of sustainable development & planning*, *19*(11), 4193-4201. https://doi.org/10.18280/ijsdp.191109

Al-Masrani, S.M., & Al-Obaidi, K. M. (2019). Dynamic shading systems: A review of design parameters, platforms and evaluation strategies. *Automation in construction*, *102*, 195-216. http://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.014

Arumugam, P., & Ramalingam, V. (2024). Thermal comfort enhancement of office buildings located under warm and humid climate through phase change material and insulation coupled with natural ventilation. *Sustainable energy technologies and assessments*, *63*, 103657. http://doi.org/10.1016/J.SETA.2024.103657

Barozzi, M, Lienhard, J., Zanelli, A., & Monticelli, C. (2016). The Sustainability of Adaptive Envelopes: Developments of Kinetic Architecture. *Procedia Engineering, 155*, 275-284. http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.029

Bhatia, A., Dontu, S., Garg, V., & Singh, R. (2024). Approach for energy efficient building design during early phase of design process. *Energy Informatics*, *7*(1), 122. https://doi.org/10.1186/s42162-024-00426-z

Brake, T. M. (2011). *Understanding Steel Design: An Architectural Design Manual.* Birkhäuser

Carletti, C., Sciurpi, F., & Pierangioli, L. (2014). The Energy Upgrading of Existing Buildings: Window and Shading Device Typologies for Energy Efficiency Refurbishment. *Sustainability*, *6*(8), 5354-5377. https://doi.org/10.3390/su6085354

Chockalingam, C. (2021). Envelope Performance Analysis of Office Buildings in Warm and Humid Climate: From Case Studies of Multi-storied Office Buildings in Chennai. In K. Thirumaran, G. Balaji, N.D. Prasad (eds) *Sustainable Urban Architecture* (vol. 114). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9585-1

Chi, D. A., Moreno, D., & Navarro, J. (2018). Impact of perforated solar screens on daylight availability and low energy use in offices. *Advances in Building Energy Research, 15*(1), 117–141. https://doi.org/10.1080/17512549.2018.1550439

Chidiac, S.E., Catania, E.J.C., Morofsky, E. & Foo, S. (2011). Effectiveness of single and multiple energy retrofit measures on the energy consumption of office buildings. Energy, 36(8), 5037-5052. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.05.050

Ciampi, G., Spanodimitriou, Y., Nocente, A., Scorpio, M., & Sibilio, S. (2022). Energy performances of tensile material in building renovation in the Nordic region. *E3S Web of Conferences, 362,* 05003. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236205003

Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 37,* 123–141. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007

Comitti, A., Vijayakumaran, H., Nejabatmeimandi, M. H., Seixas, L., Cabello, A., Misseroni, D., Penesa, M., Paech, C., Bessa, M., Bown, A.C. Dal Corso, F., & Bosi, F. (2024). Ultralight membrane structures toward a sustainable environment. In A. Bahrami (eds) *Estructuras y edificios sostenibles* (pp. 17-37). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46688-5_2

Dynamo. (n.d.). Dynamo forum. http://dynamobim.com

García-Martín, G., Campano, M. Á., Acosta, I., & Bustamante, P. (2025). New approaches in dynamic metrics for lighting control systems: A critical review. *Applied sciences*, *15*(15), 8243. https://doi.org/10.3390/app15158243

Gonçalves, M., Figueiredo, A., Almeida, R.M.S.F., & Vicente, R. (2024). Dynamic façades in buildings: A systematic review across thermal comfort, energy efficiency and daylight performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 199*, 114474. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114474

Hwang, R.-L., & Chen, W.-A. (2022). Creating glazed facades performance map based on energy and thermal comfort perspective for office building design strategies in Asian hot-humid climate zone. *Applied Energy, 311*, 118689 https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118689

IRS (2022). Yearly average exchange rates for Indian Rupee to US $. https://www.irs.gov/individuals/international-taxpayers/yearly-average-currency-exchange-rates

Kirimtat, A., & Manioğlu, G. (2024). A simulation-based performance evaluation of new generation dynamic shading devices with multi-objective optimization. *Journal of Building Engineering, 90,* 109322. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109322

Lawrence Berkeley National Laboratory – James J. Hirsch & Associates. (2009). DOE- 2.2 Building Energy Use and Cost Analysis Program. Volume 4: Libraries & Report. March 2009. James J. Hirsch

Malatji, E.M., Zhang, J., & Xia, X. (2013). A multiple objective optimisation model for building energy efficiency investment decision. *Energy and Buildings, 61,* 81–87. http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.042

Mollaert, M. & De Laet, L. (2017). Novel Structural Skins: Improving sustainability and efficiency through new structural textile materials and designs – COST Action. *Impact, 2017*(5), 46-48. http://doi.org/10.21820/23987073.2017.5.46

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 126 - 141
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.08

Murta, A. (2015). *GPC: General Polygon Clipper library, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1512.006.* SciX Transition Resource. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015ascl.soft12006M

Natural Resources Defense Council [NRDC] & Administrative Staff College of India [ASCI]. (2014). *Transforming Cities: Building Efficiency Lessons from Hyderabad*. https://tgredco.telangana.gov.in/PDFs/ECBC/6_Transforming_Cities_Building_Efficiency_Lessons.pdf

Nurazzi, N.M., Asyraf, M.R.M., Khalina, A., Abdullah, N., Aisyah, H.A., Rafiqah, S.A., Sabaruddin, F.A., Kamarudin, S.H., Norrrahim, M.N.F., Ilyas, R.A., & Sapuan, S.M. (2021). A Review on Natural Fiber-Reinforced Polymer Composite for Bullet Proof and Ballistic Applications. *Polymers*, *13*(4), 646. https://doi.org/10.3390/polym13040646

Procaccini, G., Prieto, A., Knaack, U., Monticelli, C., & Konstantinou, T. (2024). Textile membrane for façade retrofitting: exploring fabric potentialities for the development of innovative strategies. *Buildings*, *14*(1), 86. http://doi.org/10.3390/buildings14010086

S. A. Industries BEC, (2014). *Stamisol FT 381*. http://www.bec.es/en/fabrics-for-curtains-blinds-screens-and-textil-architecture/textile-meshes/stamisol-ft-381

São João, L., Carvalho, R., & Fangueiro, R. (2016). A Study on the Durability Properties of Textile Membranes for Architectural Purposes. *Procedia Engineering,* 155, 230-237. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.024

Sawyer, A. O., Navvab, M., Weissman, D., & Guanzhou, J. (2022). Facade photometry: Linking annual daylight performance to facade design. *Buildings, 12*(10), 1556. https://doi.org/10.3390/buildings12101556

Serge Ferrari group. (n.d.a) Projects Serge Ferrari.https://www.sergeferrari.com/us-en/references/largest-textile-facade-netherlands-serge-ferrari

Serge Ferrari group. (n.d.b). Tenseo. Frontiside 381. https://www.sergeferrari.com/en-nz/productsfrontside-range/frontside-view-381

Shi, X., Tablada, A., & Wang, L. (2020). Influence of two motion types on solar transmittance and daylight performance of dynamic façades. *Solar Energy, 201*, 561-580. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.017

Sorooshnia, E., Rahnamayiezekavat, P., Rashidi, M., Sadeghi, M., & Samali, B. (2023). Passive intelligent kinetic external dynamic shade design for improving indoor comfort and minimizing energy consumption. *Buildings*, *13*(4), 1090. https://doi.org/10.3390/buildings13041090

TensiNet. (n.d.). https://www.tensinet.com/index.php

Thalfeldt, M., Kurnitski, J. & Voll, H. (2015). Comparison of Simplified and Detailed Window Models in Office Building Energy Simulations. Energy Procedia, 78, 2076-2081. http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.235

Tian, G-J., Fan, Y-S., Zhang, X., Wang, H., Xie, W., & Peng, K. (2020). Analysis of solar radiation heat transfer of architectural fabric membrane material. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15. https://doi.org/10.1177/1558925020911005

Tamil Nadu Electricity Regulatory Commission [TNERC]. (2017). Determination of Tariff for Generation and
Distribution. Order in T.P. No.1 of 2017 DT:11.08.2017. Government of Tamilnadu. https://tecaonline.in/pdfupload/Files/TNERC%20Tariff%20Order-TANGEDCO%20dtd-11-08-2017.pdf

Wang, J., Huang, X., Wang, W., Han, H., Duan, H., Yu, S., & Zhu, M. (2022). Effects of PTFE coating modification on tribological properties of PTFE/aramid self-lubricating fabric composite. Materials Research Express, 9(5), 055302. http://doi.org/10.1088/2053-1591/ac587a

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 142 - 155
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.09

Recibido 28/01/2026
Aceptado 27/06/2026

HERMETICIDAD AL AIRE DE VIVIENDAS PRECARIAS EN BARRIOS INFORMALES DE LIMA, PERÚ

AIR TIGHTNESS OF PRECARIOUS HOUSING IN INFORMAL SETTLEMENTS IN LIMA, PERU

HERMETICIDADE AO AR DE HABITAÇÕES PRECÁRIAS EM ASSENTAMENTOS INFORMAIS DE LIMA, PERU

Martín Wieser
Doctor en Arquitectura
Docente investigador, Departamento de Arquitectura
Pontificia Universidad Católica del Perú
Lima, Perú
https://orcid.org/0000-0002-4556-3507
mwieser@pucp.edu.pe

Ronald Mas
Doctor en Ingeniería
Docente investigador, Departamento de Ingeniería
Pontificia Universidad Católica del Perú
Lima, Perú
https://orcid.org/0000-0003-1507-462X
rmas@pucp.edu.pe

Enrique Barrantes
Magíster en Ingeniería
Docente investigador, Departamento de Ingeniería
Pontificia Universidad Católica del Perú
Lima, Perú
https://orcid.org/0000-0002-9037-3358
ebarran@pucp.edu.pe

Enrique Mejía-Solis
Magíster en Ingeniería
Docente investigador, Departamento de Ingeniería
Pontificia Universidad Católica del Perú
Lima, Perú
https://orcid.org/0000-0002-5512-1286
enrique.mejia@pucp.edu.pe

Alessandra Gonzales
Bachiller en Arquitectura
Asistente de investigación, Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Pontificia Universidad Católica del Perú
Lima, Perú
https://orcid.org/0009-0004-5184-1907
a20201689@pucp.edu.pe

Jimena Valdivia
Bachiller en Arquitectura
Asistente de investigación, Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Pontificia Universidad Católica del Perú
Lima, Perú
https://orcid.org/0009-0007-5170-5245
a20200320@pucp.edu.pe

Luis-Ricardo Chirinos-García
Doctor en Ciencias Ambientales
Docente investigador, Departamento de Ingeniería
Pontificia Universidad Católica del Perú
Lima, Perú
https://orcid.org/0000-0002-5620-3312
lchirin@pucp.edu.pe

CC BY SA

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 142 - 155
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.09

RESUMEN

El nivel de hermeticidad al aire de una vivienda influye directamente en las condiciones térmicas, acústicas y de salubridad que se presentan en su interior. Ante la ausencia de estudios que abordan el tema en el ámbito local, la presente investigación tuvo como objetivo identificar el valor y los factores que condicionan el nivel de hermeticidad de viviendas precarias construidas en barrios informales de la ciudad de Lima. Mediante el método de 'puerta sopladora', se realizaron mediciones en cinco viviendas que evidenciaron tasas de renovación de aire de entre 280 y 40 ACH (renovaciones de aire por hora) a una presión diferencial de 50 pascales, valores considerablemente altos que reflejan la baja hermeticidad de estas viviendas. Estos hallazgos constituyen una primera aproximación empírica a la hermeticidad al aire en viviendas precarias, al aportar datos preliminares útiles para el análisis del confort térmico en contextos de alta vulnerabilidad urbana.

Palabras clave
construcción en pendiente, desarrollo sustentable, termodinámica

ABSTRACT

The level of air tightness in a dwelling directly affects its thermal, acoustic, and health-related conditions. Due to the lack of studies providing such data at a local level, this research aimed to determine both the values and the contributing factors that condition the level of air tightness in precarious housing built in informal settlements in Lima. Using the blower door method, measurements were conducted in five dwellings, revealing air change rates between 40 and 280 ACH (Air Changes per Hour) at a differential pressure of 50 pascals, which are remarkably high and indicate poor airtightness. These findings constitute the first empirical approach to airtightness in precarious housing, providing preliminary data useful for analyzing thermal comfort in contexts of high urban vulnerability.

Keywords
sloping construction, sustainable development, thermodynamics

RESUMO

O nível de hermeticidade ao ar de uma habitação influencia diretamente as condições térmicas, acústicas e de salubridade que se apresentam em seu interior. Diante da ausência de estudos que abordem o tema no âmbito local, a presente pesquisa teve como objetivo identificar o valor e os fatores que condicionam o nível de hermeticidade de habitações precárias construídas em assentamentos informais da cidade de Lima. Por meio do método da "porta ventiladora" (blower door), realizaram-se medições em cinco habitações, que evidenciaram taxas de renovação de ar entre 280 e 40 ACH (renovações de ar por hora) a uma pressão diferencial de 50 pascals — valores consideravelmente elevados, que refletem a baixa hermeticidade dessas edificações. Estes resultados constituem uma primeira abordagem empírica sobre a hermeticidade ao ar em habitações precárias, ao fornecerem dados preliminares úteis para a análise do conforto térmico em contextos de alta vulnerabilidade urbana.

Palavras-chave
construção em encosta, desenvolvimento sustentável, termodinâmica

INTRODUCCIÓN

La hermeticidad al aire constituye una propiedad clave en el desempeño energético y ambiental de los edificios, al estar directamente relacionada con las infiltraciones no controladas de aire entre el ambiente exterior e interior. Esta característica incide de forma significativa en el consumo energético, el confort térmico y la calidad del aire interior. Una elevada hermeticidad permite minimizar los flujos de aire no deseados, reduciendo las pérdidas energéticas asociadas a calefacción o refrigeración (Ambrosio Alfano et al., 2012). Asimismo, las corrientes de aire y las diferencias de temperatura generadas por estas infiltraciones pueden provocar disconfort térmico local en los ocupantes (Kalamees, 2007). Por otro lado, el ingreso de aire exterior producto de estas infiltraciones puede afectar negativamente la calidad del aire interior, al no estar sujeto a los procesos de filtrado y control propios de los sistemas de ventilación mecánica (Buonanno, Morawska & Stabile, 2009).

ESTUDIOS SOBRE HERMETICIDAD AL AIRE DE EDIFICACIONES

Los primeros estudios sobre hermeticidad al aire en edificaciones destacaron la relevancia de controlar las infiltraciones como parte del diseño eficiente de los edificios. Hutcheon (1953) fue uno de los pioneros en resaltar la necesidad de limitar el flujo de aire no deseado a través de la envolvente. A partir de la crisis energética de los años setenta, la hermeticidad adquirió un papel más relevante, en particular por su potencial para reducir las pérdidas de calor en invierno y, por ende, el consumo energético asociado a la calefacción (Etheridge, 2015).

En 1998, en Alemania se establecieron los primeros valores límite de hermeticidad al aire, a través de la norma DIN V 4108-7, que fijaba un máximo de 3.5 cambios de aire por hora (ACH) para edificios con ventilación natural y 1.5 ACH para aquellos con ventilación mecánica (Guyot, Schild & Carrié, 2010). Paralelamente, en Estados Unidos, la normativa ASHRAE incluía procedimientos para evaluar la hermeticidad mediante la prueba de presurización con 'puerta sopladora' (blower door test). Esta normativa también clasificaba los niveles de hermeticidad en viviendas: 2 ACH se consideraba un valor excelente, 5 ACH representaba un nivel medio, 10 ACH un valor común, y por encima de los 20 ACH se catalogaba como una vivienda con baja hermeticidad; todo ello evaluado bajo una presión diferencial estándar de 50 Pa (Persily, 1998).

En las últimas décadas, en los países industrializados, el control de la hermeticidad ha cobrado una creciente relevancia, impulsado principalmente por la necesidad de reducir el consumo energético, tanto por motivos económicos como ambientales (Zheng et al., 2019). En el caso particular de edificios residenciales, los valores típicos de hermeticidad, medidos bajo una presión diferencial de 50 Pa, oscilan actualmente entre 1 y 3 ACH, dependiendo del tipo de ventilación, natural o mecánica (Poza-Casado et al., 2020). En este contexto, algunas certificaciones de alto rendimiento energético, como Passivhaus en Alemania y Minergie en Suiza, establecen criterios aún más estrictos, que exigen valores de hermeticidad inferiores a 0.6 ACH.

Por el contrario, en el sur global, el enfoque hacia la hermeticidad ha estado más relacionado con la necesidad de construir refugios habitables y reducir los riesgos para la salud (Kulshreshtha, Khare & Seetharaman, 2008; Lambert et al., 2023). Una ventilación inadecuada puede conducir a elevadas concentraciones de partículas, gases contaminantes como CO, SO_2 y NO_2, así como compuestos tóxicos emitidos por estufas y sistemas de cocción, lo que incrementa la incidencia de enfermedades respiratorias (Kulshreshtha et al., 2008). Además, la falta de control sobre la ventilación puede favorecer la proliferación de moho, un problema especialmente prevalente en viviendas de bajos ingresos (Choi et al., 2020). En general, las condiciones de ventilación no suelen ser una prioridad en el diseño de viviendas informales, lo que expone a sus ocupantes a riesgos sanitarios tanto por ventilación insuficiente como por ventilación excesiva no controlada.

A pesar de las diferencias en las prioridades regionales, en el sur global también se han llevado a cabo estudios experimentales sobre hermeticidad mediante el método de presurización con 'puerta sopladora'. Se evaluaron 189 viviendas en distintas zonas climáticas de Chile, obteniendo una hermeticidad media de 12.9 ACH a 50 Pa (Bobadilla et al., 2014). En dicho estudio los edificios de construcción ligera en madera resultaron ser los menos herméticos (24.6 ACH), mientras que las edificaciones masivas de hormigón mostraron mayor hermeticidad (9 ACH). A partir de estos resultados, Chile actualizó su "Reglamentación Térmica" en noviembre de 2025, estableciendo límites de hermeticidad que varían entre 4 y 8 ACH a 50 Pa, según la zona bioclimática. Por otra parte, en Uruguay se analizaron edificaciones de mampostería tradicional pesada (cerámica cocida), reportándose valores para dos viviendas de 3.5 y 5.2 ACH a 50 Pa (Rodríguez Muñoz et al., 2020). Estos resultados son comparables con estudios europeos realizados en diversas tipologías y materiales: en Estonia, se reportó una media de 4.9 ACH en viviendas unifamiliares aisladas de construcción ligera con marcos de madera (Kalamees, 2007); en Lituania, un promedio de 4.73 ACH en casas unifamiliares construidas con ladrillos o bloques de mampostería (Sfakianaki et al., 2008); y en Grecia, un valor de 7.0 ACH en viviendas unifamiliares de piedra, hormigón y ladrillo (Šadauskienė et al., 2016). Finalmente, en tipologías multifamiliares de mampostería, se han registrado promedios de 7.26 ACH en departamentos en España (Feijó-Muñoz et al., 2018) y 6.25 ACH en un departamento de hormigón y ladrillo en Montenegro (Tombarević, Vušanović & Šekularac, 2023).

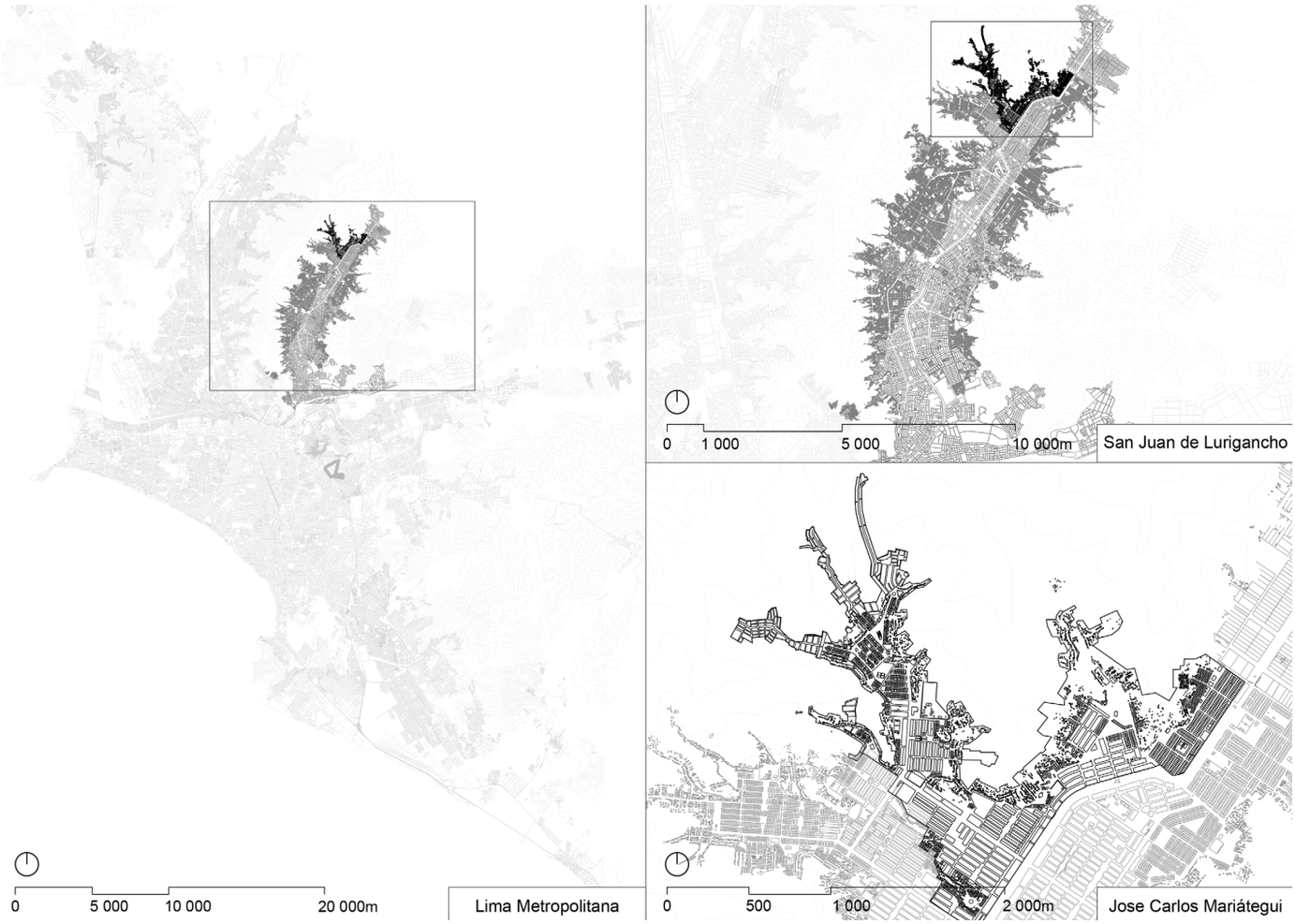


Figura 1. Ubicación del barrio de José Carlos Mariátegui en el distrito de San Juan de Lurigancho de la ciudad de Lima. Fuente: Elaboración de los Autores.

En el presente estudio se realizaron mediciones de hermeticidad mediante el método de presurización con puerta sopladora en viviendas informales construidas con recursos limitados, ubicadas en una zona periurbana de la ciudad de Lima, Perú. De acuerdo con nuestra revisión de la literatura, no se han identificado estudios previos que apliquen esta técnica en viviendas con características similares. Este trabajo busca abordar dicho vacío mediante la exploración de la hermeticidad en edificaciones no convencionales. La importancia de generar esta evidencia radica en que, al proporcionar datos empíricos iniciales sobre infiltraciones en contextos de precariedad, se pueden establecer puntos de partida para el estudio del confort térmico y la habitabilidad (Oraiopoulos et al., 2023). En consecuencia, estos hallazgos podrían ofrecer una primera aproximación empírica para alimentar el debate sobre estrategias de rehabilitación de la vivienda informal y la pertinencia de aplicar estándares internacionales en contextos de alta vulnerabilidad.

CASO DE ESTUDIO

EL BARRIO DE JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI

El barrio de José Carlos Mariátegui, ubicado en el distrito de San Juan de Lurigancho, Lima, se originó como un asentamiento informal a mediados de la década de 1980 sobre terrenos planos, áridos y carentes de infraestructura básica. Situado entre las estribaciones andinas, a aproximadamente 15 kilómetros del centro de Lima y a una altitud de 400 msnm (Figura 1), este barrio ha experimentado un crecimiento progresivo y no planificado, basado principalmente en la autoconstrucción. Con el paso del tiempo, los nuevos asentamientos han ocupado zonas cada vez más elevadas en las laderas que rodean la explanada original.

Este patrón de crecimiento refleja una dinámica común en las periferias urbanas de muchas ciudades latinoamericanas, donde la expansión urbana informal ha sido el principal motor del aumento del parque habitacional. En el caso específico de Lima, se estima que



Figura 2. Vista general del barrio de José Carlos Mariátegui. Fuente: Elaboración de los Autores.



Figura 3. Ubicación de las viviendas ensayadas sobre imagen de satélite. Fuente: Elaboración de los Autores basada en una imagen extraída de Google Earth.

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 142 - 155
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.09

Equipo	Marca	Modelo
Equipo de puerta sopladora, medidor de presión (manómetro integrado) y medidor de caudal de aire (placa orificio).	The Energy Conservatory	Minneapolis Blower Door con sensor de presión diferencial DG-700. Software TECLOG 4 versión 4.2.0.37
Registrador de señales	Yokogawa	MW100
Sensores de presión diferencial	Yokogawa	EJX110A
Registradores de Temperatura y humedad relativa	Onset	Hobo data logger U12-006
Micro estación meteorológica	Onset	Hobo data logger Microstation H21-002

Tabla 1. Instrumentos utilizados para la medición de los niveles de infiltración. Fuente: Elaboración de los Autores.

alrededor de 2 millones de personas residen en viviendas con techos construidos con materiales ligeros y precarios como la madera, la calamina o materiales similares, lo que representa aproximadamente el 20% de la población (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2018). Estas condiciones de precariedad tienden a mantenerse durante un período promedio de 10 a 15 años antes de que las viviendas alcancen algún nivel de consolidación, tanto a nivel constructivo como en la provisión de servicios básicos (Lambert et al., 2023).

El menor grado de consolidación tanto de las viviendas como de la infraestructura en las zonas más elevadas de los barrios informales es fácilmente identificable y suele estar asociado a un mayor riesgo de deslizamientos, así como a dificultades en el acceso y en la provisión de servicios básicos. La precariedad inicial de las edificaciones se manifiesta en el uso de materiales ligeros, como muros de tablas o triplay y techos de planchas onduladas de metal (Figura 2). Estas condiciones constructivas, en combinación con el clima desértico, litoral y templado de Lima, generan ambientes interiores sumamente incómodos, caracterizados por un sobrecalentamiento durante el verano y temperaturas muy bajas durante el invierno (Wieser, Verdiere & Fennell, 2022). Las brisas suaves y moderadas son constantes a lo largo del año (generalmente entre 1 y 2 m/s), pero no mitigan el efecto de la intensa radiación solar en verano (5.7 kWh/m² en promedio diario), la elevada humedad relativa (60% en verano y 80% en invierno en promedio) ni la frecuente neblina que se presenta en invierno (Oraiopoulos et al., 2025).

METODOLOGÍA

Se realizaron ensayos de hermeticidad en cinco viviendas (Figura 3), en las que se utilizó el método de puerta sopladora, conforme al estándar ASTM E779-19, Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization (Advancing Standards Transforming Markets [ASTM], 2019). Este procedimiento, ampliamente aplicado en edificaciones convencionales (Hsu et al., 2021), permite cuantificar las infiltraciones de aire, a través de la envolvente del edificio mediante la creación de una diferencia de presión controlada, generada por un ventilador que presuriza y despresuriza el espacio interior. La instrumentación empleada en los ensayos se detalla en la Tabla 1. Si bien el número de viviendas evaluadas es reducido, esta limitación es inherente al carácter exploratorio del estudio y a las condiciones difíciles del contexto: accesibilidad, seguridad y disponibilidad de las familias. El estudio se concibe como una aproximación exploratoria que aporta antecedentes empíricos iniciales sobre la hermeticidad para este tipo de edificaciones, ausentes hasta ahora en la literatura. Los valores obtenidos no pretenden ser estadísticamente representativos del universo de viviendas informales en Lima, sino proveer datos empíricos iniciales que orienten futuras investigaciones y sirvan de insumo para el modelado energético y la formulación de políticas públicas, en línea con estudios similares en contextos de difícil acceso (Rodríguez Muñoz et al., 2020; Oraiopoulos et al., 2023).

La envolvente de las viviendas estudiadas estuvo conformada por techos de planchas onduladas metálicas (calamina de zinc) y muros construidos con madera, drywall, tableros de virutas orientadas (Oriented Strand Board, OSB) o ladrillo (Figura 4). Para la selección de las viviendas se empleó un muestreo por conveniencia, condicionado por la disposición de las familias y por la proximidad geográfica entre ellas. El objetivo fue registrar la realidad constructiva de las viviendas del barrio, donde las imperfecciones y el deterioro en las estructuras representan una condición usual derivadas de la autoconstrucción y de las limitaciones económicas. No obstante, cuatro de las cinco viviendas se encontraban en zonas de ladera, a aproximadamente 300 metros de distancia del punto de acceso vehicular y con una diferencia de altura cercana a los 90 metros, lo que representó un desafío adicional para el transporte del equipamiento necesario para los ensayos. Para el funcionamiento adecuado del equipo, fue necesario contar adicionalmente con un generador eléctrico que pueda proporcionar una corriente de arranque de entre 8 y 10 amperios, ya que la red local en las partes altas



Figura 4. Viviendas ensayadas. Planos y características. Fuente: Elaboración de los Autores.

de José Carlos Mariátegui es inestable y suministra únicamente entre 4 y 5 amperios.

Previo a los ensayos, se realizó una inspección minuciosa en cada una de las viviendas, en que se verificó que puertas y ventanas permanecieran completamente cerradas y que no existieran aperturas adicionales que pudieran afectar la precisión de la medición. Posteriormente, se instaló el equipo de la puerta sopladora, se ejecutaron las pruebas preliminares, y se aplicaron presiones desde 10 Pa, incrementándolas en intervalos de 5 Pa hasta alcanzar los 50 Pa. Cabe destacar que, en viviendas con altos niveles de infiltración, producto de una construcción deficiente, resultó difícil alcanzar las diferencias de presión requeridas. Para asegurar la confiabilidad de los datos obtenidos, las lecturas del manómetro integrado al equipo de puerta sopladora fueron contrastadas con las mediciones de cuatro manómetros calibrados adicionales.

Durante los ensayos realizados en cada vivienda, el ventilador del sistema de puerta sopladora generó una diferencia de presión ΔP a través de la envolvente del edificio. Para caracterizar esta condición, se registraron mediciones de presión diferencial en tres puntos estratégicos del interior de la vivienda. De forma simultánea, el equipo midió el caudal de aire (Q) requerido para mantener dicha diferencia de presión. A partir de estos datos, se determinaron el coeficiente de fugas de aire (C) y el exponente de presión (n), mediante el ajuste de los valores obtenidos a la ecuación correspondiente del modelo de flujo de aire en función de la presión (Ecuación 1).

$$Q = C(\Delta P)^n \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

El número de intercambios de aire por hora (ACH, por sus siglas en inglés) se calculó al multiplicar el caudal de aire (Q) por 3600 segundos (equivalente a una hora), y se dividió el resultado por el volumen interior de la vivienda (V), de acuerdo con la fórmula convencional utilizada en estudios de hermeticidad (Ecuación 2).

$$ACH = \frac{Q \times 3600}{V} \qquad \text{(Ecuación 2)}$$





Figura 5. Izquierda. Puerta sopladora instalada en la Vivienda V03. Fuente: Elaboración de los Autores.
Figura 6. Derecha. Sensores instalados en la Vivienda V02. Fuente: Elaboración de los Autores.

Adicionalmente, se registraron los parámetros ambientales tanto interiores como exteriores durante los ensayos. La lista detallada de instrumentos utilizados se presenta en la Tabla 1. La Figura 5 y Figura 6 ilustran la instalación y el funcionamiento de los equipos en campo.

Se utilizó la vivienda V01 como caso de referencia para comparar las mediciones de diferencia de presión registradas por el manómetro del equipo de puerta sopladora con las obtenidas por los otros cuatro manómetros empleados en los experimentos (Figura 7). A lo largo de todo el rango de presiones ensayado, no se observaron diferencias significativas entre los instrumentos. Esto permitió validar la confiabilidad de las mediciones.

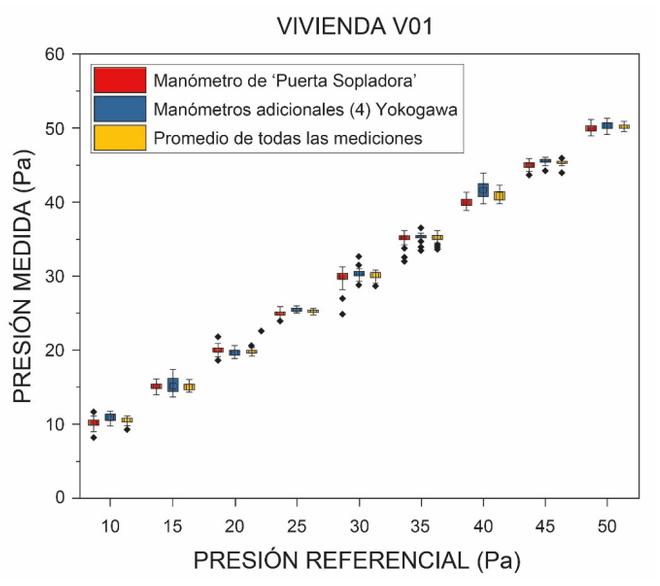


Figura 7. Mediciones de presión media en la vivienda V01. Fuente: Elaboración de los Autores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de flujos de infiltración y de intercambio de aire registrados en las viviendas evaluadas superaron

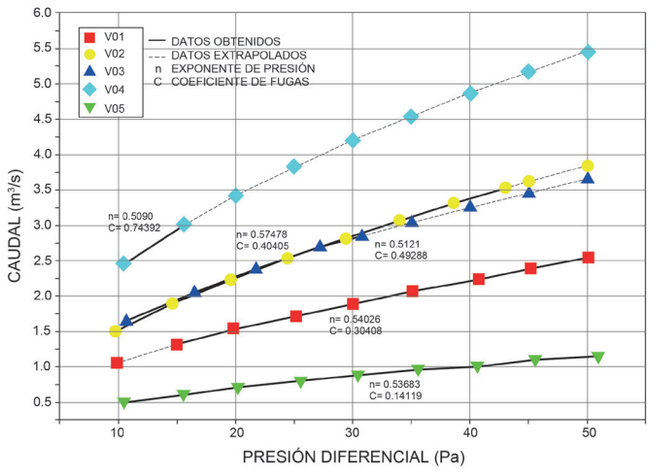


Figura 8. Infiltraciones de aire en cada una de las viviendas. Las líneas de trazo indican los valores extrapolados cuando no se pudo llegar a la diferencia de presión deseada durante el experimento. Fuente: Elaboración de los Autores.

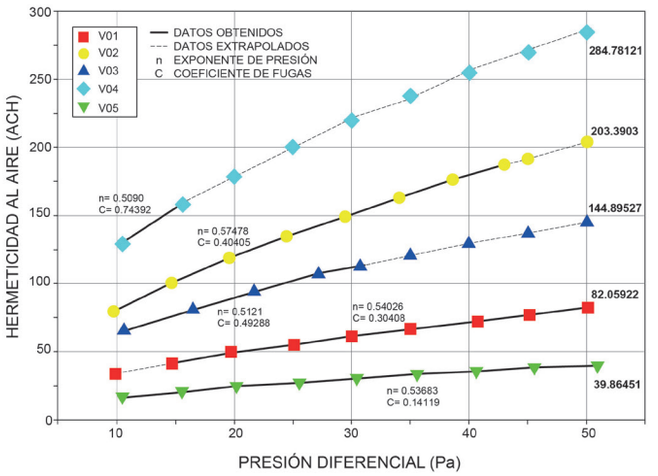


Figura 9. Renovación de aire por hora en cada una de las viviendas. Las líneas de trazo indican valores que fueron extrapolados para facilitar la comparación. Fuente: Elaboración de los Autores.

ampliamente los rangos comúnmente reportados en la literatura especializada (Figura 8 y Figura 9). A una presión diferencial de 50 Pa, se obtuvieron tasas de infiltración que oscilaron entre 40 ACH y 285 ACH. En el caso particular de las viviendas V02, V03 y V04, no fue posible alcanzar la presión objetivo de 50 Pa debido a las elevadas tasas de infiltración, propias de construcciones altamente permeables; en esos casos, se estimaron dichos valores a partir de la extrapolación de la curva de flujo de aire, al aplicar la ecuación del modelo de ley de potencia ($Q=C(\Delta P)^n$) con los coeficientes C y n derivados del ajuste por mínimos cuadrados de los puntos medidos. No obstante, se debe precisar que en la vivienda V04, debido a su extrema permeabilidad, solo se pudieron obtener dos puntos de medición, por lo que su resultado se presenta como una estimación indicativa, al no alcanzar el mínimo de cinco puntos requerido por la norma ASTM E779-19.

Estos niveles inusualmente elevados de infiltración reflejan las deficiencias constructivas características de las viviendas informales analizadas. Para referencia, los valores más altos encontrados en la literatura fueron de 24.6 ACH, en viviendas chilenas de madera (Bobadilla et al., 2014), y 23.3 ACH en un edificio italiano construido en 1950 (Ambrosio Alfano, et al., 2012). Las principales causas identificadas fueron la presencia de intersticios visibles, tanto en los vanos como en las uniones entre los muros y la cubierta de plancha ondulada. En la muestra, las viviendas con muros de listones de madera (V02 y V04) y de drywall (V03) presentaron niveles significativamente mayores de infiltración en comparación con aquellas construidas con muros de albañilería (V01) y paneles de OSB (V05). Esta diferencia se explica porque los sistemas constructivos basados en elementos ensamblados, como tablas o placas de drywall, generan múltiples puntos potenciales de fuga, los que tienden a ampliarse con el tiempo debido al desgaste, la exposición a la intemperie y la dilatación de los materiales, acentuándose así la pérdida de la hermeticidad.

Los logaritmos de los valores de flujo de aire de infiltraciones (Q) y de diferencia de presión (ΔP) medidos estuvieron estrechamente relacionados en todas las viviendas, con coeficientes de determinación (R^2) cercanos a 1 (Figura 10 y Tabla 2). Con ello es posible identificar una predictibilidad del comportamiento de las fugas de aire, lo que permitió a su vez, como se indicó anteriormente, la extrapolación de datos en los casos en los que no se pudo generar la diferencia de presión deseada durante los experimentos. En el gráfico de fuga de aire (Figura 10) se presenta para cada una de las viviendas el ingreso del caudal del aire generado por el ventilador con relación a la presión de aire que se aplica. Se puede observar, por ejemplo, para el caso de la Vivienda 01, el flujo de aire obtenido, el que varía entre 1.3 y 2.5 m3/s dependiendo de la presión ejercida. No obstante, se debe precisar que en el caso de la vivienda V04, los valores obtenidos representan estimaciones indicativas, ya que la extrema permeabilidad del inmueble impidió obtener el mínimo de cinco puntos exigido por la norma ASTM E779-19. En este caso específico, el coeficiente R^2 carece de valor interpretativo y los resultados deben leerse con la cautela propia de un hallazgo en condiciones de precariedad constructiva extrema.

Durante el trabajo de campo, en los preparativos para los ensayos y durante la colocación de los instrumentos, se pudo identificar en todas las viviendas, condiciones que hicieron presagiar niveles muy altos de infiltración. Se identificaron intersticios, ranuras, perforaciones, imprecisión en la unión de los componentes constructivos,

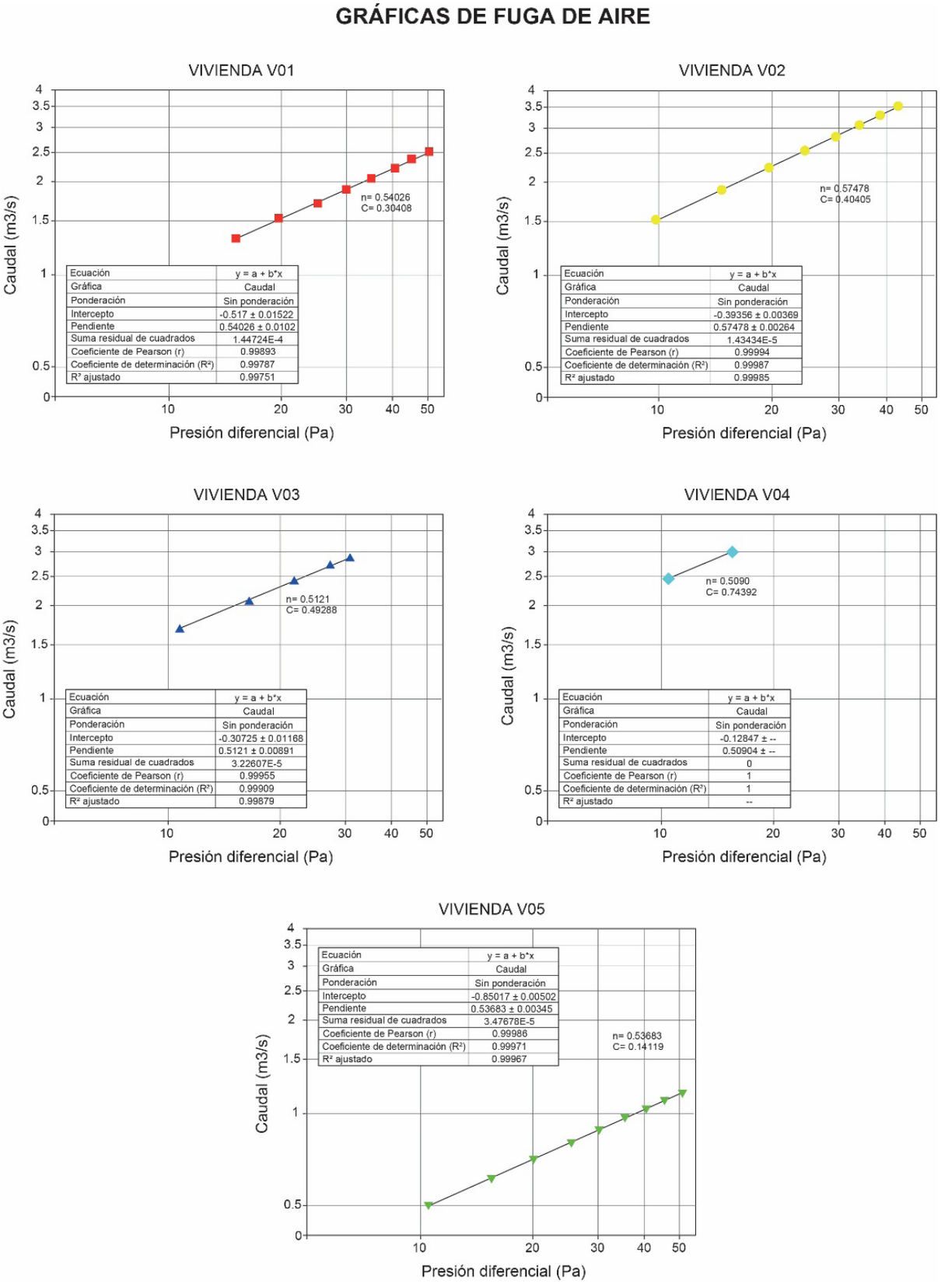


Figura 10. Resultados de fuga de aire en las cinco viviendas ensayadas. Para la vivienda V04, los valores representan estimaciones indicativas, ya que la extrema permeabilidad del inmueble impidió obtener el mínimo de cinco puntos exigido por la norma ASTM E779. Fuente: Elaboración de los Autores.

Vivienda	Material	Exponente de fugas de aire, n	Coeficiente de fugas, C	Caudal (m3/s) a 50 Pa	ACH a 50 Pa	R^2
V01	Ladrillo	0.540	0.304	2.5	82	0.99787
V02	Entablado	0.575	0.404	3.8	203	0.99987
V03	Drywall	0.512	0.493	3.7	145	0.99909
V04	Entablado	0.509	0.744	5.4	285	1.00000 [a]
V05	OSB	0.537	0.141	1.1	40	0.99971

a Valor obtenido con solo dos puntos de medición debido a que la extrema permeabilidad del inmueble impidió alcanzar los diferenciales de presión requeridos por el equipo. En este caso, el coeficiente R2 carece de valor interpretativo sobre la calidad del ajuste y los resultados deben considerarse como estimaciones indicativas no validadas bajo los criterios mínimos (5 puntos) de la norma ASTM E779.

Tabla 2. Valores obtenidos de los ensayos. Fuente: Elaboración de los Autores.

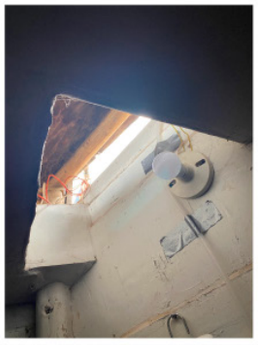
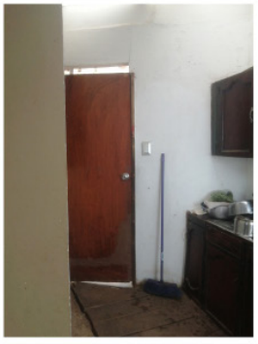
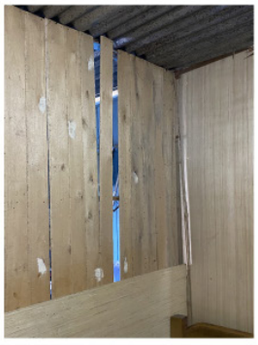
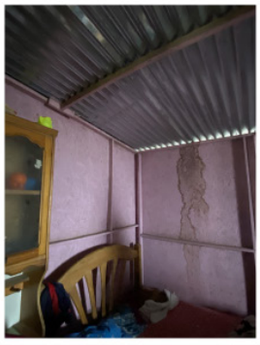
	V01	V02	V03	V04	V05
FOTOGRAFÍA					
AMB.	Dormitorio	Baño	Cocina	Dormitorio	Dormitorio
INTERSTICIOS	-Vanos con partes sin cerramiento vidriado -Ladrillos con orificios debido a rajadura	-Abertura en el techo del baño -Intersticio entre el cerramiento y la calamina	-Aberturas en la puerta de entrada	-Rotura de listones de madera -Intersticio entre el muro del baño y de los dormitorios	-Intersticio entre el cerramiento y la calamina

Figura 11. Imágenes con situaciones que reducen el nivel de hermeticidad al aire de las viviendas. Fuente: Elaboración de los Autores.

e incluso vanos sin capacidad de cerramiento (Figura 11). En el caso de la vivienda V02, la abertura identificada en el techo es una característica de diseño intencional para ventilación e iluminación. Durante el levantamiento de información en la zona, se observó que este tipo de soluciones forman parte de la lógica constructiva espontánea de diversos habitantes, lo que permite considerar este caso como un ejemplo de cómo ciertas prácticas de habitabilidad impactan severamente en la hermeticidad al aire. Lo que en contextos formales se clasificaría como un defecto o daño constructivo, en la vivienda precaria representa una condición habitual derivada de la autoconstrucción y la falta de mantenimiento por limitaciones económicas. La precariedad constructiva observada se alinea con los diagnósticos socioeconómicos previos en estos asentamientos informales (Wieser et al., 2022), que evidencian que las limitaciones de ingresos en la autoconstrucción restringen la capacidad de las familias para invertir en soluciones técnicas adecuadas y en la mejora de la envolvente de sus viviendas.

Estos niveles extremos de infiltración tienen implicancias relevantes sobre el confort térmico, la salud y la calidad del aire interior de los ocupantes. Por un lado, la presencia de corrientes de aire, filtraciones y pérdida del control térmico del espacio habitable pueden generar disconfort térmico severo, especialmente durante el invierno. Además, el elevado intercambio de aire no controlado dificulta el mantenimiento de temperaturas estables en el interior, lo que impacta negativamente en la habitabilidad general de la vivienda. En consecuencia, la entrada continua y no filtrada de aire exterior puede

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 142 - 155
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.09

introducir contaminantes, humedad y partículas en suspensión, que elevan el riesgo de enfermedades respiratorias, agravando problemas preexistentes como el asma, e incrementando la presencia de moho. Este problema es acrecentado por la gran presencia de arena en los exteriores.

La relevancia de este estudio radica no solo en ser la primera que realiza mediciones sistemáticas de hermeticidad en viviendas informales en el contexto peruano, sino también en su potencial para nutrir futuras simulaciones energéticas y de confort térmico. La disponibilidad de datos empíricos de hermeticidad específicos para viviendas autoconstruidas y precarias es fundamental para calibrar modelos que estimen pérdidas de energía, condiciones de habitabilidad y escenarios de intervención. En contextos donde la recolección de datos es difícil y costosa, estos resultados permiten definir rangos realistas de infiltración para estudios comparativos, evaluaciones de impacto o propuestas de mejora en programas de rehabilitación y políticas públicas.

Para dimensionar la magnitud de los resultados registrados, se reconoce que una vivienda con 100 ACH a 50 Pa —valor intermedio dentro del rango registrado— experimenta una renovación de aire involuntaria varias veces superior a la recomendada para garantizar condiciones mínimas de habitabilidad y confort. En términos prácticos, esto implica que cualquier estrategia pasiva de acondicionamiento térmico —como el uso de masa o aislamiento— tendría un efecto marginal sin una intervención previa sobre la envolvente que reduzca dichas infiltraciones. Del mismo modo, los niveles de infiltración identificados hacen prácticamente inviable el eventual uso eficiente de sistemas de calefacción activa, ya que el calor generado se disiparía casi de inmediato hacia el exterior.

Todas estas consideraciones son especialmente relevantes en el contexto del invierno limeño, caracterizado por temperaturas que, si bien no son extremas en términos absolutos, resultan difíciles de sobrellevar en interiores sin control térmico, debido a la combinación de humedad relativa elevada, escasa radiación solar directa y a la propia incapacidad de financiar sistemas de calefacción (Wieser et al., 2022). En consecuencia, la mejora de la hermeticidad de las viviendas en este contexto debería considerarse como una intervención prioritaria y de bajo costo relativo, previa a cualquier otra mejora asociada al confort y la eficiencia energética.

CONCLUSIONES

A partir de los valores obtenidos, se constata que los niveles de infiltración de aire en las viviendas precarias de barrios informales en Lima son extremadamente altos en comparación con normativas internacionales, e incluso con viviendas de otros países de la región. Esta falta de hermeticidad, sumada a la ligereza y al bajo nivel de aislamiento de la envolvente, genera que los habitantes estén expuestos a condiciones extremas, reduciéndose los niveles de confort térmico, sobre todo durante los meses de invierno. Atendiendo a las características materiales identificadas y dado que la vulnerabilidad económica del sector limita la viabilidad de intervenciones de forma autónoma y rigurosa por parte de los habitantes, la mejora de la hermeticidad en estas viviendas sugiere la necesidad de implementar programas de apoyo público.

Adicionalmente, los resultados sugieren que eventuales intervenciones simples y de bajo costo orientadas al aumento de la hermeticidad al aire en estas viviendas, como sellar intersticios y mejorar el ajuste de puertas y ventanas, tendrían un impacto térmico significativo, haciendo necesaria su consideración en el diseño de eventuales programas de mejoramiento y políticas públicas de vivienda orientadas a estas poblaciones. Los resultados obtenidos constituyen un insumo fundamental para el desarrollo de normativas y estrategias de intervención orientadas a mejorar la habitabilidad en contextos de vulnerabilidad urbana.

En base al reconocimiento de la relación directa entre la hermeticidad al aire y el confort térmico en edificios ventilados de forma natural y sin sistemas de acondicionamiento térmico activo, resulta necesario un mayor interés por incluir estos aspectos en el debate local, tanto académico como público. Finalmente, se resalta la necesidad de ampliar significativamente el número de mediciones para consolidar una línea base que abarque los distintos tipos constructivos presentes en el parque habitacional de viviendas del país, tanto del sector formal como del informal. Dicha línea base permitirá sustentar normativas técnicas adaptadas a la realidad local, así como calibrar modelos de simulación energética aplicables a contextos de vivienda en otras ciudades del país y de la región.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, M.W.; Curación de datos, M.W., R.M., E.B., E.M., A.G., J.V., LC; Análisis formal, M.W., R.M., E.B., E.M., L.C.; Adquisición de financiación M.W.; Investigación, M.W., R.M., E.B., E.M., A.G., J.V., L.C.; Metodología, M.W., R.M., E.B., E.M., A.G., J.V., L.C.; Administración de proyecto, M.W.; Supervisión, M.W., R.M., E.B., E.M., A.G., J.V.; Validación, M.W., R.M., E.B., E.M., L.C.; Escritura – borrador original, M.W.; Escritura – revisión y edición, M.W., R.M., E.B., E.M., A.G., J.V., L.C.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha sido realizado gracias al financiamiento de las siguientes unidades de la Pontificia Universidad Católica del Perú: Departamento de Arquitectura, Centro de Investigación de la Arquitectura y la Ciudad CIAC, Laboratorio de Energía del Departamento de Ingeniería y Dirección Académica de Responsabilidad Social DARS. Se agradece a las familias que nos permitieron realizar las mediciones al interior de sus viviendas y a la ONG CENCA por el apoyo en el trabajo de campo y el vínculo con la comunidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ambrosio Alfano, F., Dell'Isola, M., Ficco, G., & Tassini, F. (2012). Experimental analysis of air tightness in Mediterranean buildings using the fan pressurization method. *Building and Environment*, 53, 16-25. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.12.017

Advancing Standards Transforming Markets [ASTM]. (23 de enero de 2019). *ASTM 779-19. Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0779-19

Bobadilla, A., Díaz, M., Figueroa, R., & Arriagada, R. (2014). Proposal of Acceptable Air Tightness Classes for Buildings in Chile. *Revista de la construcción, 13*(1), 15-23. https://doi.org/10.4067/S0718-915X2014000100002

Buonanno, G., Morawska, L., & Stabile, L. (2009). Particle emission factors during cooking activities. *Atmospheric Environment, 43*(20), 3235-3242. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.03.044

Choi, Y., Lim, Y., Kim, J., & Song, D. (2020). Why Does a High Humidity Level Form in Low-Income Households Despite Low Water Vapor Generation? *Sustainability, 12*(18), 7563. https://doi.org/10.3390/su12187563

Etheridge, D. (2015). A perspective on fifty years of natural ventilation research. *Building and Environment, 91*, 51-60. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.033

Feijó-Muñoz, J., Poza-Casado, I., González-Lezcano, R. A., Pardal, C., Echarri, V., Assiego De Larriva, R., Fernández-Agüera, J., Dios-Viéitez, M. J., Del Campo-Díaz, V. J., Montesdeoca Calderín, M., Padilla-Marcos, M. Á., & Meiss, A. (2018). Methodology for the Study of the Envelope Airtightness of Residential Buildings in Spain: A Case Study. *Energies, 11*(4), 704. https://doi.org/10.3390/en11040704

Guyot, G., Schild, P. G., & Carrié, R. (abril de 2010). *Stimulation of good building and ductwork airtightness through EPBD*. Assessment and Improvement of the EPBD Impact [ASIEPI]. https://www.aivc.org/resource/stimulation-good-building-and-ductwork-airtightness-through-epbd

Hsu, Y.-S., Zheng, X., Cooper, E., Gillott, M., & Wood, C. J. (2021). Evaluation of the indoor pressure distribution during building airtightness tests using the pulse and blower door methods. *Building and Environment, 195*, 107742. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107742

Hutcheon, N. B. (1953). Fundamental considerations in the design of exterior walls for buildings. Technical Report No.13 of the Division of Building Research Ottawa. *NRC, 2057*(37), 1-25. https://publications-cnrc.canada.ca/eng/view/object/?id=e03a98e6-9755-42d8-a9ea-f8b34680bded

Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI]. (2018). *Resultados definitivo de los Censo Nacional 2017. Región Lima*. XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1550/

Kalamees, T. (2007). Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. *Building and Environment, 42*(6), 2369-2377. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.001

Kulshreshtha, P., Khare, M., & Seetharaman, P. (2008). Indoor air quality assessment in and around urban slums of Delhi city, India. *Indoor Air*, 18(6), 488-498. https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2008.00550.x

Lambert, R., Escalante, C., De los Rios, S., Verdiere, M., & Wieser, M. (2023). *Dignified housing and energy justice: Learning from low-income neighbourhoods in Lima*. University College London (UCL). https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10181093/

Oraiopoulos, A., Wieser Rey, M., Verdiere, M., Fennell, P., & Ruyssevelt, P. (September 4–6, 2023). *Thermal comfort in low-income housing in informal settlements in Lima, Peru. Towards a localised adaptive comfort standard* [Conference paper]. Building Simulation 2023: 18th Conference of International Building Performance Simulation Association [IBPSA], Shanghai, China. https://doi.org/10.26868/25222708.2023.1474

Oraiopoulos, A., Wieser, M., Verdiere, M., Lambert, R., Fennell, P., & Ruyssevelt, P. (2025). Improving habitability in informal settlements in the Global South: Exploring the impact of community urban green infrastructure on outdoor heat stress. *Building and Environment, 287*(Part A), 113787. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113787

Persily, A. K. (December 6–10, 1998). *Airtightness of commercial and institutional buildings: Blowing holes in the myth of tight buildings*. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII: proceedings of the Conference. Clearwater, Florida, EE.UU. https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_13149.pdf

Poza-Casado, I., Cardoso, V. E. M., Almeida, R. M. S. F., Meiss, A., Ramos, N. M. M., & Padilla-Marcos, M. Á. (2020). Residential buildings airtightness frameworks: A review on the main databases and setups in Europe and North America. *Building and Environment, 183*, 107221. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107221

Rodríguez Muñoz, J. M., Sevrini, A., Gil, G., & Bove, I. (2020). Estudio experimental de la permeabilidad al aire de edificios en Uruguay. ENERLAC. *Revista de energía de Latinoamérica y el Caribe*, 4(2), 76-91. https://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/119

Šadauskienė, J., Šeduikytė, L., Paukštys, V., Banionis, K., & Gailius, A. (2016). The role of air tightness in assessment of building energy performance: Case study of Lithuania. *Energy for Sustainable Development, 32*, 31-39. https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.02.006

Sfakianaki, A., Pavlou, K., Santamouris, M., Livada, I., Assimakopoulos, M.-N., Mantas, P., & Christakopoulos, A. (2008). Air tightness measurements of residential houses in Athens, Greece. *Building and Environment, 43*(4), 398-405. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.006

Tombarević, E., Vušanović, I., & Šekularac, M. (2023). The Impact of Windows Replacement on Airtightness and Energy Consumption of a Single Apartment in a Multi-Family Residential Building in Montenegro: A Case Study. *Energies, 16*(5). https://doi.org/10.3390/en16052208

Wieser, M., Verdiere, M., & Fennell, P. (December 13-14, 2022). *The impact of built environment on thermal comfort in informal settlements. The case of José Carlos Mariátegui, Lima, Perú* [Conference paper]. Sixth Building Simulation and Optimisation Virtual Conference. Hosted by University of Bath, UK. https://publications.ibpsa.org/proceedings/bso/2022/papers/bso2022_52.pdf

Zheng, X., Cooper, E. W., Mazzon, J., Wallis, I., & Wood, C. J. (2019). Experimental insights into the airtightness measurement of a house-sized chamber in a sheltered environment using blower door and pulse methods. *Building and Environment, 162*, 106269. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106269

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 156 - 169
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.10

EVALUACIÓN TÉRMICA COMPARATIVA DE UNA ESTRUCTURA DE SOMBREADO VEGETAL Y UNA MALLA DE SOMBREADO ARTIFICIAL EN PARRAL, CHILE

Recibido 28/01/2026
Aceptado 27/06/2026

COMPARATIVE THERMAL EVALUATION OF A VEGETATIVE SHADING STRUCTURE AND A SYNTHETIC SHADE NET IN PARRAL, CHILE

AVALIAÇÃO TÉRMICA COMPARATIVA DE UMA ESTRUTURA DE SOMBREAMENTO VEGETAL E DE UMA TELA DE SOMBREAMENTO ARTIFICIAL EM PARRAL, CHILE

Nelson Arias-Jiménez (Autor de Correspondencia)
Doctor en Arquitectura y Urbanismo
Académico, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño,
Departamento de Diseño y Teoría de la Arquitectura
Universidad del Bío-Bío
Concepción, Chile
https://orcid.org/0000-0003-1782-7314
narias@ubiobio.cl

Rodrigo Figueroa-San-Martín
Doctor en Arquitectura y Urbanismo
Académico, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño,
Departamento de Ciencias de la Construcción
Universidad del Bío-Bío
Concepción, Chile
https://orcid.org/0000-0002-4382-3782
rfiguero@ubiobio.cl

Diego Cárdenas-Merino
Magíster en Arquitectura
Estudiante de doctorado, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño,
Departamento de Diseño y Teoría de la Arquitectura
Universidad del Bío-Bío
Concepción, Chile
https://orcid.org/0000-0003-3093-6996
diegocardenasarquitecto@gmail.com

CC BY SA

RESUMEN

Este estudio evalúa comparativamente el comportamiento térmico de un parrón y una malla de sombreo como estrategias de acondicionamiento de espacios exteriores intermedios en clima templado. Se desarrolló un experimento in situ en la ciudad de Parral, Chile, mediante mediciones ambientales durante 14 días de verano, con un enfoque exploratorio. A partir del registro de temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura de globo, se calcularon la temperatura radiante media y el índice UTCI entre las 11:00 y las 16:00 h. Los resultados evidencian un mejor desempeño del parrón, con valores menores de UTCI y de temperatura radiante media que los de la malla. La mayor diferencia entre ambas condiciones se observó en este último parámetro, con variaciones diarias de 2,6 a 4,3 °C. Se concluye que el parrón constituye una estrategia pasiva más efectiva para mejorar el confort térmico exterior.

Palabras clave
sobrecalentamiento, parrón, confort térmico exterior, espacios intermedios

ABSTRACT

This study comparatively evaluates the thermal performance of a grapevine pergola and a shade net as conditioning strategies for intermediate outdoor spaces in a temperate climate. An in situ experiment was conducted in Parral, Chile, using environmental measurements collected over a 14-day summer period as part of an exploratory approach. Air temperature, relative humidity, wind speed, and globe temperature were recorded, and mean radiant temperature and the Universal Thermal Climate Index (UTCI) were calculated for the period between 11 am and 4 pm. The results indicate the grapevine pergola performed better, with a lower UTCI and mean radiant temperature values than those recorded under the shade net. The greatest difference between the two conditions was observed for the second parameter, with daily variations ranging from 2.6 to 4.3 °C. It is concluded that the grapevine pergola constitutes a more effective passive strategy for improving outdoor thermal comfort.

Keywords
overheating, grapevine pergola, outdoor thermal comfort, transitional spaces

RESUMO

Este estudo avalia comparativamente o comportamento térmico de um pergolado com parreira e de uma tela de sombreamento como estratégias de condicionamento de espaços exteriores intermediários em clima temperado. Desenvolveu-se um experimento in situ na cidade de Parral, Chile, com medições ambientais ao longo de 14 dias de verão, adotando-se uma abordagem exploratória. A partir do registro da temperatura do ar, da umidade relativa, da velocidade do vento e da temperatura de globo, calcularam-se a temperatura radiante média e o índice UTCI entre 11h e 16h. Os resultados evidenciam um melhor desempenho do pergolado com parreira, com valores mais baixos de UTCI e de temperatura radiante média em comparação à tela. A maior diferença entre as duas condições foi observada neste último parâmetro, com variações diárias de 2,6 a 4,3 °C. Conclui-se que o pergolado com parreira constitui uma estratégia passiva mais eficaz para melhorar o conforto térmico exterior.

Palavras-chave
Superaquecimento, pergolado com parreira, conforto térmico exterior, espaços intermediários



Figura 1. Dos ejemplos de parrones y su comportamiento caducifolio. Fuente: Elaboración de los autores.

INTRODUCCIÓN

El acondicionamiento ambiental de espacios exteriores constituye un desafío creciente en el contexto del cambio climático y la intensificación del fenómeno de isla de calor urbano (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023). En ciudades y territorios de clima templado, el aumento de las temperaturas y la mayor exposición a radiación solar han deteriorado las condiciones de confort térmico en el espacio exterior, que afecta su habitabilidad y uso cotidiano (Liu et al., 2025; Wang et al., 2023). En este escenario, las estrategias pasivas de mitigación climática, particularmente aquellas basadas en vegetación han adquirido relevancia como alternativas sostenibles frente a soluciones tecnológicas de alto consumo energético (Gherri, 2023).

En este sentido, la literatura ha abordado extensamente el rol de la infraestructura verde en distintas escalas, desde el arbolado urbano hasta sistemas constructivos vegetales (Bowler et al., 2010). Sobre este último, se ha demostrado que la incorporación de vegetación en envolventes puede reducir significativamente la temperatura radiante media en entornos exteriores (Perini & Magliocco, 2014) y la temperatura superficial de muros expuestos a radiación solar directa, dependiendo de variables como la densidad foliar y la cobertura vegetal (Nasr et al., 2024).

Para el enfriamiento de espacios exteriores, además de la incorporación de la vegetación a muros, fachadas o techos, existen sombreaderos vegetales, construidos por estructuras horizontales que controlan la radiación solar mediante especias trepadoras, típicamente visibles en pérgolas. En estos casos, la vegetación actúa como un mediador climático eficaz mediante dos mecanismos principales: la reducción de la radiación solar incidente, a través del sombreado y el enfriamiento evaporativo asociado a la evapotranspiración (Salonen et al., 2022; Wu et al., 2024). Estos procesos permiten disminuir tanto la temperatura superficial como la del aire, que contribuye a mejorar el confort térmico en espacios exteriores y a mitigar el efecto de isla de calor urbano.

La evidencia reciente converge en que la sombra generada por vegetación tiende a ofrecer un mejor desempeño térmico que los dispositivos artificiales, tanto en la reducción de temperatura como en la mejora del confort térmico exterior (Kusaka, Asano & Kimura, 2022). En contraste, existe una menor sistematización del conocimiento respecto de dispositivos tradicionales que, en contextos locales, han cumplido funciones similares de acondicionamiento ambiental. En este marco, el parrón —estructura vegetal asociada al cultivo de la uva— constituye un elemento característico de la arquitectura vernácula en climas templados, particularmente en regiones mediterráneas y en el valle central de Chile. El parrón puede configurar espacios intermedios habitables mediante la generación de sombra y microclimas favorables. Su uso ha sido documentado en prácticas rurales y domésticas en el país, donde forma parte del habitar cotidiano (Aravena Alvarado, 2015).

Desde una perspectiva ambiental, su carácter de especie caduca (Figura 1) permite una adaptación estacional eficiente, que proporciona sombra en verano y permite el ingreso de radiación solar en invierno, tal como otras especies caducifolias (Zhang et al., 2022). Desde el punto de vista físico, el parrón actúa como un sistema de regulación térmica que combina sombreado y evapotranspiración. A pesar de su presencia en entornos rurales y urbanos, el parrón ha sido progresivamente reemplazado por soluciones de rápida y económica implementación, como las mallas de sombreo de polietileno de alta densidad. Éstas permiten un control inmediato de la radiación solar y generan efectos de enfriamiento que contribuyen al confort térmico (López-Cabeza et al., 2022; Zhao et al., 2024).

Esta sustitución de una solución ancestral por un elemento artificial no responde únicamente a criterios técnicos, sino que también se inscribe en dinámicas más amplias de estandarización impulsadas por políticas públicas y el mercado, que tienden a desplazar estrategias vernáculas. Fenómenos similares han sido documentados en otros contextos, donde la incorporación de soluciones industrializadas han contribuido a la homogeneización de los entornos construidos vernáculos (Arias Tapiero, Ortega & Vasconcelos, 2025). En consecuencia, se observa una pérdida progresiva de pertinencia identitaria en la configuración de los espacios exteriores, particularmente en ámbitos rurales (Figura 2).



Figura 2. Personas frente a un sistema de sombreado de parrón y malla. Fuente: Elaboración de los autores.

Si bien existe un cuerpo consolidado de investigación sobre el rol de la vegetación como mediador climático, la investigación reciente en torno al desempeño térmico de la vegetación se ha concentrado principalmente en sistemas contemporáneos, tales como muros (Jim, 2015; Zheng et al., 2025), fachadas (MacIvor & Margolis, 2015) y techos verdes (De Cristo et al., 2025), por lo que se identifica una brecha específica en el estudio de sombreaderos vegetales como dispositivos de acondicionamiento ambiental. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar el efecto del parrón en el comportamiento térmico de espacios exteriores, como un caso representativo de los sombreaderos vegetales, y compararlo con una solución contemporánea basada en malla de sombreo, con el fin de evaluar sus efectos en las condiciones micro-meteorológicas y su potencial como estrategia de acondicionamiento ambiental.

METODOLOGÍA

SITIO DE ESTUDIO

El estudio se desarrolló en la ciudad de Parral, ubicada en el valle central de Chile (36°08′ S, 71°49′ W), zona caracterizada por un clima templado con influencia mediterránea (Csb), según la clasificación de Köppen–Geiger. Este clima presenta veranos cálidos y secos, con alta radiación solar y amplitud térmica diaria, e inviernos más fríos y húmedos.

Estas condiciones permiten evaluar el desempeño de estrategias de sombreado en escenarios representativos del habitar cotidiano en el centro-sur de Chile, particularmente en contextos de alta exposición solar estival. De acuerdo con los registros históricos de la estación meteorológica más cercana, las temperaturas máximas medias del aire durante los meses cálidos alcanzan 28,1 °C en diciembre, 30,6 °C en enero, 30,0 °C en febrero y 26,5 °C en marzo. Se considera específicamente este último mes, en el que se realizaron las mediciones, las temperaturas máximas absolutas registradas oscilan entre 31,4 °C y 34,3 °C (Servicios Climáticos, 2026).

DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño adopta un enfoque experimental exploratorio basado en mediciones in situ, orientado a analizar el comportamiento térmico asociado a un sistema de sombreado vegetal preexistente (parrón) en comparación con una superficie localizada de malla de sombreo de polietileno de alta densidad (malla). El estudio se desarrolló en un único espacio intervenido, en el que se introdujo una superficie acotada de malla (1,0 × 1,2 m), que permite generar variaciones micro-meteorológicas localizadas dentro de un mismo entorno. Esta aproximación responde a restricciones operativas propias del caso de estudio y se plantea como una estrategia exploratoria para identificar tendencias comparativas iniciales (Figura 3).

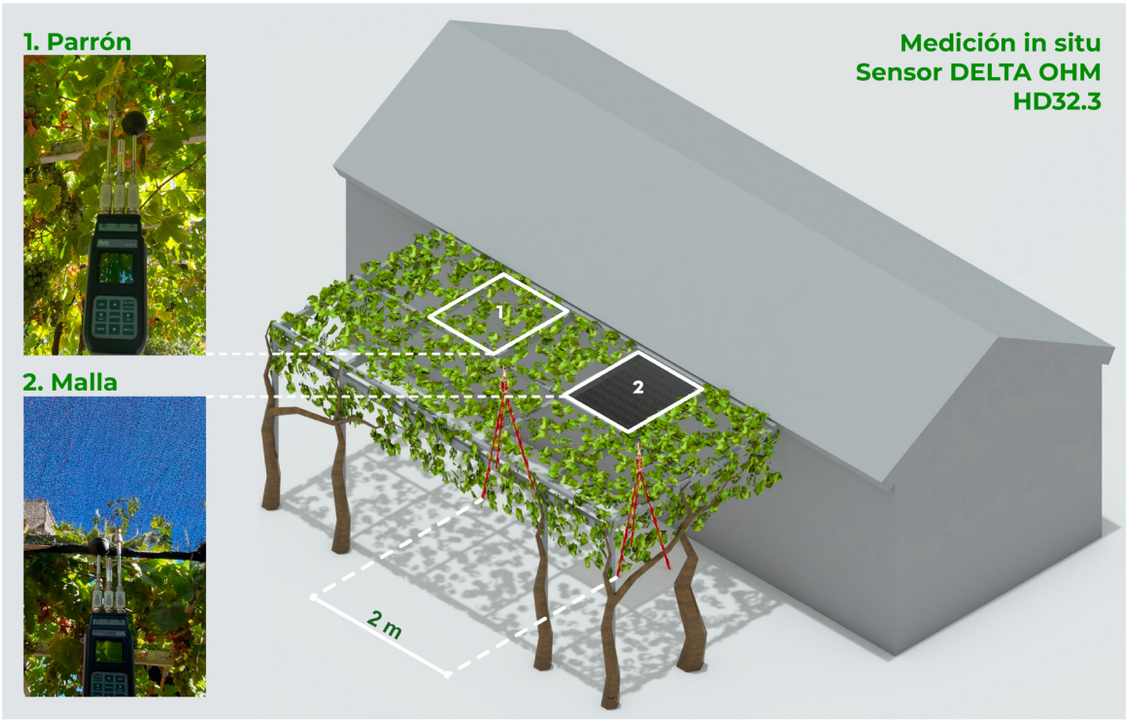


Figura 3. Esquema de estrategias de sombreado estudiadas. Fuente: Elaboración de los autores.

Las mediciones se realizaron en posiciones específicas bajo ambas condiciones para capturar variaciones en el comportamiento térmico a escala micro-meteorológica. En particular, la temperatura de globo fue registrada bajo la malla a una distancia aproximada de 75 cm de la superficie de sombreo y a una altura de 1,55 m respecto del nivel del suelo, representativa de la altura de exposición del cuerpo humano en posición de pie (Zhao et al., 2024). Se utilizaron sensores data loggers, posicionados al centro de los sistemas de sombreado estudiados, a 2 metros de distancia entre sí.

La campaña de medición se desarrolló durante un período continuo de 14 días en temporada estival. Dicha duración permite registrar ciclos térmicos diarios y reducir la influencia de eventos meteorológicos puntuales, que mejoran la representatividad de los datos, en línea con recomendaciones metodológicas para estudios ambientales de campo (Arias-Jiménez et al., 2026; Guerrero-Rubio et al., 2017; Umishio et al., 2024).

Las mediciones se realizaron mediante sensores instalados en el espacio de estudio, con una frecuencia de registro de 10 minutos durante las 24 horas de cada día. En investigaciones similares, se ha restringido el rango horario de análisis con el propósito de capturar los picos críticos de estrés térmico y evitar distorsiones por baja altitud solar (Elgheznawy & Eltarabily, 2021; Lee et al., 2018; Zhao et al., 2024). En concordancia con este criterio, se desarrolló un estudio de asoleamiento mediante una réplica digital georreferenciada del lugar de experimentación en el software Archicad, con el fin de

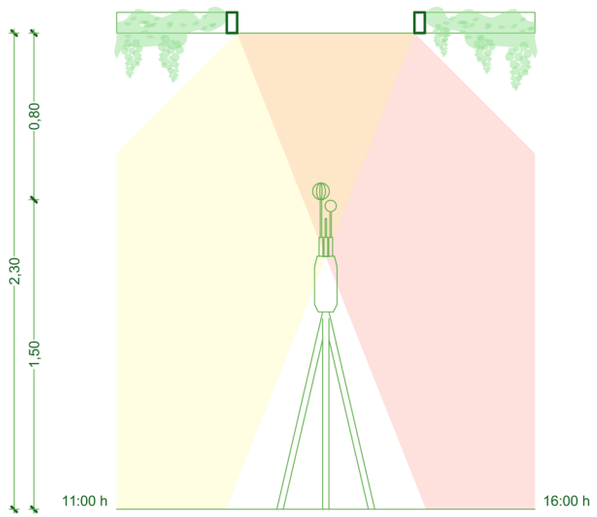


Figura 4. Período de radiación solar incidente en sensor. Fuente: Elaboración de los autores.

identificar el período de mayor exposición solar sobre el área analizada. A partir de este procedimiento se definió como ventana de estudio el intervalo comprendido entre las 11:00 y las 16:00 horas (Figura 4). Ello permitió evaluar el desempeño del sombreado bajo condiciones consistentes de asoleamiento y concentrar el análisis en las horas de mayor exigencia térmica. De este modo, los sensores registraron las variables del ambiente térmico exterior necesarias para evaluar térmicamente el espacio bajo sombra (Tabla 1 y Tabla 2).

Variable	Unidad
t_a	Temperatura del aire (°C)
t_g	Temperatura de globo (°C)
v_a	Velocidad del viento (m/s)
HR	Humedad relativa (%)

Tabla 1. Variables meteorológicas medidas. Fuente: Elaboración de los autores.

Componente / Sonda	Tipo de Sensor	Rango de Operación	Exactitud / Clase de Tolerancia	Resolución
Unidad Base (HD32,3)	Procesador con entradas SICRAM	*T*: -5 a 50 °C *HR*: 0 a 90%	±1 dígito a 20 °C	N/A
Termómetro de globo	Pt100 (Ø = 50 mm / 150 mm)	-10 a 100 °C	Clase 1/3 DIN	0,1 °C
Termohigrómetro Combinado	Pt100 (*T*) Capacitivo (*HR*)	*T*: -40 a 80 °C *HR*: 0 a 100%	*T*: Clase 1/3 DIN *HR*: ±1,5% (0-90%) / ±2% (90-100%) a 15-35 °C	*T*: 0,1 °C *HR*: 0,1%
Anemómetro Omnidireccional	Hilo caliente (NTC 10 kΩ)	*v*: 0,1 a 5 m/s *T*: 0 a 80 °C	±0,2 m/s (0,1 a 1 m/s) ±0,3 m/s (1 a 5 m/s)	0,01 m/s

Tabla 2. Especificaciones técnicas y rangos operativos del sistema de monitorización microclimática DELTA OHM HD32,3. Fuente: Elaboración de los autores.

Para evaluar las condiciones térmicas exteriores, se establecieron dos indicadores complementarios. La temperatura radiante media (T_r) fue utilizada como variable física para caracterizar la carga radiativa del entorno sobre el cuerpo humano, considerándose la radiación solar, la radiación reflejada y la radiación de onda larga emitida por las superficies circundantes. En espacios exteriores, esta variable resulta especialmente relevante para analizar el desempeño físico-radiativo de sistemas de sombra y su influencia sobre la percepción térmica del ambiente (López-Cabeza et al., 2022; Mihalakakou & Romeos, 2026). Complementariamente, se utilizó el Universal Thermal Climate Index [UTCI] (COST European Cooperation in Scientific and Technical Research, 2026) como índice biometeorológico de estrés térmico exterior, que expresa una temperatura equivalente derivada de un modelo termofisiológico que integra temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y radiación térmica para representar la respuesta fisiológica humana frente al ambiente (Błażejczyk et al., 2013; Bröde et al., 2012). Su uso resulta pertinente en estudios comparativos de confort exterior bajo condiciones de sol, sombra construida y sombra vegetal (Watanabe et al., 2014). Así, la t_r permitió comparar el desempeño radiativo del sistema de sombra, mientras que el UTCI permitió evaluar sus efectos sobre las condiciones de confort térmico a escala peatonal.

CÁLCULO DE TEMPERATURA RADIANTE MEDIA

La temperatura radiante media (T_r) es calculada por el sensor a partir de los parámetros medidos de la temperatura de globo (T_g), la temperatura del aire (t_a) y la velocidad del viento (v_a), se utilizaron las siguientes fórmulas establecidas en la norma ISO 7226:2025.

Cuando la velocidad de aire es menor a 0,2 m/s, (Ecuación 1):

$$t_r = \left[\left(t_g + 273\right)^4 + \frac{0.25 \times 10^8}{\varepsilon_g} \left(\frac{\left| t_g - t_a \right|}{D} \right)^{1/4} \times \left(t_g - t_a\right) \right]^{1/4} - 273$$

(Ecuación 1)

Cuando la velocidad de aire es mayor o igual a 0,2 m/s, (Ecuación 2):

$$t_r = \left[\left(t_g + 273\right)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 \times v_a^{0.6}}{\varepsilon_g \times D^{0.4}} \left(t_g - t_a\right) \right]^{1/4} - 273$$

(Ecuación 2)

Donde D = diámetro de termómetro de globo, E_g = 0.95 emisividad presunta de globo termómetro, t_g = temperatura de globo, t_a = temperatura del aire, y v_a = velocidad del aire.

Condición de la medición	Régimen de convección (ISO 7726)	Incertidumbre combinada promedio (c) [°C]	Incertidumbre mínima ($u_{c\,max}$) [°C]	Incertidumbre máxima (ucmax) [°C]
t_r malla	Natural	± 0,155	± 0,077	± 0,179
	Forzada	± 0,747	± 0,105	± 2,215
t_r parrón	Natural	± 0,146	± 0,082	± 0,167
	Forzada	± 0,516	± 0,105	± 1,198

Tabla 3. Análisis comparativo de la incertidumbre del cálculo de tr. Fuente: Elaboración de los autores.

CÁLCULO DEL ÍNDICE UTCI

El índice UTCI, definido como una función multivariable de la temperatura del aire, la temperatura radiante media, la velocidad del aire y la presión de vapor de agua por (Ecuación 3):

$$UTCI=\int(t_a, t_r, v_a, P) \qquad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde t_a corresponde a la temperatura del aire, t_r a la temperatura radiante media, v_a a la velocidad del aire y *P* a la presión de vapor de agua (hPa). Los valores de t_a y HR fueron obtenidos directamente mediante el sensor Delta OHM HD32.3, mientras que la *P* fue calculada por medio de (Ecuación 4):

$$P = \left(\frac{HR}{100}\right) \text{ x } 0{,}6108 \text{ x} \exp\left(\frac{(17{,}27 \times t_a)}{(t_a + 237.3)}\right) \qquad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde *P* se expresa en hectopascales, (Ecuación 5):

$$hP = \frac{P}{100} \qquad \text{(Ecuación 5)}$$

En lo que concierne a la v_a, si bien la formulación clásica del UTCI utiliza la velocidad del viento referida a 10 m de altura (Bröde et al., 2012), en este estudio se empleó la velocidad medida in situ a 1.55 m sobre el nivel del suelo, dado que la evaluación se realizó a escala peatonal bajo los sistemas de sombreo. Estudios recientes indican que el tratamiento estándar del viento puede no representar adecuadamente el flujo de aire en la capa peatonal urbana y que las variables meteorológicas utilizadas en su cálculo debieran originarse en esa misma escala de exposición humana (Lee et al., 2025). Los valores de UTCI fueron calculados mediante una implementación computacional disponible en la plataforma web UTCI - COST Action 730, basada en la formulación propuesta por Bröde et al. (2012).

VALIDACIÓN DE LOS DATOS Y ANÁLISIS

La cuantificación del margen de incertidumbre combinada para la t_r y el UTCI se realizó al seguir los lineamientos de la guía internacional (Bureau International des Poids et Mesures [BIPM], 2008). Las incertidumbres estándar de cada variable de entrada se determinaron a partir de los errores máximos permisibles especificados en las fichas técnicas del fabricante (Tabla 2) asumiendo una distribución de probabilidad rectangular.

Debido a que las ecuaciones de t_r de la norma ISO 7726:2025 y el polinomio del UTCI son fórmulas complejas y no lineales, la propagación de los errores se resolvió como un sistema acoplado. Este enfoque vincula el UTCI directamente con las lecturas primarias del instrumento, que evitan la duplicidad de varianzas al evaluar las variables intermedias. Los coeficientes de sensibilidad de cada parámetro se aproximaron numéricamente punto por punto para las 478 observaciones de la base de datos mediante el método de diferencias finitas centrales. Finalmente, la incertidumbre combinada total se obtuvo mediante la suma en cuadratura de los errores individuales ponderados.

Respecto a las mediciones, dado que se efectuaron en un mismo entorno y bajo condiciones simultáneas, los datos fueron analizados como series temporales pareadas, lo que permite comparar directamente los valores registrados en cada instante de tiempo. En primer lugar, se realizó un análisis descriptivo de las variables medidas, considerándose valores promedio, máximos y su evolución horaria dentro del rango de estudio (11:00–16:00 h), con el fin de identificar patrones de comportamiento térmico bajo condiciones de alta exposición a la radiación solar. En segundo lugar, se evaluaron variaciones entre mediciones pareadas en el tiempo mediante comparaciones pareadas en el tiempo, lo que permite identificar variaciones sistemáticas asociadas a la presencia de sombreado vegetal y sombreado artificial. Finalmente, se analizaron las diferencias entre los valores de t_r registrados y los valores del índice UTCI, por su relevancia en la caracterización del confort térmico exterior.

MARGEN DE INCERTIDUMBRE

Basado en el análisis metrológico de propagación acoplada (BIPM, 2008) aplicado a las 478 observaciones de

Condición de la medición	Incertidumbre combinada promedio (c) [°C]	Incertidumbre mínima (uc max) [°C]	Incertidumbre máxima (ucmax) [°C]	Incertidumbre expandida final (U) 95% Confianza [°C]
UTCI malla	± 0,115	± 0,284	± 0,412	± 0,230
UTCI parrón	± 0,137	± 0,089	± 0,076	± 0,274

Tabla 4. Análisis comparativo de la incertidumbre del cálculo de UTCI. Fuente: Elaboración de los autores

cada condición de medición, la incertidumbre combinada estándar final ($u_{c)}$ [°C] para los resultados de la t_r y del UTCI se pueden revisar en la Tabla 3 y Tabla 4. El análisis del margen de error demuestra que la precisión de la t_r depende del método elegido. El modelo de convección natural (aire en calma) es altamente estable, con un error promedio de ±0.150 °C, mientras que el de convección forzada (con viento) eleva el error medio entre ±0,516 °C y ±0,747 °C debido al sensor de viento. Este último método se vuelve inestable en calma absoluta (menos de 0,1 m/s), disparándose el error puntual a ±2,215 °C. A pesar de esto, el UTCI mantiene un error promedio menor a ±0,137 °C y un error total definitivo inferior a ±0.274 °C (con 95% de confianza). Esta estabilidad ocurre porque el sistema compensa los errores internamente: el enfriamiento directo del viento sobre el cuerpo humano se contrapone al efecto indirecto sobre el termómetro de globo, que equilibran las desviaciones del sensor en el resultado final. Esto respalda la pertinencia instrumental y del procedimiento de cálculo para el análisis comparativo desarrollado, dentro de los alcances exploratorios del estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

DATOS METEOROLÓGICOS INICIALES

Durante el período de monitoreo (01–14 de marzo de 2024), las condiciones meteorológicas registradas entre las 11:00 y las 16:00 horas evidencian un comportamiento relativamente estable, con variaciones acotadas entre días y diferencias constantes entre las dos condiciones de medición (Tabla 5). La t_a bajo malla presenta valores promedio diarios que oscilan entre 22,6 °C y 28,3 °C, mientras que bajo parrón varían entre 21,1 °C y 26,5 °C. En todos los días registrados, la temperatura del aire bajo parrón es inferior a la registrada bajo malla, con diferencias que fluctúan entre aproximadamente 1,3 °C y 2,0 °C. Las diferencias entre ambas condiciones se mantienen de forma consistente a lo largo del período, con valores más elevados en la condición de malla.

En relación con la HR, los valores registrados bajo malla de sombreo se sitúan entre 31,2 % y 46,8 %, mientras

Día	ta (°C) malla	tg (°C) malla	va (m/s) malla	HR (%) malla	ta (°C) parrón	tg (°C) parrón	va (m/s) parrón	HR (%) parrón
01-03-2024	28,2	30,4	0,3	32,3	26,5	27,7	0,3	36,5
02-03-2024	26,5	28,3	0,4	31,2	25,0	26,1	0,4	34,8
03-03-2024	24,5	26,7	0,3	33,7	22,9	24,2	0,3	37,8
04-03-2024	26,2	28,4	0,2	35,0	24,5	25,8	0,2	38,8
05-03-2024	28,3	30,3	0,3	35,0	26,5	27,6	0,3	39,1
06-03-2024	26,8	28,9	0,2	42,8	25,3	26,5	0,2	47,2
07-03-2024	23,6	25,3	0,3	38,3	22,3	23,3	0,3	41,4
08-03-2024	24,1	25,8	0,3	38,9	22,9	23,8	0,3	42,0
09-03-2024	25,3	27,1	0,3	35,3	23,8	24,9	0,3	39,5
10-03-2024	22,6	24,2	0,2	46,8	21,1	22,1	0,2	51,1
11-03-2024	25,7	27,5	0,3	37,3	24,1	25,1	0,3	41,2
12-03-2024	26,2	27,7	0,3	40,5	24,7	25,6	0,3	44,0
13-03-2024	24,1	26,0	0,3	41,6	22,2	23,4	0,3	46,8
14-03-2024	25,0	26,6	0,4	36,2	23,2	24,3	0,4	40,7

Tabla 5. Valores de días promedio por cada variable registrada. Fuente: Elaboración de los autores.

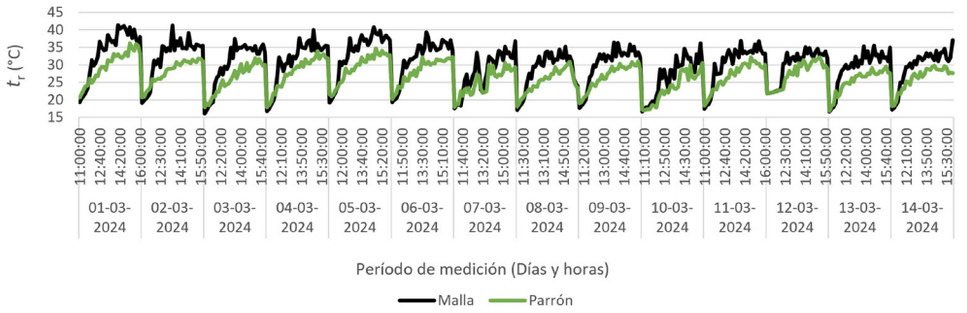


Figura 5. tr a lo largo del período de medición analizado. Fuente: Elaboración de los autores.

Día	Malla	Parrón	Diferencia Malla - Parrón
01-03-2024	34,0	29,8	4,2
02-03-2024	32,3	28,1	4,2
03-03-2024	30,2	26,1	4,1
04-03-2024	31,2	27,9	3,3
05-03-2024	33,6	29,3	4,3
06-03-2024	32,0	28,3	3,7
07-03-2024	28,0	25,1	2,9
08-03-2024	28,6	25,3	3,3
09-03-2024	30,4	26,7	3,7
10-03-2024	26,6	23,4	3,1
11-03-2024	30,6	26,9	3,8
12-03-2024	30,0	27,4	2,6
13-03-2024	29,4	25,5	3,9
14-03-2024	29,7	26,2	3,5

Tabla 6. Valores promedio diarios tr (°C) del horario analizado. Fuente: Elaboración de los autores.

que bajo parrón alcanzan rangos entre 34,8 % y 51,1 %. En todos los casos, la humedad relativa es superior bajo parrón, con diferencias que varían entre aproximadamente 3 % y 5 %. La v_a presenta valores bajos y prácticamente constantes en ambas condiciones, con registros entre 0,2 y 0,4 m/s, sin diferencias apreciables entre los puntos de medición, debido a la proximidad de los sensores para ambos casos.

Por su parte, la t_g presenta valores entre 24,2 °C y 30,4 °C bajo malla de sombreo, y entre 22,1 °C y 27,7 °C bajo parrón. Las diferencias entre ambas condiciones se mantienen de forma consistente durante todo el período, con valores superiores bajo malla. En conjunto, las condiciones meteorológicas registradas evidencian una tendencia a valores más altos de temperatura y menores niveles de HR bajo malla de sombreo, mientras que el parrón presenta condiciones con menores temperaturas y mayor HR, manteniendo velocidades de viento similares en ambas configuraciones.

COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA RADIANTE MEDIA

Durante el período de análisis, la tr presenta diferencias constantes entre las dos condiciones evaluadas. La máxima temperatura se alcanza el 01-03-2024, con 41,3 °C bajo malla a las 14:10 h, cuando en ese horario el espacio bajo parrón se encontraba con 33 °C, una diferencia de 8,3°C. Mientras tanto, la máxima temperatura alcanzada bajo el parrón se registró una hora más tarde, a las 15:10 h, con 36,2 °C, cuando la malla registró 40,8°C, es decir, 4,6°C de diferencia (Figura 5). Por otro lado, el máximo valor diario promedio bajo malla alcanza 34 °C, mientras que bajo parrón es de 29,8 °C, resultando en una diferencia de 4,2 °C, ambos observados el 01-03-2024. Se presentan

Hora de medición	Malla	Parrón	Diferencia Malla - Parrón
11:00:00	18,0	19,0	-1,0
11:30:00	20,2	21,8	-1,6
12:00:00	27,8	23,5	4,3
12:30:00	30,1	25,3	4,8
13:00:00	31,3	26,6	4,7
13:30:00	33,5	27,8	5,7
14:00:00	33,8	29,1	4,7
14:30:00	34,7	29,8	4,9
15:00:00	34,3	30,3	4,0
15:30:00	34,6	30,7	3,9
16:00:00	33,8	29,8	3,9

Tabla 7. Valores de tr (°C) cada 30 minutos en un día promedio. Fuente: Elaboración de los autores.

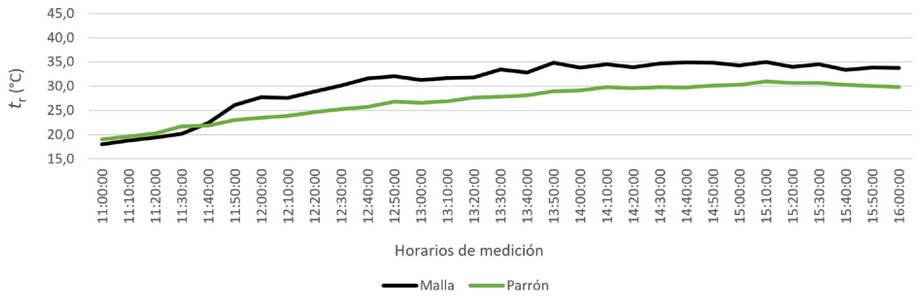


Figura 6. Comportamiento de tr en un día promedio. Fuente: Elaboración de los autores.

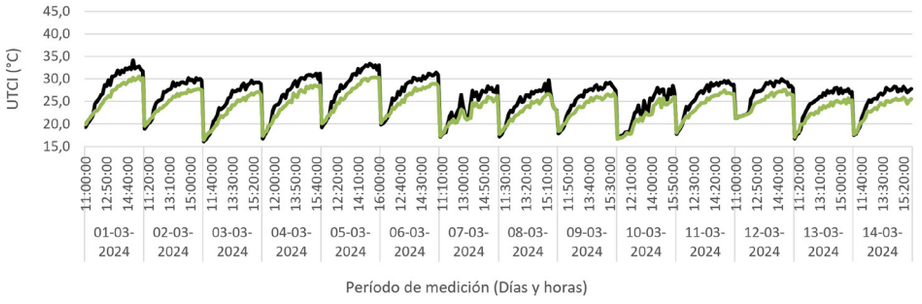


Figura 7. Índice UTCI a lo largo del período de medición analizado. Fuente: Elaboración de los autores.

valores consistentemente inferiores bajo parrón a lo largo de todo el período (Tabla 6).

El análisis del día promedio (Tabla 7 y Figura 6) revela un comportamiento con clara dependencia horaria. En los primeros intervalos de la mañana (11:00–11:30 h) la t_r bajo malla es levemente menor a la registrada bajo parrón (hasta 1,7 °C). A partir de las 12:00 h esta relación se invierte de manera sostenida: la t_r bajo malla supera consistentemente a la del parrón con diferencias que escalan hasta alcanzar valores de entre 4 y 5,9 °C entre las 13:00 y 15:00 h, coincidentes con la mayor incidencia de radiación solar directa. Desde las 15:20 hacia las 16:00 h la brecha se reduce, bajando a diferencias de entre 3,9 a 3,1 °C.

COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE UTCI

Durante el período de análisis, la UTCI presenta diferencias constantes entre las dos condiciones evaluadas. La

Día	Malla	Parrón	Diferencia Malla - Parrón
01-03-2024	28,7	26,5	2,2
02-03-2024	26,8	25,0	1,9
03-03-2024	25,0	23,1	1,9
04-03-2024	26,7	24,6	2,1
05-03-2024	28,8	26,6	2,2
06-03-2024	27,7	25,8	1,9
07-03-2024	24,0	22,5	1,5
08-03-2024	24,6	23,0	1,6
09-03-2024	25,7	23,9	1,8
10-03-2024	23,3	21,7	1,7
11-03-2024	26,2	24,2	2,0
12-03-2024	26,7	24,9	1,8
13-03-2024	25,0	22,9	2,1
14-03-2024	25,4	23,4	1,9

Tabla 8. Valores promedio UTCI (°C) del horario analizado diario. Fuente: Elaboración de los autores.

Hora de medición	Malla	Parrón	Diferencia Malla - Parrón
11:00:00	18,1	18,4	-0,4
11:30:00	19,6	20,1	-0,5
12:00:00	23,1	21,5	1,7
12:30:00	25,0	22,8	2,2
13:00:00	26,1	23,8	2,3
13:30:00	27,4	24,8	2,6
14:00:00	28,3	25,7	2,6
14:30:00	29,1	26,3	2,7
15:00:00	29,4	26,8	2,6
15:30:00	29,4	27,1	2,4
16:00:00	28,7	26,9	1,9

Tabla 9. UTCI (°C) cada 30 minutos en un día promedio. Fuente: Elaboración de los autores.

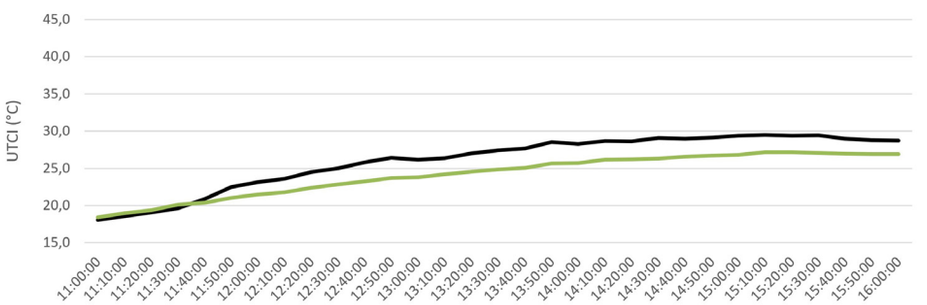


Figura 8. Comportamiento de UTCI en un día promedio. Fuente: Elaboración de los autores.

máxima temperatura se alcanza el 01-03-2024, con 34,2 °C bajo malla a las 15:10 h, cuando en ese horario el espacio bajo parrón se encontraba con 30,3 °C, una diferencia de 3,9°C. Mientras tanto, la máxima alcanzada bajo el parrón se registró 30 minutos más tarde, a las 15:40 h, con 30,5 °C, cuando la malla registró 32,8°C, es decir, 2,3°C de diferencia (Figura 7). Por otra parte, el valor promedio bajo malla de sombreo alcanza 26,0 °C, mientras que bajo parrón es de 24,1 °C. La diferencia promedio entre ambas condiciones es de 1,9 °C, con valores inferiores registrados de manera consistente bajo parrón a lo largo del periodo analizado.

En términos de valores diarios promedios máximos, el UTCI alcanza 28,8 °C bajo malla y 26,6 °C bajo parrón. La diferencia máxima observada entre ambas condiciones es de aproximadamente 2,2 °C, observados para el día 05-03-2024 (Tabla 8).

El análisis del día promedio (Tabla 9 y Figura 8) revela un comportamiento con clara dependencia horaria. En los primeros intervalos de la mañana (11:00–11:30 h) el UTCI bajo malla es levemente menor a la registrada bajo parrón, por valores entre 0,4 y 0,5 °C. A partir de las 11:40 h esta relación se invierte de manera sostenida: la UTCI bajo malla supera consistentemente a la del parrón con diferencias por sobre los 2°C en el 67,74% de los registros promedios, que alcanzan su máxima a las 13:50, con una diferencia de 2,9°C. La brecha empieza a disminuir desde las 15:50, que marca una diferencia de 1,9 °C.

El comportamiento horario del UTCI muestra una tendencia creciente entre las 11:00 y las 15:30 h, seguido de una estabilización o leve disminución hacia las 16:00 h en ambas condiciones. Las diferencias entre parrón y malla se mantienen a lo largo de todo el intervalo horario, con una separación relativamente constante entre las curvas. Las mayores diferencias se observan en el tramo central del periodo analizado, coincidente con las horas en que la t_r registraron valores mayores, comprendidas entre las 12:30 y 14:30 horas.

En función de los rangos del índice UTCI, los valores registrados bajo malla de sombreo se sitúan mayoritariamente en el rango de estrés térmico por calor durante el periodo de estudio, alcanzando en algunos casos un fuerte estrés térmico. Por su parte, los valores bajo parrón se distribuyen entre las categorías estrés térmico por calor y sin estrés térmico, con una mayor frecuencia de valores en este último (Figura 9).

Los datos levantados se condicen con lo señalado por Watanabe et al. (2014) , Kusaka et al. (2022) y Chàfer et al. (2020), quienes coinciden en la alta eficiencia de las coberturas vegetales horizontales para mitigar el estrés térmico a escala humana mediante el control del entorno radiativo y el enfriamiento evaporativo, lo que refuerza el potencial del parrón como una estrategia pasiva de

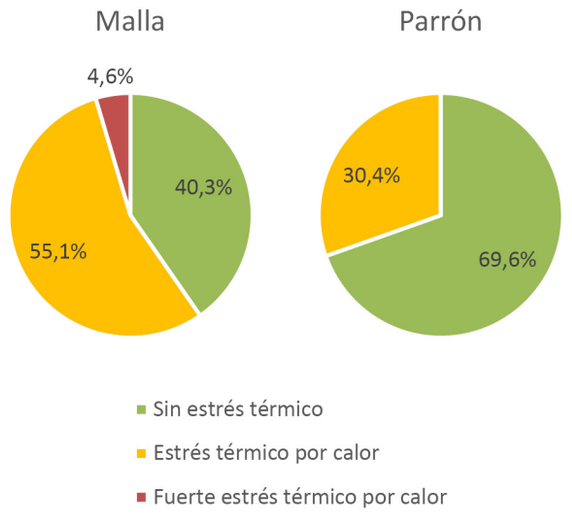


Figura 9. Frecuencias de estrés térmico UTCI. Fuente: Elaboración de los autores

acondicionamiento térmico y adaptación climática para espacios intermedios y patios en climas templados.

CONCLUSIÓN

Los resultados de este estudio evidencian que el parrón genera un espacio exterior térmicamente más favorable que la malla de sombreo artificial. Durante el período analizado, el parrón registró sistemáticamente menores t_a (con reducciones de entre 1,3 °C y 2,0 °C) y mayores niveles de HR (entre 3% y 5% más) en comparación con la malla. En términos de confort térmico, el parrón mantuvo un UTCI promedio de 24,1 °C frente a los 26,0 °C de la malla, lo que representa una reducción media de 1,9 °C y diferencias máximas diarias de hasta 2,2 °C. Estas diferencias fueron interpretadas considerando el análisis de incertidumbre incorporado al estudio, lo que permitió contextualizar los márgenes de error asociados a las mediciones instrumentales y al cálculo de indicadores derivados como la temperatura radiante media y el UTCI.

La disminución de la t_r se identifica como el factor determinante en la mejora del confort. Bajo el parrón, la t_r fue consistentemente menor, con diferencias diarias promedio de entre 2,6 °C y 4,3 °C respecto a la malla, que alcanzan brechas de hasta 5,9 °C en las horas de mayor carga radiativa. Estos hallazgos sugieren que no todas las sombras ofrecen el mismo desempeño; mientras la malla actúa como un sistema inerte limitado a la obstrucción solar, el parrón funciona como un regulador térmico activo que combina el sombreado con procesos bioclimáticos de evapotranspiración y menores temperaturas superficiales.

Estos resultados refuerzan el potencial del parrón como una estrategia pasiva de acondicionamiento térmico y adaptación climática para espacios intermedios y patios en climas templados. No obstante, su implementación enfrenta limitaciones prácticas como el tiempo de crecimiento, la necesidad de soporte estructural y la dependencia de la densidad del follaje. Asimismo, dado el enfoque experimental exploratorio del estudio, una limitación metodológica es la proximidad de los puntos de medición, lo que pudo generar una ligera transferencia de humedad desde el parrón hacia el área de la malla. A ello se suma que la condición de malla pudo estar parcialmente influida por la vegetación del entorno inmediato. Por tanto, los resultados deben entenderse como evidencia localizada sobre dos condiciones próximas de sombra, al evitar extrapolaciones generales no sustentadas por el diseño experimental.

Como futuras líneas de investigación, se sugiere analizar el impacto de estos sombreaderos sobre los recintos interiores adyacentes y evaluar cómo la variabilidad de las especies vegetales influye en la magnitud del enfriamiento, con el fin de optimizar su uso como herramienta de resiliencia urbana a escala doméstica. Asimismo, se debe considerar que las mediciones se realizaron en marzo, futuros estudios debieran evaluar periodos estivales más cálidos, donde las diferencias observadas podrían adquirir mayor incidencia, especialmente en el UTCI. También se recomienda considerar escenarios de sombra físicamente más independientes, superficies de sombreado equivalentes y una mayor separación entre puntos de medición, con el propósito de robustecer la comparabilidad entre configuraciones vegetales e inertes.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, N.A.; Curación de datos, R.F.; Análisis formal, N.A.; Adquisición de financiación N.A.; Investigación, N.A., R.F., D.C.; Metodología, N.A., R.F, D.C.; Administración de proyecto, N.A.; Recursos, N.A., R.F.; Software. R.F.; Supervisión, N.A.; Validación, N.A., R.F.; Visualización, R.F, D.C.; Escritura – borrador original, N.A., R.F., D.C.; Escritura – revisión y edición, N.A, D.C.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue desarrollada en el marco del Grupo de Investigación en Confort Ambiental y Pobreza Energética (CO-PE) de la Universidad del Bío-Bío (código GI2310945).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aravena Alvarado, R. (Ed.). (2015). *Patrimonio vitivinícola: aproximaciones a la cultura del vino en Chile*. Ediciones Biblioteca Nacional. https://centropatrimonio.uc.cl/wp-content/uploads/2023/01/Patrimonio-vitivinicola-aproximaciones-a-la-cultura-del-vino-en-Chile-1.pdf

Arias-Jiménez, N., Trebilcock-Kelly, M., Figueroa-SanMartín, R., & González-Cáceres, A. (2026). Experimental evaluation of the impact of roofing materials and natural ventilation on attic overheating in a temperate Chilean climate. *Building Research & Information, 54*(5), 573–587. https://doi.org/10.1080/09613218.2025.2607633

Arias Tapiero, J. C., Ortega, J., & Vasconcelos, G. (2025). A methodology for analysing the impact of contemporary transformation processes in vernacular built environments. *Built Heritage, 9*(1), 51. https://doi.org/10.1186/s43238-025-00220-0

Błażejczyk, K., Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Epstein, Y., Psikuta, A., & Kampmann, B. (2013). An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Geographia Polonica, 86*(1), 5–10. https://doi.org/10.7163/GPol.2013.1

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning, 97*(3), 147–155. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006

Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., & Havenith, G. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology, 56*(3), 481–494. https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1

Bureau International des Poids et Mesures [BIPM]. (2008). *Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.* JCGM 100. https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf

Chàfer, M., Pisello, A. L., Piselli, C., & Cabeza, L. F. (2020). Greenery System for Cooling Down Outdoor Spaces: Results of an Experimental Study. *Sustainability, 12*(15), 5888. https://doi.org/10.3390/su12155888

COST European Cooperation in Scientific and Technical Research. (20 de abril de 2026) *COST Action 730 on UTCI*. UTCI. https://www.utci.org/utci_calc.php

De Cristo, E., Evangelisti, L., Barbaro, L., De Lieto Vollaro, R., & Asdrubali, F. (2025). A Systematic Review of Green Roofs' Thermal and Energy Performance in the Mediterranean Region. *Energies, 18*(10), 2517. https://doi.org/10.3390/en18102517

Servicios Climáticos (20 de marzo de 2026) Temperatura Histórica Mensual de la Estación. Dirección General de Aeronáutica Civil. https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historico/temperaturaHistoricaMes/360047/3

Elgheznawy, D., & Eltarabily, S. (2021). The impact of sun sail-shading strategy on the thermal comfort in school courtyards. *Building and Environment, 202*, 108046. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108046

Gherri, B. (2023). The Role of Urban Vegetation in Counteracting Overheating in Different Urban Textures. *Land, 12*(12), 2100. https://doi.org/10.3390/land12122100

Guerrero-Rubio, J., Sendra, J. J., Fernández-Agüera, J., & Oteiza, I. (2017). Modelos predictivos del consumo energético de climatización asociado a soluciones de fachadas en Madrid a partir de la monitorización en módulos de ensayo. *Informes de La Construcción, 69*(548), e225. https://doi.org/10.3989/id.54794

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2023). Technical Summary. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 35–144). frontmatter, Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.002

Jim, C. Y. (2015). Thermal performance of climber greenwalls: Effects of solar irradiance and orientation. *Applied Energy, 154*, 631–643. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.077

Kusaka, H., Asano, Y., & Kimura, R. (2022). Wisteria trellises and tents as tools for improved thermal comfort and heat stress mitigation: Meteorological, physiological, and psychological analyses considering the relaxation effect of greenery. *Meteorological Applications, 29*(1), e2046. https://doi.org/10.1002/met.2046

Lee, H., Park, S., & Mayer, H. (2025). Approach for the vertical wind speed profile implemented in the UTCI basics blocks UTCI applications at the urban pedestrian level. *International Journal of Biometeorology, 69*(3), 567–580. https://doi.org/10.1007/s00484-024-02835-x

Lee, I., Voogt, J. A., & Gillespie, T. J. (2018). Analysis and Comparison of Shading Strategies to Increase *Human Thermal Comfort in Urban Areas. Atmosphere, 9*(3), 91. https://doi.org/10.3390/atmos9030091

Liu, T., Wang, Y., Zhang, L., Xu, N., & Tang, F. (2025). Outdoor Thermal Comfort Research and Its Implications for Landscape Architecture: A Systematic Review. *Sustainability, 17*(5), 2330. https://doi.org/10.3390/su17052330

López-Cabeza, V. P., Diz-Mellado, E., Rivera-Gómez, C. A., & Galán-Marín, C. (2022). Shade and Thermal Comfort in Courtyards: Experimental versus Simulation Results. *Buildings, 12*(11), 1961. https://doi.org/10.3390/buildings12111961

MacIvor, J. S., & Margolis, L. (2015). Cooling of a south-facing wall using a double-skin green façade in a temperate climate. *ISHS Acta Horticulturae, 1085*, 185–194. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1085.30

Mihalakakou, G., & Romeos, A. (2026). Mean radiant temperature in outdoor urban environments: From radiative physics to data-driven and hybrid modelling frameworks. *Building and Environment, 297*, 114595. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2026.114595

Nasr, Y., El Zakhem, H., Hamami, A. E. A., El Bachawati, M., & Belarbi, R. (2024). Comprehensive Assessment of the Impact of Green Roofs and Walls on Building Energy Performance: A Scientific Review. *Energies, 17*(20), 5160. https://doi.org/10.3390/en17205160

Perini, K., & Magliocco, A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening, 13*(3), 495–506. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.003

Salonen, T., Hollands, J., Sesto, E., & Korjenic, A. (2022). Thermal Effects of Vertical Greening in Summer: An Investigation on Evapotranspiration and Shading of Façade Greening in Vienna. *Buildings, 12*(10), 1705. https://doi.org/10.3390/buildings12101705

Umishio, W., Ikaga, T., Fujino, Y., Ando, S., Kubo, T., Nakajima, Y., Kagi, N., Hoshi, T., Suzuki, M., Kario, K., Yoshimura, T., Yoshino, H., & Murakami, S. (2024). Spatial and temporal indoor temperature differences at home and perceived coldness in winter: A cross-sectional analysis of the nationwide Smart Wellness Housing survey in Japan. *Environment International, 186*, 108630. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108630

Wang, Y., Zhao, N., Yin, X., Wu, C., Chen, M., Jiao, Y., & Yue, T. (2023). Global future population exposure to heatwaves. *Environment International, 178,* 108049. https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108049

Watanabe, S., Nagano, K., Ishii, J., & Horikoshi, T. (2014). Evaluation of outdoor thermal comfort in sunlight, building shade, and pergola shade during summer in a humid subtropical region. *Building and Environment, 82*, 556–565. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.002

Wu, Z., Shi, Y., Ren, L., & Hang, J. (2024). Scaled outdoor experiments to assess impacts of tree evapotranspiration and shading on microclimates and energy fluxes in 2D street canyons. *Sustainable Cities and Society, 108*, 105486. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105486

Zhang, Y., Yang, Y., Zhang, L., Zhao, C., Yan, J., Liu, M., & Zhao, L. (2022). Seasonal variation in leaf area index and its impact on the shading effects of vertical green facades in subtropical areas. *Building and Environment, 225*, 109629. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109629

Zhao, Y., Zhao, K., Zhang, X., Zhang, Y., & Du, Z. (2024). Assessment of combined passive cooling strategies for improving outdoor thermal comfort in a school courtyard. *Building and Environment, 252*, 111247. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111247

Zheng, X., Wang, W., Chen, J., Chen, Q., Luo, S., Wang, H., Hu, W., & Pan, L. (2025). Influence of vertical greenery systems with different greenery coverage ratios on microclimate improvement in street canyons by scaled outdoor experiments. *Building and Environment, 267*(Part B), 112158. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112158

Edificio de Innovación
Universidad del Bío-Bío
Pego von Ellrichshausen
2021



BANMA 2025

Objeto singular Concepción