

Cara Pati
Paysan von Ellrichshausen
2005



Revista
Hábitat
Sustentable

ISSN 0719-0700
Vol. 14 N°. 2
dic
2024

BARRIO 2022



Objeto singular Columna



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO



Revista
Hábitat
Sustentable

ISSN 0719-0700
Vol. 14 N°. 2
diciembre
2024



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO

RECTOR:

MAURICIO CATALDO MONSALVES

DECANO FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO:

ROBERTO EDUARDO BURDILES ALLENDE

EDITORIA RESPONSABLE:

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

Alexis Pérez-Fargallo / Departamento Ciencias de la Construcción, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
mtrebilc@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 / Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
alvarezr.arq@gmail.cl

CORRECCIÓN DE ESTILO:

Dra. OLGA OSTRIA REINOSO / Departamento Estudios Generales

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, JornaTOcs 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, Alexis Pérez-Fargallo
- 08 **ESTUDIO TÉRMICO DE MUROS VENTILADOS TRADICIONALES EN CONDICIONES CLIMÁTICAS TROPICALES DEL CATATUMBO, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA**
Carmen Xiomara Díaz-Fuentes
- 20 **COMPARATIVA Y CALIBRACIÓN DE ÍNDICES DE CONFORT PARA LA TEMPORADA CÁLIDA EN UNA CIUDAD SEMI-ÁRIDA DEL NOROESTE DE MÉXICO**
Hiram Eduardo Urias-Barrera
- 32 **ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DE ESTRATEGIAS PARA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN VIVIENDA, APLICANDO LA NORMATIVIDAD VIGENTE EN EL NOROESTE DE MÉXICO**
Cecilia Galindo-Borbón, Ana Borbón-Almada, José M. Ochoa-de-la-Torre, Irene Marincic-Lovriha
- 48 **ANÁLISIS DE MORFOLOGÍAS EVOLUTIVAS CON CFD: MEJORAR LA VENTILACIÓN NATURAL EN VIVIENDA DE PATIO CENTRAL, EN ZONAS SEMI CÁLIDAS DE LATINOAMÉRICA**
Diego Rodríguez-de-Ita, Liliana Beatriz Sosa-Compeán
- 60 **LA NATURALEZA EN LOS ESPACIOS PARA EL ADULTO MAYOR: UN ENFOQUE BIOFÍLICO, EN EL MUNDO**
Hanlly del Pilar Velarde-Espinoza, Alberto Carlos Llanos-Chuquipoma
- 76 **POTENTIAL OF A LOW-COST SYSTEM FOR MEASURING INDOOR ENVIRONMENTAL QUALITY IN LATIN AMERICAN EXTREME CLIMATES TOWARDS ENERGY EQUITY**
Claudia Eréndira Vázquez-Torres, Renán Gabriel Quijano-Cetina, Israel Sánchez-Domínguez, Bassam Ali
- 86 **EVALUACIÓN DE BARRILES DE LLUVIA Y TECHOS VERDES PARA MITIGAR INUNDACIONES EN CLIMA CÁLIDO SUBHÚMEDO, ESTADO DE COLIMA, MÉXICO**
Samir Josué Figueroa-Avalos, Dora Angélica Correa-Fuentes, Jesús López-de-la-Cruz, Jorge Armando Gutiérrez-Valencia, Ignacio Barajas-Ávalos
- 98 **PRÁCTICAS DEL HABITAR HACIA LA ADAPTACIÓN Y RESILIENCIA EN UN ENTORNO ANFIBIO EN COLOMBIA**
Angélica Chica-Segovia
- 112 **BIOCOMPOSITE OF BANANA FIBER, PEANUT SHELLS FROM MANABÍ (ECUADOR), AND RECYCLED EXPANDED POLYSTYRENE**
Eddie Efrén Echeverría-Maggi, Vicente Flores-Alés, Juan Jesus Martin-del-Rio
- 122 **INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE PROTECCIONES SOLARES EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN CLIMAS ÁRIDOS TEMPLADOS FRÍOS, MENDOZA, ARGENTINA**
Alicia Betman, Julieta Balter, Stella Maris Donato, Carolina Ganem
- 134 **ANÁLISIS TÉRMICO DE MUROS DE QUINCHA ALIVIANADA PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DE DISEÑO EN ARGENTINA**
Maria Guadalupe Cuitiño-Rosales, Alejandro Domínguez, Gabriel Vaccaro, Victoria Di-Cesare

EDITORIAL

En un sur global tan ávido de soluciones prácticas y accesibles, ¿qué tan próximos estamos entre la ciencia que producimos y su aplicación en respuestas tangibles? Si bien esta pregunta podría haber tenido validez en distintos momentos de nuestra historia, en la actualidad reúne nuevas y complejas variables alrededor de sí.

Desde sus inicios, la arquitectura y el ambiente construido se han propuesto fundamentalmente protegernos de riesgos y amenazas, naturales o no, incluidas aquellas asociadas a las inclemencias climáticas esperables cada año. Sin embargo, tal como lo venimos “sorpresivamente” experimentando, estas variables climáticas ya no son tan regulares: el tan famoso cambio climático. Esto nos ha colocado en un escenario de incertidumbre respecto a las soluciones que debemos proponer o adecuar en nuestros edificios. Así, en los últimos años han surgido dos palabras clave frente a este fenómeno: adaptación y mitigación. No obstante, para que el ambiente construido responda a estas directrices, debería diseñarse de manera que interactúe complementariamente con el contexto urbano y socioambiental en el cual está inserto. Esto implicaría mejorar el desempeño individual sin comprometer el de los demás.

Por otro lado, en este mismo contexto global hemos aprendido que no basta con optimizar la operación de los edificios. También debemos comprender y solucionar de mejor manera cómo disminuir los impactos asociados a la construcción a lo largo de todo su ciclo de vida. Pero las variables no hacen más que sumarse. Retomando la motivación inicial planteada en esta editorial, podemos agregar a la lista aspectos relacionados con la sustentabilidad económica y ambiental de nuestro sur global.

En el ciclo postcolonial de nuestro desarrollo social y tecnológico, persisten densas demandas de un hábitat propio, digno, accesible y sustentable, que sea capaz de adecuarse, además, a las solicitudes globales mencionadas anteriormente. En la inmensa heterogeneidad de nuestra región, y considerando el volumen de los posibles beneficiarios, los desafíos apuntan y persisten hacia soluciones concretas que puedan reproducirse de manera rápida y efectiva. Igualmente, las investigaciones dirigidas a la evaluación, solución, recuperación y adecuación del parque edilicio ya construido son nichos que aún precisan ser abordados. Si bien la demanda de nuevos edificios continúa creciendo, los existentes, con su inminente impacto a lo largo de su ciclo de vida, necesitan ser adaptados y preparados para mitigar impactos en el microclima, como el fenómeno de la isla de calor urbana. Conviene, además, priorizar las investigaciones en sectores socioeconómicamente vulnerables, ya que suelen ser los más afectados por un diseño ineficiente de edificios y ciudades.

Esta amplia gama de variables que las condiciones actuales exigen para la construcción de un hábitat sustentable

también insinúa la oportunidad del trabajo colaborativo e interdisciplinario. Tramas complejas demandan convergencia de distintas áreas, como la climatología urbana, el trabajo social o los avances informáticos para optimizar procesos, por nombrar algunas. Así, cuando las preguntas de investigación conducen inherentemente al cruce de conocimientos, es probable que se obtengan mejores respuestas a partir de un enfoque interdisciplinario. Esta perspectiva será cada vez más bienvenida ante los enormes desafíos que enfrentamos en el presente siglo.

Asimismo, los rápidos avances tecnológicos que estamos experimentando representan grandes oportunidades de aplicación en nuestro campo. El desarrollo de modelos y el aprendizaje de máquinas como herramientas auxiliares constituyen un salto enorme en la comprensión de distintos fenómenos inherentes o correlacionados con el diseño y la construcción de edificaciones. Su utilización sigue siendo un área importante de exploración para generar soluciones tangibles, como la propuesta de estándares mejor ajustados a las nuevas demandas. Precisamente, esta es una de las áreas con mayores oportunidades en nuestra región, ya que, dentro de la vasta diversidad bioclimática y sociocultural, aún queda mucho trabajo por hacer. Las investigaciones que apunten a evaluar y adaptar estándares existentes o a impulsar la creación de nuevos códigos de edificación no solo son necesarias, sino apremiantes.

El contexto actual nos enfrenta, sin duda, a enormes desafíos para las próximas décadas, más aún considerando que las razones por las cuales hemos llegado hasta aquí todavía se resisten a ser transformadas. No obstante, habitamos una región con enormes potencialidades naturales, culturales y constructivas, llena de oportunidades de investigación aún por descubrir y desarrollar.

Desde la revista *Hábitat Sustentable*, invitamos a seguir pesquizando, innovando y colaborando para construir un sur global más justo y preparado para las demandas actuales y venideras. Reivindicamos nuestras habituales temáticas de interés y reforzamos la invitación a abordar aquellas mencionadas explícita o implícitamente en esta editorial, como los trabajos que benefician el desempeño del parque edilicio existente, análisis de la relación entre el edificio y el clima urbano, estudios que contribuyan a la evaluación o creación de estándares de habitabilidad, las investigaciones interdisciplinarias en el campo, aquellas que combatan la pobreza energética, y el uso de tecnologías informáticas para la optimización de modelos y procesos. Estas temáticas, o incluso el cruce entre ellas, son de especial interés para nuestra próxima edición. Con este llamado, les deseamos búsquedas amenas y productivas, siempre con un espíritu curioso, sensible e imaginativo.

EDITORIAL

In a Global South so eager for practical and accessible solutions, how close are we between the science we produce and its application to gaining tangible answers? Although this question might have been valid at different times in our history, it currently has new and complex variables.

Since its inception, architecture and the built environment have been fundamentally proposed to protect us from risks and threats, natural or otherwise, including those associated with the inclement weather expected every year. However, as we have been “surprisingly” experiencing, these climatic variables are no longer so regular, thanks to the famous climate change. This has left us uncertain about the solutions we must propose to adapt our buildings. Thus, two keywords have emerged to face this phenomenon in recent years: adaptation and mitigation. However, for the built environment to comply with these guidelines, it should be designed to interact complementarily with the urban and socio-environmental context in which it is inserted. This would imply improving individual performance without compromising that of others.

On the other hand, in this same global context, we have learned that optimizing building operations is not enough. We also need to better understand how to reduce construction impacts throughout their life cycle. But the variables only add up. Returning to the initial motivation behind this editorial, we can add to the list aspects related to our Global South's economic and environmental sustainability.

In the postcolonial cycle of our social and technological development, significant demands remain for a proper, dignified, accessible, and sustainable habitat that can adapt to the aforementioned global requests. In the immense heterogeneity of our region, and considering the volume of potential beneficiaries, the challenges point and persist towards concrete solutions that can be reproduced quickly and effectively. Likewise, research aimed at evaluating, solving, recovering, and adapting the already-built building stock is a niche that still needs to be addressed. Although the demand for new buildings continues to grow, existing ones, with their imminent impact throughout their life cycle, must be adapted and prepared to mitigate the effects of the microclimate, such as the urban heat island phenomenon. It is also advisable to prioritize research in socio-economically vulnerable sectors, since they are usually the ones most affected by inefficient design of buildings and cities.

This wide range of variables, which current conditions demand to build a sustainable habitat, also hints at the opportunity for collaborative and interdisciplinary work. Complex issues demand the convergence of different areas, such as urban climatology, social work, or IT progress, to optimize processes, to name a few. Thus, an interdisciplinary approach will likely yield better answers when research questions inherently lead to an intersection

of knowledge. This perspective will be increasingly welcomed for the enormous challenges we will face this century.

Similarly, the rapid technological progress we are experiencing represents excellent opportunities for application in our field. The development of models and machine learning as auxiliary tools constitute a huge leap in understanding different phenomena inherent or correlated with the design and construction of buildings. Its use continues to be an important area of exploration to generate tangible solutions, such as the proposal of standards that better fit new demands. This is one of the areas with the most significant opportunities in our region since there is still much work to be done within the vast bioclimatic and socio-cultural diversity. Research aimed at evaluating and adapting existing standards or promoting the creation of new building codes is not only necessary, but urgent.

The current context undoubtedly confronts us with enormous challenges for the coming decades, even more so considering that the reasons why we have come this far still resist transformation. However, we live in a region with enormous natural, cultural, and constructive potential, full of research opportunities yet to be discovered and developed.

From *Hábitat Sustentable*, we invite you to continue researching, innovating, and collaborating to build a more just Global South prepared for current and future demands. We restate our usual topics of interest and reinforce the invitation to address those mentioned explicitly or implicitly in this editorial, such as works that benefit the performance of the existing building stock, analysis of the relationship between the building and the urban climate, studies that contribute to the evaluation or creation of habitability standards, interdisciplinary research in the field, those that fight energy poverty, and the use of computer technologies to optimize models and processes. These topics, or their transversal nature, are of special interest to our next issue. With this call, we wish you enjoyable and productive pursuits, always with a curious, sensitive, and imaginative spirit.

EDITORIAL

Em um sul global tão ávido por soluções práticas e acessíveis, qual é a distância entre a ciência que produzimos e sua aplicação em respostas tangíveis? Embora essa pergunta possa ter sido válida em diferentes momentos de nossa história, hoje ela reúne novas e complexas variáveis ao seu redor.

Desde sua criação, a arquitetura e o ambiente construído buscaram, fundamentalmente, proteger-nos de riscos e perigos, naturais ou não, incluindo aqueles associados às intempéries esperadas a cada ano. No entanto, como estamos “surpreendentemente” vivenciando, essas variáveis climáticas já não são tão regulares: a tão discutida mudança climática. Isso tem nos colocado em um cenário de incertezas quanto às soluções que devemos propor ou adaptar em nossos edifícios. Assim, nos últimos anos, duas palavras-chave emergiram diante deste fenômeno: adaptação e mitigação. Entretanto, para que o ambiente construído responda a essas diretrizes, ele deve ser projetado de forma a interagir complementariamente com o contexto urbano e socioambiental em que está inserido. Isso implicaria melhorar o desempenho individual sem comprometer o dos demais.

Por outro lado, nesse mesmo contexto global, aprendemos que não basta otimizar a operação dos edifícios. Também precisamos entender melhor e analisar como reduzir os impactos associados à construção durante todo o seu ciclo de vida. As variáveis, porém, não param de se acumular. Retomando a motivação inicial deste editorial, podemos adicionar à lista aspectos relacionados à sustentabilidade econômica e ambiental do nosso Sul Global.

No ciclo pós-colonial de nosso desenvolvimento social e tecnológico, persistem fortes demandas por um habitat próprio, digno, acessível e sustentável, que também seja capaz de se adaptar às demandas globais mencionadas anteriormente. Na imensa heterogeneidade de nossa região, e considerando o volume de potenciais beneficiários, os desafios continuam apontando para soluções concretas que possam ser reproduzidas de forma rápida e eficaz.

Da mesma forma, pesquisas voltadas para a avaliação, solução, recuperação e adaptação do parque imobiliário existente são nichos que ainda precisam ser abordados. Enquanto a demanda por novos edifícios continua a crescer, os edifícios existentes, com seu impacto iminente ao longo de todo o ciclo de vida, precisam ser adaptados e preparados para atenuar os impactos no microclima, como o fenômeno das ilhas de calor urbanas. Além disso, é importante priorizar pesquisas voltadas aos setores socioeconomicamente vulneráveis, pois eles costumam ser os mais impactados por projetos ineficientes de edificação e urbanismo.

Essa vasta gama de variáveis exigidas pelas condições contemporâneas para a construção de um habitat sustentável

sugere, também, a oportunidade de trabalho colaborativo e interdisciplinar. Planos complexos requerem a convergência de diferentes áreas do conhecimento, como a climatologia urbana, o trabalho social ou os avanços da informática voltados à otimização de processos, apenas para citar alguns exemplos. Assim, quando questões de pesquisa conduzem inerentemente ao cruzamento de saberes, as respostas obtidas por meio de abordagens interdisciplinares tendem a ser mais eficazes. Tal perspectiva será cada vez mais bem-vinda frente aos desafios monumentais que enfrentamos neste século.

Paralelamente, os rápidos avanços tecnológicos que vivenciamos atualmente oferecem grandes oportunidades de aplicação em nosso campo. O desenvolvimento de modelos computacionais e o aprendizado de máquina (Machine Learning) como ferramentas auxiliares representam um avanço significativo na compreensão de diferentes fenômenos inerentes ou correlacionados ao projeto e à construção de edifícios. A aplicação dessas tecnologias continua sendo uma área fundamental de exploração para a geração de soluções tangíveis, como a proposta de normas mais adequadas às novas demandas. Essa é, justamente, uma das áreas de maior potencial em nossa região, considerando a vasta diversidade bioclimática e sociocultural, que ainda oferece amplas oportunidades de pesquisa e intervenção. Estudos que busquem avaliar e adaptar normas existentes ou fomentar a criação de novos códigos de construção não são apenas necessários, mas urgentes.

O contexto atual nos coloca, sem dúvida, diante de desafios enormes para as próximas décadas, especialmente considerando que as razões que nos trouxeram até aqui ainda resistem a ser transformadas. Contudo, habitamos uma região repleta de potenciais naturais, culturais e construtivos, com vastas oportunidades de pesquisa ainda por explorar e desenvolver.

Em nome da revista *Habitat Sustentável*, convidamos a comunidade acadêmica e profissional a continuar pesquisando, inovando e colaborando para construir um Sul Global mais justo e preparado para as demandas atuais e futuras. Reiteramos nossas temáticas de interesse habituais e reforçamos o convite para explorar os tópicos mencionados explícita ou implicitamente neste editorial, tais como trabalhos que promovam a melhoria do desempenho do parque imobiliário existente, análises das interações entre edifícios e o clima urbano, estudos voltados à avaliação ou criação de padrões de habitabilidade, pesquisas interdisciplinares, que promovam o combate à pobreza energética ou que estimulem o uso de tecnologias computacionais para a otimização de modelos e processos. Estas temáticas, assim como possíveis interseções entre elas, são de especial interesse para nossa próxima edição. Com este chamado, desejamos a todos que suas atividades de pesquisa sejam agradáveis e produtivas, sempre permeadas por curiosidade, sensibilidade e imaginação.

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



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



ESTUDIO TÉRMICO DE MUROS VENTILADOS TRADICIONALES EN CONDICIONES CLIMÁTICAS TROPICALES DEL CATATUMBO, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA

THERMAL STUDY OF TRADITIONAL VENTILATED WALLS IN THE TROPICAL CLIMATIC CONDITIONS OF CATATUMBO, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA

ESTUDO TÉRMICO DE PAREDES VENTILADAS TRADICIONAIS NAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS TROPICAIS DE CATATUMBO, NORTE DE SANTANDER, COLÔMBIA

Carmen Xiomara Díaz-Fuentes

Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales.

Estudiante de Doctorado Gestión de la Innovación Tecnológica, Nodo de Innovación (UANDES) - Docente, Departamento de Arquitectura (UFPS)

Universidad de Los Andes - Universidad Francisco de Paula Santander, Bogotá - San José de Cúcuta, Colombia

<https://orcid.org/0000-0002-8223-5887>

carmenxiomaradf@ufps.edu.co

RESUMEN

La propuesta de investigación está orientada a identificar una serie de tipologías de muros de cerramiento ventilados tradicionales del mercado de la construcción, como calados, celosías y paneles metálicos con el fin de desarrollar un estudio térmico bajo condiciones climáticas del Catatumbo en Norte de Santander, Colombia. La metodología es teórica a través de simulaciones de transferencia de calor bajo el método de elementos finitos en ANSYS para identificar la relación entre la permeabilidad de superficies y la incidencia en el comportamiento de temperaturas y flujos de calor. Los resultados exponen que las tipologías más permeables, como calados y celosías, registran menos transferencia de energía y temperatura a las tipologías menos permeables, como los paneles metálicos. Además, demostró que existen otros factores como forma y propiedades térmicas de los materiales que conforman las unidades constructivas. Finalmente, el estudio térmico de muros ventilados consolida información técnica de alternativas de cerramiento tradicionales como guía de diseño y planificación de viviendas y edificaciones en zonas de posconflicto, con el fin de promover el confort y la calidad del hábitat en la población mencionada.

Palabras clave

ventilación, transferencia de calor, simulación, materiales de construcción

ABSTRACT

This research proposal aims to identify a series of typologies of traditional ventilated cladding walls of the construction market, such as fretwork, lattice, and metal panels, to conduct a thermal study under the climatic conditions of Catatumbo in Norte de Santander, Colombia. The methodology is theoretical. It uses heat transfer simulations under the finite element method in ANSYS to identify the relationship between the permeability of surfaces and the impact on the behavior of temperatures and heat fluxes. The results show that the more permeable typologies, such as fretwork and lattice, register less energy and temperature transfer than the less permeable typologies, such as metallic panels. It also showed other factors, such as the shape and thermal properties of the construction units' materials. Finally, the thermal study of ventilated walls consolidates technical information on traditional enclosure alternatives as a guide for designing and planning housing and buildings in post-conflict zones to promote comfort and habitat quality in the aforementioned population.

Keywords

ventilation, heat transfer, simulation, building materials.

RESUMO

A proposta de pesquisa está orientada a identificar uma série de tipologias de paredes de revestimento ventiladas tradicionais do mercado da construção, tais como tramas, treliças e painéis metálicos, a fim de desenvolver um estudo térmico sob as condições climáticas do Catatumbo no Norte de Santander, Colômbia. A metodologia é teórica por meio de simulações de transferência de calor com o método de elementos finitos no ANSYS para identificar a relação entre a permeabilidade das superfícies e a incidência no comportamento das temperaturas e dos fluxos de calor. Os resultados mostram que as tipologias mais permeáveis, como tramas e treliças, registram menor transferência de energia e temperatura em relação às tipologias menos permeáveis, como painéis metálicos. Mostraram também que existem outros fatores, como a forma e as propriedades térmicas dos materiais que compõem as unidades construtivas. Por fim, o estudo térmico de paredes ventiladas consolida informações técnicas sobre alternativas tradicionais de fechamento como guia para o projeto e o planejamento de moradias e edifícios em áreas pós-conflito, com o objetivo de promover o conforto e a qualidade do habitat da população mencionada.

Palavras-chave:

ventilação, transferência de calor, simulação, materiais de construção

INTRODUCCIÓN

La incorporación de estrategias de ventilación natural en proyectos arquitectónicos no sólo promueve el confort y el bienestar de los ocupantes (Ji, Lomas y Cook, 2009; Pacheco Ochoa, Jiménez Pérez y Ramírez Pérez, 2021), sino también, tiene un impacto significativo en la eficiencia energética y en la sostenibilidad de los edificios (Mercado et al., 2018; Balter, Ganem y Barea, 2020). Si bien es claro, la ventilación natural se refiere al proceso de la circulación y flujo del aire en un espacio determinado con aberturas estratégicas, condicionado por factores como el clima, la dirección del viento, la orientación de la fachada, entre otros (Giraldo y Herrera, 2017; Mercado et al., 2018; Pacheco Ochoa, Jiménez Pérez y Ramírez Pérez, 2021).

En este orden de ideas, la optimización de la calidad del aire y el confort, a través de las renovaciones del aire interior y la regulación de la temperatura, la ventilación natural mejora aspectos como la salud física y mental de los usuarios, logrando altos niveles de productividad según las actividades de cada espacio (Pacheco Ochoa, Jiménez Pérez y Ramírez Pérez, 2021). En casos contrarios, donde no existe un diseño eficiente de sistemas de ventilación natural, surge el fenómeno del síndrome del edificio enfermo, el que, es conocido como el estado de una edificación con problemáticas en términos de confort, riesgo de ergonomía del usuario, fomento de enfermedades, entre otros (Jansz, 2017). Esto quiere decir que, el hecho de una edificación con sistemas de ventilación óptimos es una estrategia de prevención de la propagación de enfermedades virales como el coronavirus (Gómez-Porter, 2021; Álvarez Rodríguez, 2022).

No obstante, la ventilación no sólo se limita a aberturas como ventanas o puertas, ya que, existen contextos geográficos con condiciones climáticas críticas que, a pesar de contar con entradas y salidas de aire, la solución es insuficiente y, por ende, el espacio es inhabitable (Atkinson et al., 2009; Batterman et al., 2017; Vartires et al., 2018; Calama-González et al., 2019; Cedeño-Quijada et al., 2022). Ante estas situaciones, surgen múltiples estrategias de enfriamiento como la ventilación nocturna, las chimeneas solares y las envolventes ventiladas que demuestran los beneficios de confort y ahorros de consumo energético (Giraldo y Herrera, 2017; Mercado et al., 2018; Balter, Ganem y Barea, 2020).

Autores han demostrado que las ventajas varían de acuerdo a la estrategia de ventilación implementada en la edificación. Por ejemplo, la ventilación nocturna con apertura de ventanas intervenidas por el usuario logra reducciones entre 4°C y 5°C según la altura y volumen del espacio, lo que, se traduce en un 50% de ahorro energético comparado con el consumo diurno (Mercado et al., 2018). Asimismo, la rehabilitación de edificios con implementación de envolventes ventiladas en las

fachadas reduce hasta el 32% de consumo energético (Balter, Ganem y Barea, 2020). Otra solución menos convencional como las chimeneas solares en sistemas de cubierta renueva el aire y amortigua las cargas térmicas sin afectar la estructura de la vivienda tradicional (Giraldo y Herrera, 2017).

A pesar que la ventilación es una necesidad básica del habitar, existen zonas marginadas por el conflicto armado y la violencia donde prima la promoción de seguridad y la vida. Sin embargo, con el fin de velar por los derechos humanos en todo el territorio nacional, el Sistema Universitario Estatal – SUE del Ministerio de Educación en Colombia, convocó a instituciones para la construcción de paz en zonas de posconflicto (UFPS, 2017; La Opinión, 2021).

Bajo esta premisa, la Universidad Francisco de Paula Santander participó con proyectos relacionados a la vivienda social sostenible y planeación territorial. Teniendo en cuenta que, la ventilación es un componente fundamental en la composición arquitectónica y contempla factores relacionados a la función, confort, sostenibilidad y eficiencia del espacio. Esta investigación continúa el objetivo de la convocatoria para evaluar el comportamiento térmico de una serie de muros ventilados compuestos por diferentes unidades constructivas como calados, celosías y paneles a través de simulaciones de transferencia de calor bajo por medio del método de elementos finitos en el software ANSYS, en condiciones climáticas de Ocaña, ubicada en la región del Catatumbo en Norte de Santander, Colombia. Con el fin de proveer el estimado de características térmicas de soluciones constructivas ventiladas y tradicionales para diseñadores, arquitectos y demás profesionales del sector constructor. De esta manera, los resultados de la investigación son aportes teóricos para la selección de materiales en procesos de diseño y planificación de la vivienda social.

METODOLOGÍA

La metodología de la investigación sobre el estudio térmico de muros ventilados en condiciones climáticas de la región del Catatumbo teórica, está dividida en 3 fases. La primera fase consiste en la identificación de tipologías de soluciones constructivas. La segunda fase ejecuta las simulaciones de transferencia de calor en ANSYS y, por último, la tercera fase desarrolla el análisis de la relación entre la permeabilidad y el rendimiento térmico de las soluciones constructivas ventiladas.

FASE I: IDENTIFICACIÓN DE TIPOLOGÍAS DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS VENTILADAS

Para iniciar, las unidades constructivas seleccionadas para el conjunto de tipologías de muros ventilados tradicionales de la presente investigación son el calado estrella, calado cuadrado en arcilla, calado cuadrado en concreto, celosía

con ladrillo, panel con estructura metálica y caña brava y panel con rejillas metálicas, como se muestra en la Figura 1. La selección de dichos materiales está ligada con la producción industrial cerámica y arcillera de la región de Norte de Santander, por ende, la mayoría de los productos corresponde a este material, con el fin de promover el aprovechamiento de recursos locales y la identidad de la región (Sánchez-Molina, González-Mendoza y Avendaño-Castro, 2019).

El conjunto de las tipologías de muro ventilado sometidas al análisis está constituido por 1 muro con calado en arcilla cocida llamado Estrella en la industria cerámica de Norte de Santander (VENT-1) (INDUARCILLA¹, 2020), 2 muros conformados con calado cuadrado en arcilla cocida y concreto cada uno (VENT-2, VENT-3), 3 configuraciones de celosías con ladrillo macizo (VENT-4, VENT-5, VENT-6), 1 panel ventilado con guadua, una planta nativa de Colombia similar al bambú, y marco metálico (VENT-7) y 1 panel ventilado con rejilla y marco metálico (VENT-8), como se muestra en la Figura 2. Las tipologías VENT-1, VENT-2, VENT-3, VENT-4, VENT-5 y VENT-6 son muros fijos, mientras que las configuraciones VENT-7 y VENT-8 son tipologías de cerramiento con función de acceso, es decir, son puertas tipo paneles.

Las dimensiones de los muros ventilados son 2.40m de alto y 1.24m de ancho, el espesor y el área permeable de los muros ventilados varía de acuerdo a las medidas de las unidades constructivas, la que está registrada en la Tabla 1 y la Tabla 3, respectivamente. De esta manera, se estandariza las medidas de los módulos de muros evaluados en la investigación.

FASE II: SIMULACIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN ANSYS

Las simulaciones de transferencia de calor determinan la distribución de temperaturas y los flujos de calor de las tipologías de muros ventilados tradicionales. Los requerimientos del software ANSYS, a través del método de elementos finitos en esta segunda fase son: los modelos 3D en formato Initial Graphics Exchange Specification (IGES), como los muestra la Figura 2, la conductividad térmica de los materiales utilizados y las condiciones climáticas del municipio de Ocaña, Norte de Santander. Aunque, la Fase I describe inicialmente las tipologías de muros ventilados, la Tabla 1 registra la codificación una vez más junto con el espesor y la conductividad térmica de cada elemento de estudio.

Como se mencionó anteriormente, el municipio seleccionado para la configuración de las condiciones climáticas de las simulaciones es Ocaña, Norte de Santander, Colombia. Su localización geográfica en la región del Catatumbo es ideal para configurar el entorno

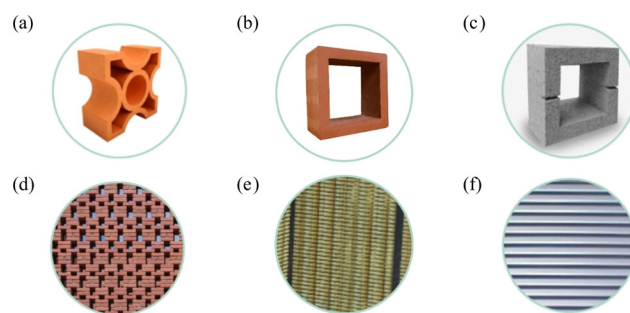


Figura 1. Tipologías de unidades constructivas seleccionadas para el diseño de muros ventilados: (a) calado estrella, (b) calado cuadrado en arcilla, (c) calado cuadrado en concreto, (d) celosía con ladrillo, (e) panel con estructura metálica y caña brava y (f) panel con rejillas metálicas. Fuente: Elaboración de la Autora.

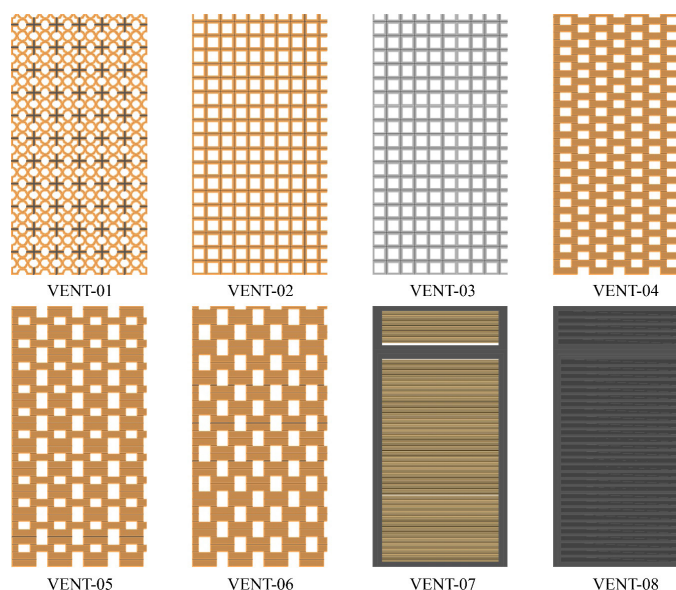


Figura 2. Tipologías de muros ventilados. Fuente: Elaboración de la Autora.

y aunque existen otros municipios con condiciones climáticas con temperaturas más altas, sólo se obtuvo acceso a la data del municipio mencionado. Sin embargo, gracias a herramientas como GoogleEarth y MeteoRED es posible visibilizar las condiciones climáticas y geográficas del municipio de Ocaña y la región del Catatumbo, como se observa en la Figura 3.

A continuación, la Tabla 2 recopila los datos climáticos del municipio de Ocaña ubicado en la zona del Catatumbo en Norte de Santander. El programa requiere la temperatura del entorno, velocidad del viento y radiación solar para calcular las cargas aplicadas sobre las superficies del modelo 3D de acuerdo a las condiciones del contexto a simular.

Tabla 1. Codificación y propiedades térmicas de las tipologías de muros ventilados tradicionales. Fuente: Elaboración de la Autora.

Código	Tipología de muro	Espesor (m)	Conductividad (W/mK)
VENT-1	Calado tradicional (estrella)	0,085	0,407 (Vélez-Pareja, 2015)
VENT-2	Calado cuadrado en arcilla	0,12	0,407 (Vélez-Pareja, 2015)
VENT-3	Calado cuadrado en concreto	0,12	0,54 (Vélez-Pareja, 2015)
VENT-4	Celosía con ladrillo – Configuración 1	0,1	0,437 (Vélez-Pareja, 2015)
VENT-5	Celosía con ladrillo – Configuración 2	0,1	0,437 (Vélez-Pareja, 2015)
VENT-6	Celosía con ladrillo – Configuración 3	0,1	0,437 (Vélez-Pareja, 2015)
VENT-7	Panel ventilado con caña brava	0,076	Estructura – 60,50 (Atsonios, Mandilaras y Founti, 2019) Guadua – 0,1417 (Ramírez-Sánchez, 2020)
VENT-8	Puerta con rejilla metálica	0,076	60.50 (Atsonios, Mandilaras y Founti, 2019)

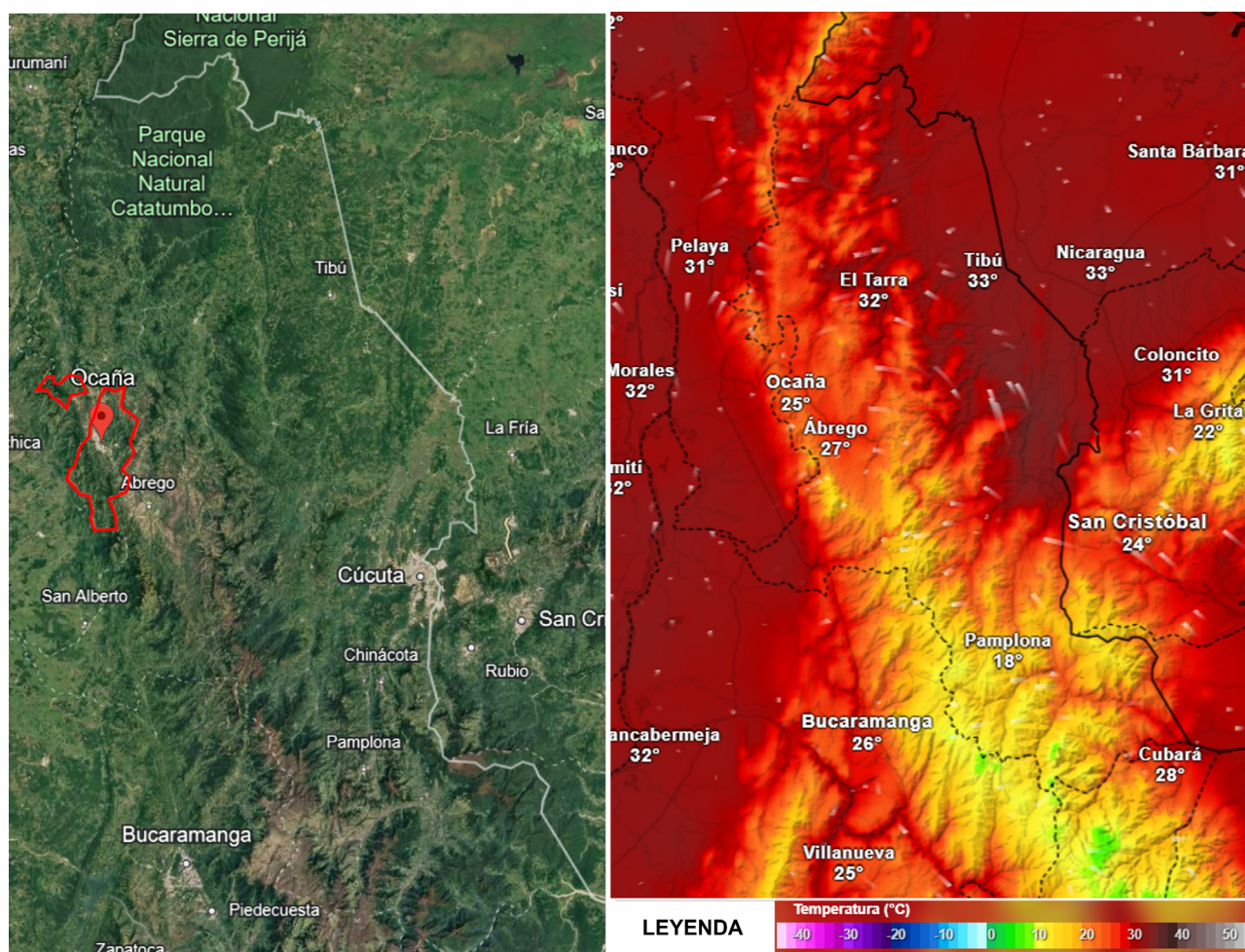


Figura 3. Localización geográfica del municipio de Ocaña en el departamento de Norte de Santander, Colombia (Izquierda) y Mapa termográfico del municipio de Ocaña y alrededores en horarios del mediodía. Fuente: Google Earth y MeteoRed (2023).

Tabla 2. Datos climáticos del municipio de Ocaña, Norte de Santander. Fuente: Elaboración de la Autora.

Dato	Valor
Coordenadas	73°19'20.0"W; 8°14'16.0"N
Temperatura media	21.8°C (IDEAM ² , 2010)
Velocidad del viento	3 – 3.5 m/s (SUE, 2018)
Conductividad del viento	0.26 W/mK (Çengel, 2007)
Radiación solar incidente	539.3 W/m2 (Fuentes-Freixanet, 2013)

Tabla 3. Permeabilidad de las tipologías de muro ventilados tradicionales seleccionados. Fuente: Elaboración de la Autora.

Código	Tipología de muro	Superficie no permeable (m²)	Superficie permeable (m²)
VENT-1	Calado tradicional (estrella)	0,3245	0,6755
VENT-2	Calado cuadrado en arcilla	0,3916	0,6084
VENT-3	Calado cuadrado en concreto	0,3916	0,6084
VENT-4	Celosía con ladrillo – Configuración 1	0,6175	0,3825
VENT-5	Celosía con ladrillo – Configuración 2	0,6365	0,3635
VENT-6	Celosía con ladrillo – Configuración 3	0,6667	0,3333
VENT-7	Panel ventilado con caña brava	0,84	0,16
VENT-8	Puerta con rejilla metálica	0,76	0,24

Una vez definidos los parámetros formales (modelos 3D), las características térmicas de los materiales y las condiciones climáticas del entorno, se configuran en ANSYS a través del método de elementos finitos, que sigue la metodología de Colmenares-Uribe et al. (2023) que empieza con tipo de sistema de análisis, seguido por datos de ingeniería, geometría, modelo, configuración, solución y finaliza con los resultados de las simulaciones.

FASE III: ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA PERMEABILIDAD DEL AIRE Y EL RENDIMIENTO TÉRMICO DE LAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS VENTILADAS.

El análisis de la relación entre la permeabilidad y el rendimiento térmico de las soluciones constructivas ventiladas es una discusión sobre el impacto de la ventilación natural en la transferencia de calor de tipologías de muro diseñadas para permitir el flujo del aire. Se realiza el comparativo entre permeabilidad, flujos de calor y distribución de temperaturas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados registran características formales y técnicas relacionadas a la permeabilidad de las superficies, comportamiento térmico y flujos de calor de las tipologías de muros ventilados tradicionales seleccionados para la investigación.

PERMEABILIDAD DE TIPOLOGÍAS DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS VENTILADAS

La Tabla 3 recopila las áreas de las superficies permeables y no permeables de las tipologías de muros ventilados tradicionales a partir de un metro cuadrado configurado con cada unidad constructiva. De acuerdo a las características formales y los datos de la Tabla 3, la superficie con mayor flujo de aire es VENT-1, la que alcanza hasta 67.55% de permeabilidad. Seguido por VENT-2 y VENT-3, con porcentajes de 60.84%. En menor medida, continúan las configuraciones de celosías con ladrillo (VENT-3, VENT-4 y VENT-5) con permeabilidades entre 36.35% y 38.25%. Por último, los paneles ventilados con rejillas metálicas (VENT-8) permiten el flujo de aire

Tabla 4. Registro de temperaturas máximas, mínimas y promedio de las superficies exteriores e interiores de tipologías de muros ventilados tradicionales. Fuente: Elaboración de la Autora.

Código	Temperatura Exterior (°C)			Temperatura Interior (°C)		
		Mínima	Promedio	Máxima	Mínima	Promedio
VENT-1	43.54	38.80	43.58	26.95	22.21	26.71
VENT-2	44.16	41.75	44.16	24.85	22.44	24.42
VENT-3	43.16	40.90	43.16	25.08	22.82	24.72
VENT-4	50.89	45.25	50.89	31.15	25.51	32.40
VENT-5	54.38	44.60	54.38	34.83	25.05	35.53
VENT-6	54.40	44.60	54.40	31.53	24.99	35.56
VENT-7	59.59	42.57	59.59	42.56	28.94	50.75
VENT-8	51.75	49.18	50.41	50.03	44.05	51.73

en un 25% mientras que el peor de los casos es el panel ventilado con caña brava (VENT-7) que sólo deja un margen de 16% de ventilación.

DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS DE TIPOLOGÍAS DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS VENTILADAS

Los resultados de distribución de temperaturas arrojan valores de temperaturas exteriores e interiores máximas, mínimas y promedio, como lo registra la Tabla 4 y lo ilustra la Figura 4 y Figura 5. En el caso de las temperaturas de las superficies exteriores, los valores máximos coinciden con los promedios, mientras que, los valores promedios de las temperaturas interiores superan los valores máximos en la mayoría de los casos, con excepción en VENT-1, VENT-2 y VENT-3.

El análisis individual del comportamiento térmico examina las diferencias de temperatura exterior e interior máxima, mínima y promedio. Dentro del análisis individual, se observa que VENT-6 es la tipología con mayor diferencia de temperatura entre el exterior e interior, con un rango entre 19.60°C hasta 22.86°C. En segundo lugar, VENT-4 registra una diferencia de 19.74°C, seguido por VENT-5 y VENT-2 con 19.55°C y 19.31°C, respectivamente. En quinto lugar, VENT-3 y VENT-1 difieren 18.08°C y 16.59°C, cada uno. Mientras que, VENT-7 registra diferencias de temperaturas entre 13.62°C hasta 17.03°C. En último lugar, VENT-8 registra los valores más bajos de todas las tipologías entre el exterior e interior, la diferencia solamente varía entre 1.73°C hasta 5.12°C.

Por otra parte, el análisis comparativo está enfocado en identificar los mejores rendimientos térmicos interiores. Las tipologías de muro ventilado con los valores más bajos en las superficies interiores son VENT-1 y VENT-2. Los beneficios térmicos que ofrece VENT-1 van desde 0.23°C hasta 21.84°C. Las tipologías con menor desventaja frente a VENT-1 son los calados cuadrados en arcilla y concreto (VENT-2, VENT-3), porque la diferencia de temperaturas interiores mínimas no alcanza 1°C. Por otra parte, las

tipologías de celosías configuradas con ladrillo macizo registran entre 2.79°C (VENT-6), 2.84°C (VENT-5) y 3.80°C (VENT-4) más que VENT-1. Sin embargo, las tipologías con mayor desventaja frente a VENT-1 son VENT-7 y VENT-8, debido a que las temperaturas interiores aumentan 6.73°C y 21.84°C, respectivamente.

La segunda tipología con mejor rendimiento térmico es VENT-2, ya que el análisis comparativo de las temperaturas máximas y promedios con las demás tipologías superan entre 0.23°C hasta 27.31°C. Al igual que en el caso anterior, VENT-3 registra una diferencia mínima entre 0.23°C y 0.29°C, la similitud del comportamiento tiene relación con la forma de las unidades constructivas que componen los muros. En segundo lugar, el calado estrella registra un aumento entre 2.10°C y 2.29°C en las temperaturas interiores. Las configuraciones de celosías con ladrillo macizo varían los incrementos de temperatura entre 6.30°C y 7.98°C (VENT-4), 9.97°C y 11.10°C (VENT-5), y entre 6.68°C y 11.13°C (VENT-6). Finalmente, los paneles con marco metálico son los menos aventajados frente a los muros calados y con celosías. No obstante, VENT-7 registra menos diferencia de temperaturas (17.71°C y 26.33°C) que VENT-8 (25.18°C y 27.31°C).

FLUJOS DE CALOR DE TIPOLOGÍAS DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS VENTILADAS

Las simulaciones de flujos de calor de muros ventilados para mampostería exponen la concentración de energía en los muros conformados con calados, celosías y rejillas que permiten el paso del aire. La Figura 4 ilustra los flujos de calor obtenidos. Además, la Tabla 5 registra los valores máximos y mínimos de las superficies exteriores e interiores.

El análisis de los flujos de calor, por medio de la Figura 6 y la Tabla 5 coincide que los flujos de mayor concentración son las zonas correspondientes a las juntas de mortero y superficies exteriores, por el contrario, los flujos de calor

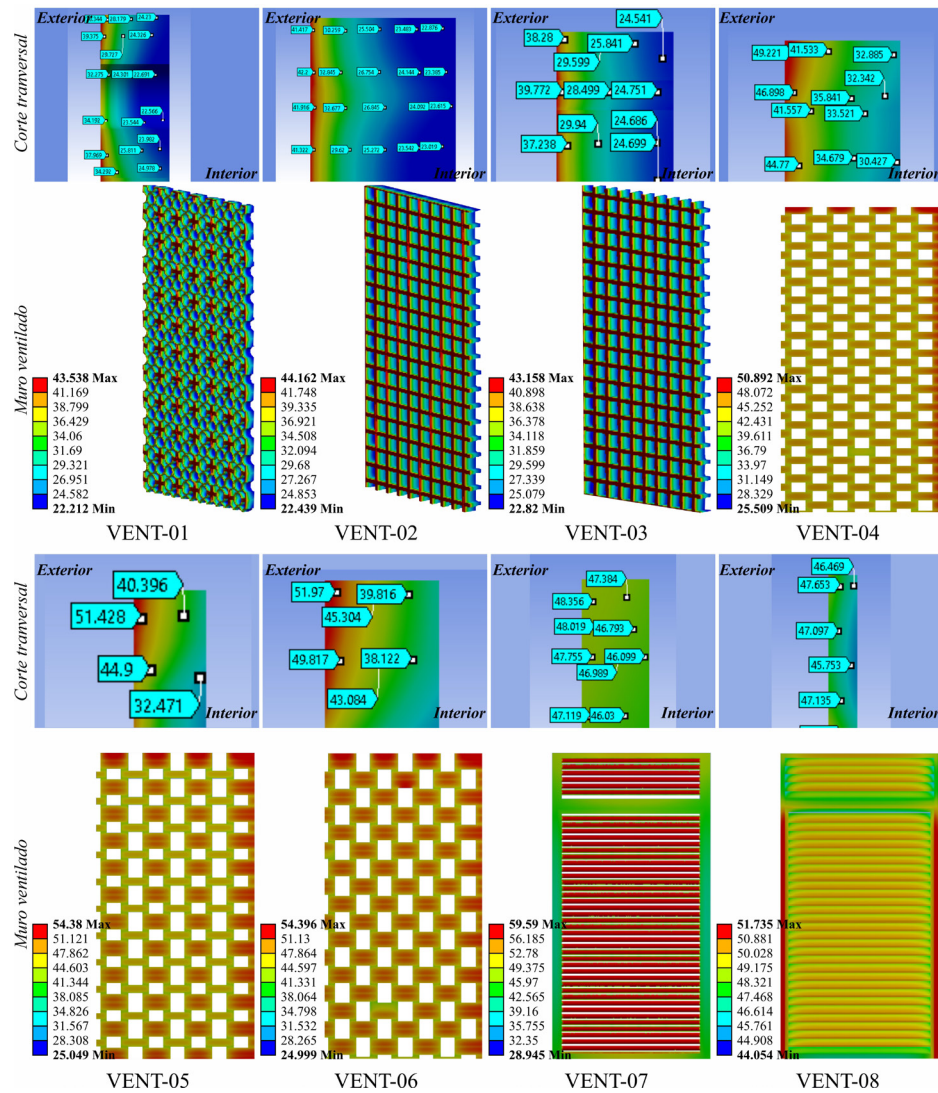


Figura 4. Distribución de temperaturas (°C) de tipologías de muros ventilados tradicionales seleccionados. Fuente: Elaboración de la Autora.

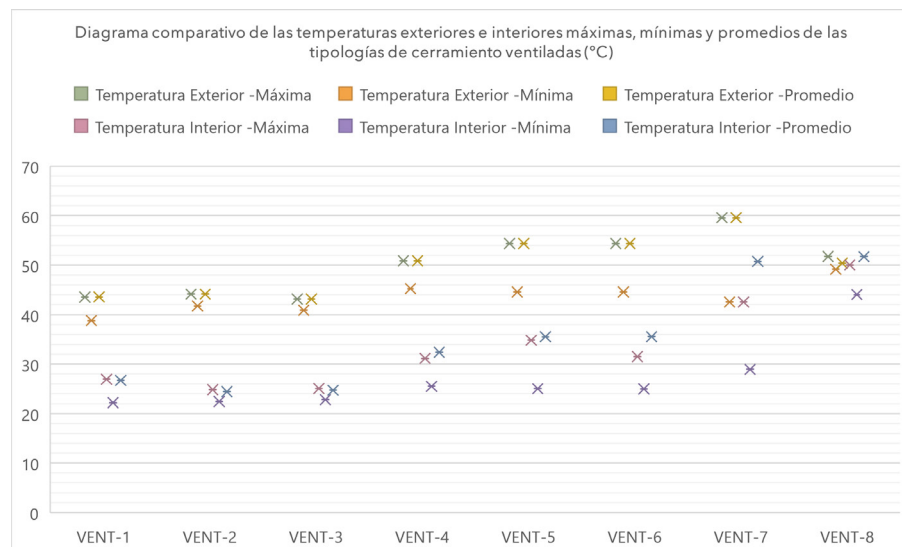


Figura 5. Diagrama comparativo de las temperaturas exteriores e interiores máximas, mínimas y promedios de las tipologías de cerramiento ventiladas (°C). Fuente: Elaboración de la Autora.

Tabla 5. Registro de flujos de calor (W/m2) máximo y mínimo de tipologías de muro ventilados seleccionados. Fuente: Elaboración de la Autora.

Código	Flujo de calor máximo (W/m²)	Flujo de calor mínimo (W/m²)
VENT-1	325.78 – 365.78	1.91 – 42.34
VENT-2	267.55 – 343.03	3.38 – 22.25
VENT-3	290.35 – 325.98	5.32 – 23.1346
VENT-4	218.46 – 379.48	17.18 – 37.31
VENT-5	165.41 – 352.17	25.05 – 31.57
VENT-6	204.06 – 297.18	17.81 – 64.37
VENT-7	1231.20 – 3689.20	2.24 – 22.00
VENT-8	2105.50 – 3508.50	354.12 – 1405.60

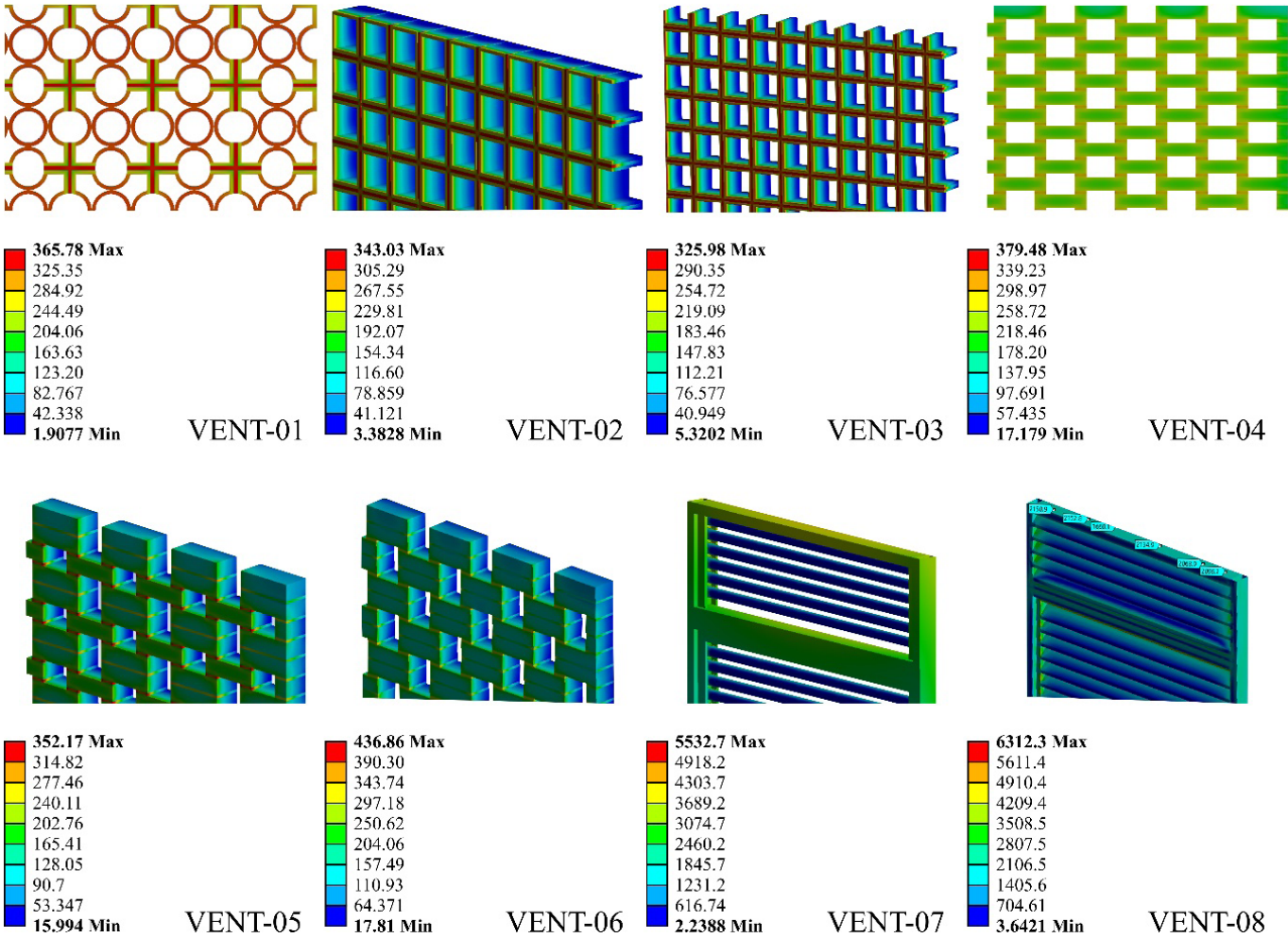


Figura 6. Flujos de calor (W/m2) de tipologías de muro ventilados tradicionales. Fuente: Elaboración de la Autora.

están concentrados en las superficies interiores de las unidades constructivas, principalmente.

El análisis de los flujos de calor máximo concuerda que las zonas con materiales como mortero en las juntas y acero en los marcos metálicos concentran entre 297.18 W/m² y 379.48 W/m², y entre 1231 W/m² y 3689 W/m², respectivamente. Mientras que, las superficies exteriores con materialidad arcillosa concentran entre 10.93% hasta un 53% menos que las zonas con mayor energía.

A pesar que, las tipologías de muros ventilados tienen en común áreas permeables para la circulación del aire, este estudio observa 3 tipos de comportamientos de flujos de calor que varían según la forma de las unidades constructivas. Como se mencionó anteriormente, los flujos de calor mínimo están ubicados en las superficies interiores, no obstante, la composición formal y material de las tipologías varía de la siguiente manera: El caso de los muros calados VENT-1, VENT-2 y VENT-3, las superficies de las paredes que conectan entre el exterior e interior disipan el calor entre el 88.43% y 93.51%, mientras que las superficies interiores, disipan casi la totalidad de la energía entre 98.37% hasta 99.48%.

El segundo caso registrado en los flujos de calor mínimo son los muros con celosías configurados con ladrillo macizo VENT-4, VENT-5 y VENT-6. Estas tipologías registran dos zonas con valores mínimos ubicados en las juntas de mortero y las superficies interiores de las unidades constructivas. Aunque, las juntas de mortero concentran los flujos de calor de mayor concentración en el exterior, en el interior se refleja el comportamiento disipado entre 78.34% y 91.04%. Mientras que las superficies interiores aumentan el amortiguamiento de calor entre el 92.89% y 95.47%.

Por último, las tipologías de paneles VENT-7 y VENT-8 exponen que la estructura metálica concentra los mayores flujos de calor, sin duda alguna. Sin embargo, las superficies interiores de los marcos disipan la energía entre 59.94% y 89.91%. Por el contrario, los elementos horizontales de guadua disipan por completo la concentración de calor (99.41% y 99.34%).

RELACIÓN ENTRE LA PERMEABILIDAD DEL AIRE Y EL RENDIMIENTO TÉRMICO DE LAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS VENTILADAS

El estudio térmico de muros ventilados de las tipologías seleccionadas demuestra que existe una relación inversamente proporcional entre la permeabilidad y el comportamiento térmico de las tipologías investigadas. Teniendo en cuenta los datos de la Tabla 3 y Tabla 4, el porcentaje de superficie permeable incide en la disminución de la temperatura de las superficies interiores.

El primer ejemplo en demostrar este planteamiento es

la tipología VENT-1, la que presenta el mayor porcentaje de permeabilidad (67.55%) y a su vez, registra las temperaturas de las superficies interiores más bajas (entre 22.21°C y 26.95 °C). Por el contrario, uno de los paneles ventilados con menor superficie permeada, como VENT-8 (24%), duplica las temperaturas mínimas de VENT-1.

En el mismo sentido, los calados cuadrados en arcilla y concreto (VENT-2 y VENT-3) también demuestran que la permeabilidad influye en los beneficios térmicos que puede obtener una superficie ventilada. De hecho, con un rango inferior de permeabilidad alcanza temperaturas mínimas similares a VENT-1 e incluso, temperaturas interiores máximas y promedios inferiores a VENT-1.

Aunque la tipología menos permeable es VENT-7, con tan sólo 16%, demuestra que existen otros factores en el rendimiento térmico como la composición material y sus propiedades conductivas. De acuerdo a las propiedades de los materiales (Tabla 1) y el análisis de flujos de calor (Figura 4), la conductividad de los materiales que conforman las unidades constructivas también inciden en el comportamiento térmico, porque la capacidad de la guadua para disipar hasta el 99% de la energía concentrada en las superficies interiores, le permite lograr temperaturas mínimas similares a las temperaturas mínimas y promedios de las tipologías con el doble (VENT-4, VENT-5, VENT-6) y hasta el cuádruple (VENT-1) de permeabilidad.

Asimismo, las configuraciones de celosías (VENT-4, VENT-5, VENT-6) reflejan otro factor a considerar en el diseño del muro y el rendimiento térmico. A diferencia de VENT-1, VENT-2 y VENT-3, las celosías están conformadas por un conjunto de ladrillos macizos en arcilla cocida unidos por juntas de mortero, lo que implica que el ladrillo, al ser un volumen compacto, concentre mayor flujo de energía. Por el contrario, los calados son unidades constructivas diseñadas exclusivamente para permitir el flujo de aire y la entrada de luz, su volumen está compuesto por paredes que generan la forma de los huecos o perforaciones y por ende, el volumen por donde se conduce la energía se reduce significativamente. Por esta razón, las configuraciones con celosías solamente disminuyen la transferencia de calor en las superficies interiores entre el 92.89% y 95.47%, mientras que, las tipologías de calados disipan los flujos de calor entre 98.37% hasta 99.48%, comparados con las superficies expuestas a la radiación solar.

CONCLUSIONES

En conclusión, la incorporación de estrategias de ventilación natural en proyectos arquitectónicos tiene múltiples beneficios. Además de promover el confort y el bienestar de los ocupantes, la ventilación natural también tiene un impacto significativo en la eficiencia energética y la sostenibilidad de los edificios. La optimización de la calidad del aire y el confort, a través de la ventilación natural mejora la salud física y mental de los usuarios.

La iniciativa del Sistema Universitario Estatal – SUE del Ministerio de Educación en Colombia para la construcción de paz en zonas de posconflicto, es un acelerador para el planteamiento de investigaciones orientadas a resolver problemáticas sociales. La pertinencia de la investigación es la apuesta a establecer un precedente para explorar nuevas tipologías de cerramiento ventilados y evaluar el comportamiento térmico de diferentes unidades constructivas desde un contexto específico, con el fin de proveer información técnica que sirva de base para la selección de sistemas acordes a las necesidades de los usuarios.

Gracias a las simulaciones, es posible entender el comportamiento de la transferencia de calor mediante la forma de unidades constructivas. De acuerdo a la relación del diagrama comparativo entre temperaturas exteriores e interiores de la Figura 5, las tipologías con mejor rendimiento térmico son los calados VENT-1, VENT-2 y VENT-3, seguido por las celosías configuradas con ladrillo macizo que aumentan sus temperaturas interiores entre 2.79°C hasta 3.80 °C, en comparación con los calados VENT-1. No obstante, las tipologías con marcos metálicos aumentan las temperaturas de las superficies interiores entre 6.73°C y 21.84°C comparado con VENT-1 debido a la alta conductividad de las estructuras.

Las tipologías de muros ventilados seleccionados con mayor porcentaje de permeabilidad tienden a mostrar un mejor comportamiento térmico y una disipación más eficiente del calor entre el exterior e interior, es decir, los muros calados y las configuraciones con celosías. Sin embargo, es importante considerar otros factores, como la forma y los materiales utilizados, para comprender completamente el impacto del porcentaje de permeabilidad en el comportamiento térmico de los muros ventilados.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRedit

Conceptualización, C.X.D.F.; Curación de datos, C.X.D.F.; Análisis formal, C.X.D.F.; Adquisición de financiación C.X.D.F.; Investigación, C.X.D.F.; Metodología, C.X.D.F.; Administración de proyecto, C.X.D.F.; Recursos, C.X.D.F.; Software, C.X.D.F.; Supervisión, C.X.D.F.; Validación, C.X.D.F.; Visualización, C.X.D.F.; Escritura – borrador original, C.X.D.F.; Escritura – revisión y edición, C.X.D.F.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece a la Universidad Francisco de Paula Santander, al Grupo de Investigación en Arquitectura y Materiales Alternativos (GRAMA) por apoyar la

propuesta de soluciones constructivas para Viviendas Rurales en el Catatumbo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez Rodríguez, M. de la O. (2022). Actuaciones para la mejora de la ventilación de espacios públicos en la Comunidad de Madrid. *Revista de Salud Ambiental*, 22(Especial Congreso), 70-73. <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/1189>

Atkinson, J., Chartier, Y., Pessoa-Silva, C. L., Jensen, P., Li, Y., y Seto, W.-H. (2009). *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings*. Editorial World Health Organization (WHO), https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/44167/9789241547857_eng.pdf?sequence=1

Atsonios, I., Mandilaras, I. y Founti, M. (2019). Thermal assessment of a novel drywall system insulated with VIPs. *Energies*, 12(12), 2373. <https://doi.org/10.3390/en12122373>

Balter, J., Ganem, C., y Barea, G. (2020). Mejoras en el desempeño energético de edificios en verano mediante la integración de envolventes ventiladas en fachadas norte y cubiertas. El caso de Mendoza, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 10(2), 94-105. <http://dx.doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.07>

Batterman, S., Su, F.-C., Wald, A., Watkins, F., Godwin, C., y Thun, G. (2017). Ventilation rates in recently constructed U.S. school classrooms. *Indoor Air*, 27(5), 880–890. <https://doi.org/10.1111/ina.12384>

Calama-González, C. M., León-Rodríguez, Á. L., y Suárez, R. (2019). Indoor Air Quality Assessment: Comparison of Ventilation Scenarios for Retrofitting Classrooms in a Hot Climate. *Energies*, 12(24), 4607. <https://doi.org/10.3390/en12244607>

Cedeño Quijada, M., Solano, T., Mora, D., y Chen Austin, M. (2022). Evaluación del desempeño de sistemas de ventilación en salones de clase: Estudio numérico en edificios universitarios en Panamá. *Novasineria*, 5(1), 100-127. <https://doi.org/10.37135/ns.01.09.07>

Çengel, Y. (2007). *Transferencia de Calor y Masa, un Enfoque Práctico*. McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. <https://blogs.ugto.mx/wp-content/uploads/sites/71/2022/01/Transferencia-de-calor-y-masa.-Un-enfoque-practico-paginas-111-y-112.pdf>

Colmenares-Urbe, A. P., Sánchez Molina, J., Díaz Fuentes, C. X., y Sánchez Zúñiga, J. V. (2023). El diseño de producto cerámico como estrategia de mitigación de transferencia de calor en envolventes arquitectónicas. *Eco Ediciones S.A.S.* <https://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/6714>

Fuentes-Freixanet, V. A. (2013). Estimación de la radiación solar incidente. Universidad Autónoma Metropolitana: Unidad Azcapotzalco. México.

Giraldo, W., y Herrera, C. A. (2017). Ventilación pasiva y confort térmico en vivienda de interés social en clima ecuatorial. *Ingeniería y desarrollo*, 35(1), 77-101. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85248898006>

Gómez-Porter, P. F. (2021). La vivienda colectiva de la modernidad en tiempos de COVID19 aportaciones del paradigma habitacional. *Arquitecturas del Sur*, 39(59), 28-43. <http://dx.doi.org/10.22320/07196466.2021.39.059.02>

GoogleEarth. (2023). Localización geográfica del municipio de Ocaña en el departamento de Norte de Santander, Colombia. <https://earth.google.com/earth/d/1S7XJoqbNWkhLDrPfiICKrTI7RJUJwAyM?usp=sharing>

INDUARCILLA. (2020). Catálogo de Productos en Gres del Área Metropolitana de San José de Cúcuta, Colombia.

IDEAM (2010). Promedio climatológico de Colombia 1981-2010 (Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). URL: <http://www.ideam.gov.co/>

Jansz, J. (2017). Sick building syndrome en S. R. Quah (Ed.), *International Encyclopedia of Public Health (Second Edition)*. Oxford: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803678-5.00407-0>

Ji, Y., Lomas, K. J. y Cook, M. J. (2009). Hybrid ventilation for low energy building design in south China. *Building and Environment*, 44(11), 2245–2255. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.015>

La Opinión (2021). *Obtiene su primer patente, el programa de Arquitectura de la UFPS*. (Cúcuta: La Opinión). <https://www.laopinion.co/cucuta/obtiene-su-primer-patente-el-programa-de-arquitectura-de-la-ufps>

Mercado, M. V., Barea-Paci, G. J., Esteves, A., y Filippín, C. (2018). Efecto de la ventilación natural en el consumo energético de un edificio bioclimático. Análisis y estudio mediante energy plus. *Hábitat Sustentable*, 8(1), 54-67. <http://dx.doi.org/10.22320/07190700.2018.08.01.05>

METEORED (2023). Meteored: Weather forecast – Temperature. Tiempo. <https://www.meteored.com/>

Pacheco Ochoa, V., Jiménez Pérez, A.L., y Ramírez Pérez, J. (2021). Impacto de la luz y la ventilación natural en el ambiente laboral sobre el síndrome del edificio enfermo y la productividad. *UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*, 5(4), 97-108. <https://doi.org/10.47230/unsum-ciencias.v5.n4.2021.581>

Ramírez-Sánchez, D. O. (2020). *Aprovechamiento de propiedades térmicas de materiales ancestrales usados en la construcción de edificios en Ecuador (adobe y caña guadua)* [Tesis de licenciatura]. Universidad Central del Ecuador.

Sánchez-Molina, J., González-Mendoza, J. A., y Avendaño-Castro, W. R. (2019). *El Clúster cerámico apuesta de desarrollo socioeconómico de Norte de Santander*. Bogotá-Ecoe Ediciones. <https://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/6502>

UFPS. Sistema Universitario Estatal – SUE del Ministerio de Educación en Colombia, 2017 (2018). Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas IPSE, Unidad de Planeación Minero Energética UPME. Plan De Energización Rural Sostenible Departamento Norte de Santander PERS: Mapa velocidad media del viento en superficie del departamento Norte de Santander. https://sig.upme.gov.co/SIGPERS/Files/Nortesantander/oe/18_MAPA_VELOCIDAD%20DEL%20VIENTO.pdf

Universidad Francisco de Paula Santander UFPS (2017). *La UFPS presentó 43 iniciativas al Taller Banco de Proyectos – SUE en el marco del posconflicto y la construcción de Paz*. Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander. <https://ww2.ufps.edu.co/unoticia/la-ufps-presento-iniciativas-al-sue->

Vartires, A., Damian, A., Olariu, A., Istrate, A., Catalina, T. y Zorilă, E. (2018). Challenges in achieving a high indoor air quality in an educational building. *Revista Română de Inginerie Civilă*, 9(1), 28–42. <https://www.rric.ro/reviste/articole/vol9nr1art3.pdf>

Vélez-Pareja, E. A. (2015). Caracterización del comportamiento térmico de materiales constructivos usados comúnmente en Colombia para la construcción de envolventes de edificaciones [Tesis de Magíster]. Universidad del Norte de Colombia. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/9023#page=1>

COMPARATIVA Y CALIBRACIÓN DE ÍNDICES DE CONFORT PARA LA TEMPORADA CÁLIDA EN UNA CIUDAD SEMI-ÁRIDA DEL NOROESTE DE MÉXICO

Recibido 24/06/2024
Aceptado 20/10/2024

COMPARISON AND CALIBRATION OF COMFORT INDICES FOR THE WARM SEASON IN A SEMI-ARID CITY OF NORTHWESTERN MEXICO

COMPARAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE ÍNDICES DE CONFORTO PARA A ESTAÇÃO QUENTE EM UMA CIDADE SEMIÁRIDA DO NOROESTE DO MÉXICO

Hiram Eduardo Urias-Barrera

Doctor en Ciencias
Profesor Investigador, Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño
Universidad de Guadalajara, Jalisco, México
<https://orcid.org/0000-0003-0809-8842>
Hiram.urias@cuaad.udg.mx

RESUMEN

El análisis sobre modelos de confort y el efecto de las condiciones microclimáticas extremas es importante para determinar la relación entre las afectaciones de salud en personas que realizan actividades en áreas abiertas. El trabajo propone un modelo psicofisiológico regional, para individuos con actividades físicas intensas (deportivas) en espacios públicos exteriores en clima cálido seco extremo (Mexicali, Baja California), el que se contrastó con el Universal Thermal Climate Index con el propósito de calibrarlo y así establecer una base comparativa para formular pruebas de hipótesis que evalúen su aplicabilidad. Se encontró que el modelo regional alcanzó un 67% de aciertos en comparación del Universal Thermal Climate Index que obtuvo 31% de aciertos no calibrado y 53% de aciertos calibrado. Como conclusión de este proceso se destaca la pertinencia, precisión y eficiencia en la utilización de modelos específicos regionales sobre aquellos que tienden a generalizar las condiciones de la percepción térmica.

Palabras clave

modelo psicofisiológico, confort térmico, actividad intensa, calibración de escala.

ABSTRACT

The analysis of comfort models and the effect of extreme microclimatic conditions is vital to determine the relationship between health affectations in people who perform activities in open areas. This work proposes a regional psychophysiological model for individuals with intense physical activities (sports) in outdoor public spaces in an extremely hot dry climate (Mexicali, Baja California), which was contrasted with the Universal Thermal Climate Index to calibrate it and thus establish a comparative basis to formulate hypothesis tests to evaluate its applicability. It was found that the regional model achieved 67% accuracy compared to the Universal Thermal Climate Index, which obtained 31% accuracy when not calibrated and 53% accuracy when calibrated. The conclusion of this process highlights the relevance, accuracy, and efficiency of using specific regional models over those that tend to generalize the thermal perception conditions.

Keywords

psychophysiological model, thermal comfort, intense activity, scale calibration.

RESUMO

A análise dos modelos de conforto e o efeito das condições microclimáticas extremas são importantes para determinar a relação entre as complicações de saúde em pessoas que realizam atividades em áreas abertas. O artigo propõe um modelo psicofisiológico regional para indivíduos com atividades físicas intensas (esportivas) em espaços públicos externos em clima quente e seco extremo (Mexicali, Baja California), que foi contrastado com o Universal Thermal Climate Index para ser calibrado e, assim, estabelecer uma base comparativa para formular testes de hipóteses para avaliar sua aplicabilidade. Verificou-se que o modelo regional alcançou uma taxa de precisão de 67% em comparação com o Universal Thermal Climate Index, que obteve 31% de precisão sem calibração e 53% de precisão com calibração. A conclusão deste processo destaca a relevância, a precisão e a eficiência do uso de modelos regionais específicos em relação àqueles que tendem a generalizar as condições de percepção térmica.

Palavras-chave:

modelo psicofisiológico, conforto térmico, atividade intensa, calibração de escalas.

INTRODUCCIÓN

El confort térmico y su efecto en la salud es un tema preocupante actualmente (Peng et al., 2019), sobre todo en lo que respecta a la percepción térmica de los individuos que realizan actividades deportivas en los espacios públicos exteriores; Ya que, como menciona Nikolopoulou y Lykoudis (2006) y Manavvi y Rajasekar (2022), éste es una característica que contribuye a la calidad del ambiente urbano y es una característica que colabora a aumentar los niveles de ocupación, el uso y mejora el desarrollo de actividades de esparcimiento, recreación y de salud (Lai et al., 2020).

El confort térmico se entiende de diferentes maneras es la condición de satisfacción mental del individuo con el entorno térmico; por otro lado, también puede ser un estado de satisfacción fisiológica y psicológica de los individuos con el entorno térmico (ISO 7730, 2006; Nikolopoulou y Lykoudis, 2006; Manavvi y Rajasekar, 2021), en este sentido, la convergencia de las partes subjetivas y objetivas de la percepción térmica y la búsqueda de confort están determinadas en los procesos adaptativos; aun así el confort térmico es un proceso complejo por definir, evaluar y estudiar, lo que dificulta establecer un concepto adecuado para el mismo (Dashrath-Khaire et al., 2021).

Por ello, realizar investigaciones para comprender los efectos que los climas tienen sobre la salud de los individuos es importante hoy en día (González-González, 2021); las nuevas tendencias se han centrado en comprender sustancialmente la relación entre las condiciones meteorológicas y la percepción térmica de los individuos en espacios públicos al aire libre y como en el caso presentado, bajo actividades deportivas intensas (tasa metabólica 600w/m²) y en climas cálidos secos extremos (de Dear, 2011; Candido et al., 2012; Fernández García et al., 2012; Tumini et al., 2015; Jiaqi et al., 2022; Liu et al., 2023).

Actualmente existen trabajos de revisión en los que se llega a enlistar hasta 140 índices de confort (Epstein y Moran, 2006; Carlucci y Pagliano 2012; De Freitas y Grigorieva, 2015). De aquí se entiende la pertinencia de la generación de estudios los que desarrollan y comparan índices que tengan como objetivo establecer, medir y validar la respuesta térmica de las personas.

Es importante mencionar que existen diferentes tipos de modelos de confort: univariados como los desarrollados por Martínez-Bermúdez y Rincón-Martínez (2024), Nuñez et al. (2024), Martín del Campo et al., (2020), Rincón et al. (2020), López-Cañedo et al., (2021), Bojórquez et al. (2014) que toman en cuenta únicamente la correlación entre una variable meteorológica y la sensación térmica; Por

otro lado, existen modelos multivariados e índices de temperatura, como el Actual Sensation Vote – ASV – (Nikolopoulou y Lykoudis, 2006), la Standar Effective Temperature, -SET-, Predicted Mean Vote – PMV y el Universal Thermal Climate Index (UTCI), desarrollados con el fin de vincular las condiciones meteorológicas con la sensación térmica (Fang et al., 2019) que se basan en el equilibrio térmico del usuario con el medio que le rodea, los procesos de termorregulación humana (aspectos fisiológicos: metabolismo, sexo, edad, estado de salud) y aspectos psicológicos (adaptación, tolerancia, expectativa, experiencia, en algunos casos).

Cuantiosos índices desarrollados, se caracterizan por evaluar el confort en espacios interiores pero son pocos los ejemplos importantes que se pueden utilizar para evaluar la percepción térmica y el confort en espacios exteriores y éstos disminuyen cuando se trata de sujetos que realizan deportes o actividades intensas en sus diferentes magnitudes -como es el caso del modelo desarrollado en este trabajo-, los que complejizan los estudios por la alteración de cuestiones metabólicas, de termorregulación y del equilibrio térmico de las personas; por lo tanto, desarrollar un índice o modelo de confort se complica por las características peculiares de los espacios urbanos abiertos y las condiciones de los usuarios (Johansson, 2006), pues intervienen los diferentes aspectos del proceso de sensación y confort térmico (expectativa, experiencia, adaptación, vestimenta, tiempo de exposición, etc.); en este sentido, también se han comenzado a tomar en cuenta aspectos psicológicos y culturales para el desarrollo de éstos. (Jendritzky, de Dear y Havenith, 2012).

Por otro lado, El UTCI, es uno de los índices más utilizados y actualmente es un referente base en el desarrollo de otros modelos de adaptación fisiológica para generar índices de temperatura equivalente (Jendritzky, de Dear y Havenith, 2012). A raíz estudios como los de Tumini y Pérez (2015) y más recientes como el de Jing et al., (2024), Liu et al., (2023), Boussaidi et al., (2023), Manavvi y Rajasekar (2023), Ghani et al. (2021), Barcia-Sardiñas et al., (2020), Marchante y González (2020), se ha comparado a éste con otros índices similares para demostrar la fiabilidad y aplicabilidad al correlacionar los resultados del mismo y establecer así su eficiencia al momento de ser aplicado; en algunos casos se han realizado comparativas y calibraciones, como las desarrolladas por Monteiro y Alucci (2009) estableciéndose la aplicabilidad de los índices o su eficiencia.

De tal modo en base a los trabajos mencionados, para realizar una comparación entre índices se debe tomar en cuenta: que ambos se calculen, a través de variables meteorológicas que afecten al confort térmico en



Figura 1.- Mexicali, Baja California. Fuente: Elaboración del autor.

espacios exteriores y que ambos puedan evaluar la sensación térmica bajo un valor numérico asociado a una escala cualitativa de percepción y cuantitativa de variables meteorológicas.

Por lo tanto, el artículo pretende establecer la fiabilidad de la aplicación de un modelo de adaptación fisiológico-racional y un modelo de adaptación psicofisiológico-empírico, al realizar una comparación entre ambos bajo condiciones de actividades intensas y deportivas en un clima cálido seco. Y con esto determinar qué tan aplicable es el UTCI bajo estas características y establecer la confiabilidad de éste en condiciones similares; para desarrollar el estudio, se realizaron simulaciones de VST con los índices y análisis comparativos de los resultados obtenidos para determinar la exactitud de cada uno, además se reforzó la discusión con análisis estadísticos para validar los resultados.

METODOLOGÍA

Para realizar la comparación de ambos índices de confort térmico, se parte del entendimiento de la región y las condiciones climáticas, para ello se hizo una descripción y caracterización del modelo UTCI, se generó una descripción del desarrollo del modelo regional y por último se puntualizó en el proceso de simulación y análisis estadísticos de los datos.

LOCALIZACIÓN DE ZONA DE APLICACIÓN

Mexicali se localiza al noroeste de México (Figura 1) y se encuentra ubicada a 32.65° N y -115.45° W y el clima es cálido seco extremoso [BW (h") hs (x") (e")] según la clasificación Köppen-García; tiene una temperatura media anual mayor a 23.0°C y menor a 18.0°C en el mes más frío. Las características del período cálido son: temperatura promedio máxima normal de 42.0°C y máximas extremas superiores a los 50.0°C , una humedad relativa del período ronda entre los 10% al 65%; en cuanto a la velocidad de viento, éste oscila entre los 0.10 m/s hasta 4.0 m/s con una Radiación Solar promedio de 937 W/m^2 en el mes de julio.

ÍNDICE UTCI

El UTCI es un modelo de adaptación fisiológica que puede ser aplicado y utilizado para regiones diversas; desarrollado a partir de sujetos no aclimatados, en espacios exteriores y en condiciones meteorológicas variables. Su finalidad es dar información para evitar afectaciones climáticas adversas en la salud y como herramienta de impacto del cambio climático en aspectos de morbilidad y mortalidad de la población (Jendritzky, de Dear y Havenith, 2012).

Se establece como un índice de "temperatura equivalente" (T_e) de ambiente de referencia, bajo un criterio de respuesta fisiológica con exposiciones de 30 y 120 minutos y expresado en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$) equivalentes en escala de valores de estrés térmico (Tabla 1) (Bröde et al., 2012). Las variables meteorológicas

Tabla 1. Codificación y propiedades térmicas de las tipologías de muros ventilados tradicionales. Fuente: Elaboración propia del Autor.

Rango UTCI (°C eq)	Categoría de estrés
Por encima de +46	Estrés por calor extremo
+38 a +46	Estrés por calor muy fuerte
+32 a +38	Estrés por calor fuerte
+26 a +32	Estrés por calor moderado
+9 a +26	Sin estrés térmico
+9 a 0	Estrés por frío ligero
0 a -13	Estrés por frío moderado
-13 a -27	Estrés por frío fuerte
-27 a -40	Estrés por frío muy fuerte
Por debajo de -40	Estrés por frío extremo

Nota: °C eq, significa grados centígrados equivalentes

que utiliza son: temperatura del aire (°C), temperatura radiante media (°C), humedad relativa (%) o presión de vapor de agua (hPa) y velocidad del viento (m/s).

El índice se calcula al utilizar el modelo de regresión lineal múltiple (Błażejczyk y Kunert, 2011) cuya expresión se muestra en la Ecuación 1.

$$UTCI^* = 0.84 \cdot ta + 0.246 \cdot Tmrt - 2.45 \cdot v + 0.204 \cdot vp - 0.01$$

(Ecuación 1)

De la que:

UTCI*= índice de temperatura equivalente (°C)

ta= temperatura de aire (°C).

Tmrt= temperatura radiante media (°C).

v= velocidad de viento a 10 m sobre el nivel de suelo (m/s).

vp= presión de vapor en el ambiente (hPa).

MODELO PSIFISIOLOGICO REGIONAL (VSTAI)

El VSTai toma de referencia a la norma ISO 10551 que establece votos de sensación térmica por medio de escalas subjetivas y objetivas de percepción ligadas a variables climáticas, a través de análisis estadísticos de correlación (Pearson), las que son: temperatura de bulbo seco (Ta), Humedad Relativa (Hr), Velocidad de Viento (v) y Temperatura Radiante Media (Trm) (Tabla 2); y con ellas desarrollar un modelo estadístico matemático multivariado (Jiaqi et al., 2022; Sarhadi y Rad. 2020).

La muestra calculada fue de 300 encuestas con una confiabilidad del 95%; La temporada analizada en este trabajo es la cálida (mayo-septiembre) y se recolectaron 332 observaciones con las que se obtuvieron los datos para la generación del modelo; en total se obtuvo un

Tabla 2.-Correlaciones de variables meteorológicas con la sensación térmica. Fuente: Elaboración del autor.

Variable meteorológica	Coefficiente Pearson
Ta	0.53
Hr	0.23
V	0.16
Rs	0.07
Trm	0.52

Muestra, recolección y análisis de datos para el desarrollo del modelo

10% más de encuestas de las calculadas lo que dio margen para discriminar aquellas que no contaban con la calidad de datos necesarios y sin dejar de ser una muestra representativos.

Para la toma de datos en campo, se elaboró un instrumento de recolección bajo criterios de las normativas de confort vigentes (ISO 10551, 2019; ISO 7730, 2006; ISO 7726, 1998; ISO 9920, 2007), conformándose de este modo un cuestionario con una estructura de ocho partes: Datos de control, percepción térmica, percepción lumínica y acústica, historial térmico, datos fisiológicos, aislamiento por ropa, variables meteorológicas y características del medio construido; en total el instrumento cuenta con 59 reactivos (Tabla 3).

En la recolección de datos meteorológicos los instrumentos se colocaron en un rango no mayor de 10 metros de los individuos encuestados (Figura 2) para cumplir con lo dictado en la ISO 7730; con ellos se tomaban lecturas de las variables analizadas (ta, hr, v)

Tabla 3.- Consultas del instrumento para recolección de datos de percepción térmica. Fuente: Elaboración del autor.

Sección	Tipo de pregunta	Escala de respuestas (cualitativa y numérica)						
		1	2	3	4	5	6	7
Sección Percepción térmica	¿Cómo se siente en este momento?	Mucho frío	Frío	Algo de frío	Ni calor, ni frío	Algo de calor	Calor	Mucho calor
	¿Cómo preferiría sentirse en este momento?	Mucho más frío	Más frío	Un poco más frío	Sin cambio	Un poco más caliente	Más caliente	Mucho más caliente
	¿Cómo se siente en este momento con respecto a la humedad?	Muy húmedo	Húmedo	Algo Húmedo	Normal	Algo seco	Seco	Muy seco
	¿Qué preferiría en estos momentos con respecto a la humedad?	Mucho más húmedo	Más húmedo	Un poco más húmedo	Sin cambio	Un poco más seco	Más seco	Mucho más seco
	¿Cómo siente el viento en este momento?	Nada de viento	Algo de viento	Viento agradable	Algo fuerte	Muy fuerte		
	¿Cómo preferiría el viento en este momento?	Menos viento	Sin cambio	Más viento				
	¿Cómo siente la radiación solar en su piel en estos momentos?	Nada de radiación	Algo de radiación	Radiación agradable	Radiación algo fuerte	Radiación muy fuerte		
	¿Cómo preferiría la radiación solar en su piel en estos momentos?	Menos radiación	Sin cambio	Más radiación				
	¿Cómo considera el clima en el lugar?	Generalmente aceptable	Generalmente inaceptable					
	¿Qué tan tolerable le parece el clima en este momento?	Perfectamente tolerable	Tolerable	Entre tolerable e intolerable	Intolerable	Extremadamente intolerable		

Tabla 4. Especificaciones de los instrumentos meteorológicos. Fuente: Elaboración del autor.

Características del equipo	Equipo usado		
	Monitor de estrés térmico ExTech 30	Anemómetro unidireccional A10	Radiómetro Dr. Meter SM206
Parámetro - unidad	Temperatura de bulbo seco (TA, °C) y humedad relativa (HR, %)	Velocidad de viento, (VV, m/s)	Radiación solar (RS W/ m2)
Rango de medición	TA: 0 a 50 °C, ± 1°C; HR: 0 a 100%.	VV: 0.1 a 20 m/s	RS: 1-3999 W/m²
Precisión	TA ±0,1°C; HR: ±3%	±3%, ± 0.30.	0.1 W/m², ±5%
Frecuencia de registro	Todos toman 1 muestra por segundo		

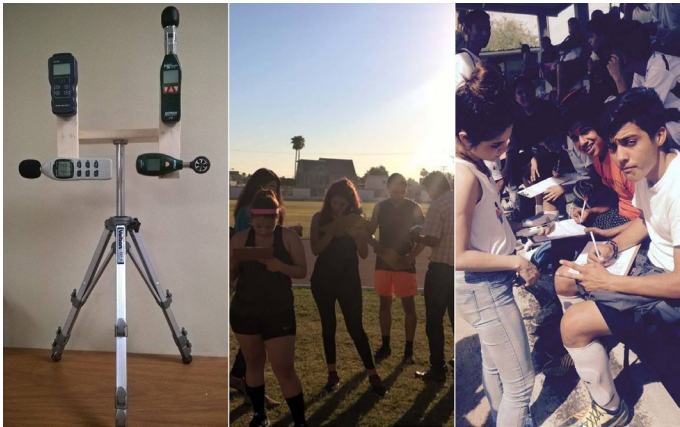


Figura 2.- Montaje de instrumentos utilizados para recolección de datos meteorológicos y proceso de realización de encuestas. Fuente: Elaboración del autor.

y estos cumplían con la normatividad de la ISO 7726 (Tabla 4). Se utilizaron herramientas complementarias para recabar datos fisiológicos de los individuos como basculas, cinta métrica, termómetros infrarrojos de piel y de oído, como también monitores de presión arterial, los que fueron recolectados para el cálculo de la tasa metabólica y la producción de calor; estos datos si bien fueron importantes en el estudio no entraron directamente en el desarrollo del modelo VSTai.

Se seleccionaron dos espacios con diversidad de actividades físicas y horarios de funcionamiento extendidos como lo son la unidad deportiva de La Universidad Autónoma de Baja California y el complejo Deportivo Municipal "Ciudad deportiva" (Figura 2) el trabajo de campo se estableció en relación a los días representativos del periodo cálido (23 de julio al 8 de agosto para este caso), el que se caracterizó por las condiciones climáticas siguientes: t_a 30.1 °C a 40.8 °C, h_r 13% a 57%, v 0.1 m/s a 2.88 m/s, T_{rm} (calculada) 31.2 °C a 97.6 °C.

Tabla 5. Votos de Sensación Térmica del Estudio. Fuente: Elaboración del autor.

Valoración Voto Sensación Térmica ISO 10551	
7	mucho calor
6	calor
5	algo de calor
4	ni calor ni frío
3	algo de frío
2	frío
1	mucho frío

La población de estudio fluctuó entre los 17 y los 60 años, fue seleccionada de manera determinística y con nivel de actividad intensa, se les aplicó la encuesta dependiendo del tipo de actividad deportiva desarrollada de manera individual, uno a uno, o en grupo (para hacer eficiente el proceso); para el análisis de la percepción térmica, se utilizó una escala numérica de 7 niveles, que van de mucho frío (1) a mucho calor (7) (Tabla 5).

El análisis de datos se llevó a cabo en el programa Statistica 12 que inició con pruebas de correlación de Pearson para determinar las variables significativas (Tabla 2), posteriormente se realizó un estudio de residuales para ajustar la normalidad de la muestra (se discriminó aquellas respuestas que salieron de las ± 2 desviaciones estándar, un total del 3% quedó fuera del desarrollo de éste) y posteriormente se generó el modelo de regresión lineal múltiple (Ecuación 2); en el mismo, se descartó la

radiación por ser la que tenía el coeficiente menor en relación con la ST.

$$VST_{ai} = 0.27 \cdot t_a + 0.068 \cdot h_r - 0.092 \cdot v + 0.0047 \cdot T_{rm} - 5.95$$

(Ecuación 2)

De la que:

VST_{ai} = Voto de Sensación Térmica en actividad intensa (sin unidad)

t_a = temperatura de aire (°C).

T_{rm} = temperatura radiante media (°C).

v = velocidad de viento a 10 m sobre el nivel de suelo (m/s).

h_r = humedad relativa (%).

PROCESO COMPARATIVO DE ÍNDICES

El análisis comparativo partió de transformar el modelo VST_{ai} a un índice de T_e con grados centígrados equivalentes a niveles de estrés por el calor. Por lo que se generó un índice determinado con una temperatura equivalente en actividad intensa ($T_{e, re}$, Ecuación 3) (Monteiro y Alucci, 2009) con la suposición de un ambiente de referencia caracterizado por: $T_{rm} = T_a$; $h_r = 50\%$ y $v = 0.1$ m/s; Al considerar esto la relación entre la temperatura del aire del medio ambiente de referencia y la percepción sensación térmica es la siguiente:

$$T_{a, re} = 3.64VST_{ai} + 9.2827$$

(Ecuación 3)

De la que:

$T_{a, re}$ = temperatura de aire de referencia (°C).

VST_{ai} = Voto de sensación térmica en actividad intensa.

Se sustituye la ecuación 2 en la ecuación 3, y se obtiene el modelo de temperaturas equivalentes en actividad intensa:

$$T_{e, ai} = 0.98 \cdot t_a + 0.25 \cdot h_r - 0.34 \cdot v + 0.017 \cdot T_{rm} - 12.378$$

(Ecuación 4)

De la que:

$T_{e, ai}$: temperatura equivalente en actividad intensa (°C).

t_a = temperatura de aire (°C).

T_{rm} = temperatura radiante media (°C).

v = velocidad de viento a 10 m sobre el nivel de suelo (m/s).

h_r = humedad relativa (%).

Ésta, se conceptualizó como una escala de sensación térmica que presentó valores numéricamente equivalentes a los del UTCI, lo que permitió la homologación de ambos índices, además de establecer los rangos de temperatura equivalente en actividad intensa para la escala de VST_{ai} .

Se utilizó un total de 332 observaciones, las que se recopilaron de la base de datos propia, con ello se

Tabla 6. Escalas homologadas entre VSTai y UTCI. Fuente: Elaboración del autor.

UTCI categoría de estrés	VST	Escala ISO 10551
Estrés por calor intenso y/o extremo	7	mucho calor
Estrés por calor fuerte	6	calor
Estrés por calor moderado	5	algo de calor
Confort térmico	4	ni calor ni frío
Estrés por frío leve	3	algo de frío
Estrés por frío moderado a fuerte	2	frío
Estrés por frío intenso y/o extremo	1	mucho frío

Tabla 7. Comparativa de simulaciones de modelo y valor para pruebas de hipótesis. Fuente: Elaboración del autor.

	observaciones	Suma Respuestas	Media	Varianza	F crítica	F Calculada	Z crítica	Z Calculada
VST	332	1853	5.58	1.07	-	-		
VSTai	332	1873.31	5.73	0.18	3.86	3.36	±1.96	-1.84
UTCI eq	332	2361.1	7.11	0.59	3.86	473.19	±1.96	-21.78
UTCI eqcal	332	2111.8	6.46	0.18	3.86	463.10	±1.96	-18.63

calculó el VST con ambos modelos; la simulación se estableció bajo las características de la temporada cálida de sensación térmica de la región, sujetos con actividades deportivas intensas y en condiciones extremas de variables meteorológicas.

Se asoció entonces la temperatura equivalente calculada (Ecuación 1 y Ecuación 4) para tener una base comparativa de los índices; posteriormente, mediante la extrapolación empírica de rangos de niveles de estrés de cada uno de ellos, se determinó la escala numérica a los valores resultantes de Te del UTCI, se generó una homologación de ambos y se realizó la comparativa (Tabla 6).

Para establecer la pertinencia del estudio, se realizaron análisis estadísticos comparativos de los modelos respecto al VST; se realizó un análisis correlacional lineal de Pearson y Spearman que permitió establecer cuantitativamente la forma en que se asocian los resultados; ambos coeficientes se calcularon para tener un punto comparativo, que anticipó que el coeficiente de Spearman es robusto ante la presencia de datos atípicos y con ello obtener mayor certeza de la normalidad de la muestra.

Por otro lado, el desarrollo del análisis de varianza ANOVA y pruebas Z permitió comparar las medias grupales (los VST y los calculados por los índices), esto determinó que al menos alguno de ellos difería significativamente entre los grupos. Con este proceso, se buscó validar las hipótesis planteadas de la eficiencia y aplicabilidad de cada uno de los modelos en las condiciones regionales.

RESULTADOS

El modelo para la ciudad de Mexicali (VSTai) y el índice TE_{ai} que se desarrollaron específicamente para la región, fueron más eficiente al momento de calcular el VST; lo que concordó principalmente con Barcia-Sardiñas et al., (2020), Monteiro y Alucci (2009), se visualizó en los resultados del proceso que efectivamente un modelo no regional tendía a una sobreestimación de la ST (ver las medias VST de la Tabla 7); en cambio el VSTai calculó VST más acertados, ya que su media sólo discrepó en un 3 % en relación con las respuestas observadas en las bases de datos.

Las diferencias observadas al calcular el VST con el modelo VSTai y el UTCI son significativas, la variabilidad demuestra mayor homogeneidad en el modelo regional al obtener mejores cálculos en comparación con el otro índice. Esto se puede visualizar al momento de establecer las medias de predicciones y compararla con el de los VST recabada de los sujetos donde se tienen una diferencia de solo 0.15 (VSTai) y 1.53 en comparación con el VST equivalente para el UTCI; aún con el índice UTCI calibrado, el valor de sus predicciones continúa muy alejada al de los votos observados el que es .86 puntos de la percepción térmica (tabla 7). Esto confirma el análisis de varianza con el que se determinó la diferencia de medias entre el VST y el UTCI y se robustece con la prueba Z, que con el parámetro calculado de -1.84 corroboró la fiabilidad del modelo regional ya que acepta la hipótesis de homogeneidad de la media entre VST y VST calculado por el mismo.

Tabla 8. Correlación entre VST y predicciones de ST de los modelos. Fuente: Elaboración del autor.

	Correlación Pearson	Correlación Spearman	Aciertos %	Calibración de índice		
				Correlación Pearson	Correlación Spearman	Aciertos %
VSTai	0.31	0.32	67	-	-	-
UTCI eq cal*	0.12	0.14	31	0.18	0.21	53

Nota: UTCI eq cal se refiere a la calibración empírica hecha al Universal Thermal Climate Index

Tabla 9. Calibración empírica del UTCI en relación con el VSTai. Fuente: Elaboración del autor.

UTCI (°C) rango calibrado	Categoría de estrés	Escala ISO 10551	
Por encima de +36	Estrés por calor extremo	7	mucho calor
+31 a +36	Estrés por calor fuerte	6	calor
+28 a +31	Estrés por calor moderado	5	algo de calor
+24 a +28	Confort térmico	4	ni calor ni frío
+20 a 24	Estrés por frío leve	3	algo de frío
+17 a 20	Estrés por frío moderado a fuerte	2	frío
Debajo de + 17	Estrés por frío intenso	1	mucho frío

Todo esto se enmarca en la formulación de mayor eficiencia de los modelos regionales, esto corrobora lo encontrado por Monteiro y Alucci (2009) que menciona que un modelo regional con enfoque adaptativo aun al contar con menores coeficientes de determinación, son mejores al momento de calcular el voto de confort.

También se visualizó que la correlación de Pearson es mayor entre el VSTai y los VST en comparación al UTCI calibrado (Tabla 8); se puntualizó la efectividad de predicción del modelo psicofisiológico con un porcentaje de aciertos de 67%, mientras que el UTCI solamente contó con un 31%. Incluso se observó al comparar los resultados del UTCI calibrado una cantidad de votos acertados del 53%, con lo que el modelo regional sigue obteniendo mejores parámetros estadísticos, adaptándose mejor a las condiciones.

Así mismo, se observó que las correlaciones de Spearman son mejores en el VSTai, lo que demuestra una validación de fiabilidad del VSTai en la región en comparación al otro modelo, estableciéndose mayor eficiencia para predecir la sensación térmica.

A raíz de esto la calibración realizada al índice UTCI (Tabla 9), proporcionó una mejor correlación con los datos empíricos recopilados y en consecuencia un mayor

porcentaje de predicciones correctas. Con esto se infiere que, lo adecuado es utilizar el modelo que tenga una mayor correlación entre VST y las predicciones de éstos; lo anterior fundamenta los resultados encontrados puesto que, aun al ser calibrado el modelo UTCI siguió con una tasa de aciertos menor al modelo VSTa, que como se mencionó anteriormente, concuerda con lo encontrado con Monteiro y Alucci (2009).

Por otro lado, el Índice TE_{ai} presenta la correlación más alta entre el parámetro del modelo y las respuestas del sujeto, lo que lleva también a mejorar las predicciones al momento de realizar simulaciones de éste; por lo que las estimaciones de un modelo de equilibrio termofisiológico y de adaptación que necesita varias iteraciones para proporcionar resultados confiables (VSTai) presenta mejores resultados y refleja la importancia de la adaptación y aclimatación de los sujetos a las condiciones meteorológicas de la región.

CONCLUSIONES

La comparación entre los dos índices de Te - UTCI y TE_{ai} - demostró que el desarrollo de modelos e índices de confort es de importancia al momento de predecir

la percepción térmica de los sujetos en un ambiente exterior; El modelo VSTai con una escala de medición de la sensación térmica (numérica solamente) no es suficiente, por lo que es imperante que además se reflejen rangos de temperaturas equivalentes para una mejor aplicación e interpretación, como lo desarrollado en la investigación para poder generar estos puntos de comparación (Błażejczyk et al., 2000; Monteiro y Alucci 2011; Błażejczyk et al., 2012).

El estudio empírico comparativo hecho con el UTCI permitió la verificación de los resultados para dar validez al modelo desarrollado y establecer su efectividad a través de pruebas estadísticas de hipótesis; Esto concuerda con las investigaciones mencionadas, donde los modelos regionales son más adecuados al momento de calcular la Te y VST (Monteiro y Alucci 2009) y parcialmente con el de Tumini y Pérez (2015), donde el UTCI si bien se comparó con otro modelo, no tenía una misma escala de medición. Esto contribuye a robustecer el interés de los investigadores a generar este tipo de modelos e índices que ayudan al entendimiento de los efectos de las variables microclimáticas en la salud de las personas.

Por lo tanto, al realizar una comparativa de varianza de medias de los resultados del VSTai con modelo predictivo (incluso calibrado) se determinó su aplicabilidad y fiabilidad; esto concuerda con Monteiro y Alucci (2009). que calibró diversos índices a partir de un modelo regional el que demostró que aun así se sobrestimó la ST de las personas.

La principal contribución del trabajo realizado fue proporcionar un índice de temperatura equivalente (TE_{ai}) derivado de un modelo psicofisiológico (Ecuación 4) que es fácil de usar, intuitivo y confiable que ayuda a evaluar el confort térmico en espacios al aire libre; este tipo de trabajos aporta un entendimiento de cómo los aspectos del confort pueden afectar a la salud en climas extremos y cómo la tasa metabólica alta, la aclimatación, adaptación y el aspecto psicológico afecta a la percepción ambiental y sirve como base para generar sistemas de alerta temprana en la región.

Prospectivamente es necesario considerar:

- Por los límites en los que fue desarrollado el modelo y la validación del TE_{ai} propuesto no puede aplicarse en otras regiones con otros climas, puesto que sobrestimaría o subestimaría la sensación térmica por las características propias de la región, los niveles de actividad de las personas y las condiciones urbanas.
- Es necesario aumentar la cantidad de observaciones y para corroborar la efectividad del modelo y de los rangos propuestos en TE_{ai}.
- Sería conveniente, generar trabajos en diferentes climas al del estudio para corroborar el comportamiento del modelo bajo condiciones diversas.
- Determinar, como el aspecto subjetivo del confort interviene en el aumento de la fiabilidad de los modelos que se desarrollan.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

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

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología, además del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, por el apoyo brindado a la investigación doctoral titulada "Confort térmico en espacios públicos exteriores para actividades deportivas intensas: en clima cálido seco extremo" número de CVU 556780, de la cual se desprende este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barcia-Sardiñas, S., Otero-Martín, M., Hernández-González, D., Gómez-Díaz, D., y Gómez-Camacho, L. (2020). Comparación de diferentes índices bioclimáticos en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 26(3). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2664-08802020000300008&lng=es&tlng=es.
- Błażejczyk, K., Tokura, H., Borkwicz, A., y Szymczak, W. (2000). Solar radiation and thermal physiology in man [Paper presentation]. International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology, 15, 1999, Sydney. Geneva: World Meteorological Organization, p. 267-272.
- Błażejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., y Tinz, B. (2012). "Comparison of UTCI to selected thermal indices". *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 515– 535.
- Błażejczyk, K. y Kunert, A. (2011). *Bioclimatic principles of recreation and tourism in Poland*. Institute of Geography and Spatial Organization.
- Bojórquez-Morales, G., Gómez-Azpeitia, G., García-Cueto, R., Romero-Moreno, R., Luna-León, A., García-Gómez, C., y Ruiz-Torres, P. (2014). *Confort térmico en espacios públicos exteriores en periodo cálido*. Ekotectura, Bogotá, Colombia.

Boussaidi, K., Djaghroui, D., Benabbas, M. y Altan, H. (2023). Assessment of Outdoor Thermal Comfort in Urban Public Space, during the Hottest Period in Annaba City, Algeria. *Sustainability*, 15(15), 11763. <https://doi.org/10.3390/su151511763>

Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., y 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>

Candido, C., y de Dear, R. (2012). From thermal boredom to thermal pleasure: a brief literature review. *Ambiente Construido*, 12(1), 81-90. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000100006>

Carlucci, S., y Pagliano, L. A. (2012). A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings. *Energy and Buildings*, 53(1), 194-205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.015>

Dashrath-Khaire, J., Ortega-Madrigal, L., y Serrano-Lanzarote, B. (2021). Outdoor thermal comfort in built environment: A review of studies in India. *Energy and Buildings*, 303, 113758. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113758>

De Freitas, C. R., y Grigorieva, E. A. (2015). A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices, *International Journal of Biometeorology*, 59, 109-120. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0819-3>

de Dear, R., (2011). Revisiting and old hypothesis of human thermal perception: alliesthesia. *Building Research & Information*, 39(2), 108-117. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.552269>

Epstein, Y., y Moran, D. S. (2006). Thermal comfort and the heat stress indices. *Industrial Health*, 44(3), 388-398. <https://doi.org/10.2486/indhealth.44.388>

Fang, Z., Feng, X., Liu, J., Lin, Z., Ming-Mak, J., Niu, J., Tse, K., y Xu, X. (2019). Investigation into the differences among several outdoor thermal comfort indices against field survey in subtropics, *Sustainable Cities and Society*, 44, 676-690. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.022>

Fernández García, F., Galán, E., y Cañada Torrecilla, R. (2012). Caracterización del régimen bioclimático medio del área metropolitana de Madrid, mediante la aplicación de la temperatura fisiológica (PET), *Territoris*, 8, 505-514. <https://raco.cat/index.php/Territoris/article/view/259755>

Ghani, S., Mahgoub, A., Bakochristou, F. y ElBialy, E. (2021). Assessment of thermal comfort indices in an open air-conditioned stadium in hot and arid environment, *Journal of Building Engineering*. 40, 102378. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102378>

González González F. (2021). Propuesta metodológica para el análisis de las afectaciones en la salud y confort térmico del ser humano debido al cambio climático en tres regiones de México, *Acta universitaria*, 31, e3071, <https://doi.org/10.15174/au.2021.3071>

International Organization for Standardization. ISO 10551. (2019) Ergonomics of thermal environment – assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales. Ed. International Organization for Standardization, Ginebra.

International Organization for Standardization. ISO 7730, (2006). Moderate thermal environment-determination of the PMV and PPD indices and specifications of conditions of thermal comfort. E.U.A.: International organizations for Standardizations.

International Organization for Standardization. ISO 9920. (2007). Ergonomía del ambiente térmico. Estimación del aislamiento térmico y de la resistencia a la evaporación de un conjunto de ropa. E.U.A.: International organizations for Standardizations.

International Organization for Standardization. ISO 7726. (1998). Ergonomía de los ambientes térmicos. Instrumentos de medida de las magnitudes físicas. E.U.A.: International organizations for Standardizations.

Jiaqi, N., Jiangpeng, X., Hongqiao Q., Jinming H., Jianfeng D., Guifeng H., y Jie Y., (2022). Influence of thermal comfort of green spaces on physical activity: Empirical study in an urban park in Chongqing, China, *Building and Environment*, 219, 109168. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109168>

Jendritzky, G., de Dear, R., y Havenith, G. (2012). UTCI—Why another thermal index?, *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 421-428. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>

Jing, W., Qin, Z. y Mu, T. (2024). Evaluating thermal comfort indices for outdoor spaces on a university campus, *Scientific Reports*, 14, 21253. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71805-5>

Johansson, E. (2006). Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: a study in Fez, Morocco, *Building and Environment*, 41(10), 1326-1338. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.022>

Lai, D., Lian, Z., Liu, W., Guo, C. Liu, W., Liu, K. y Chen, Q., (2020). A comprehensive review of thermal comfort studies in urban open spaces, *Science of The Total Environment*, 742, 140092. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140092>

Liu, Z., Li, J., y Xi, T. (2023). A Review of Thermal Comfort Evaluation and Improvement in Urban Outdoor Spaces, *Buildings*, 13(12), 3050. <https://doi.org/10.3390/buildings13123050>

López-Cañedo, J.Y., Rincón-Martínez, J.C., y Fernández Melchor, F. (2021). Estimation of thermal comfort by physical variable of the thermal environment: A study in open spaces at UABC-Sauzal, México, *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 4(2), 58–80. <https://doi.org/10.37636/recit.v425880>

Manavvi, S. y Rajasekar, E., (2021). Evaluating outdoor thermal comfort in “Haats” – The open air markets in a humid subtropical region, *Building and Environment*, 190, 107527. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107527>

Manavvi, S., y Rajasekar, E. (2022). Evaluating outdoor thermal comfort in urban open spaces in a humid subtropical climate: Chandigarh, India, *Building and Environment*, 209, 108659. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108659>

Manavvi, S., y Rajasekar, E., (2023). Assessing thermal comfort in urban squares in humid subtropical climate: A structural equation modelling approach, *Building and Environment*, 229, 109931. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109931>

Marchante, G., & González, A. (2020). Evaluación del confort y disconfort térmico, *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 41(3), 21-40. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282020000300021&lng=es&tlng=es

Martín del Campo Saray, F. J., Valladares Anguiano, R., Bojórquez Morales, G., y García Gómez, C. (2020). Development of thermal habitability index in cold period for outdoor public spaces. *Revista De Ciencias Tecnológicas*, 3(3), 145–172. <https://doi.org/10.37636/recit.v33145172>

Martínez-Bermúdez, E., y Rincón-Martínez, J. C. (2024). Estimación del confort térmico en espacios exteriores: evaluación del periodo frío en Ensenada, Baja California. *Revista de Arquitectura* (Bogotá), 26(2), 151-166. <https://doi.org/10.14718/REVARQ.2024.26.3637>

Monteiro, L., y Alucci, M. (July 2011). Proposal of an outdoor thermal comfort index: empirical verification in the subtropical climate [Conference Paper]. Architecture And Sustainable Development, Proceedings of PLEA 2011, Louvain-la-Neuve, Belgium. https://www.researchgate.net/publication/345855050_Proposal_of_an_outdoor_thermal_comfort_index_empirical_verification_in_the_subtropical_climate

Monteiro, L., y Alucci, M. (29 June - 3 July 2009). Thermal Comfort Index for the Assessment of Outdoor spaces in Subtropical Climates [Conference Paper]. The seventh International Conference on Urban Climate, Yokohama, Japan. http://www.ide.titech.ac.jp/~icuc7/extended_abstracts/pdf/375911-1-090514092824-005.pdf

Nikolopoulou, M., y Lykoudis, S. (2006). Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries, *Building and Environment*, 41(11), 1455-1470. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.031>

Núñez-de Anda, A., Rincón-Martínez, J.C., Bojórquez-Morales, G., y Llamas-Estrada, A. (2024). Confort higrotérmico en espacios públicos abiertos de clima mediterráneo en periodo de transición térmica, *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 25(1), 1-12. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2024.25.1.005>

Peng, Y., Feng, T., y Timmermans, H. (2019). A path analysis of outdoor comfort in urban public spaces, *Building and Environment*, 148, 459-467. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.023>

Rincón-Martínez J. C., Martínez-Torres, K., González-Trevizo, M. E. y Fernández-Melchor, F (2020). Modelos matemáticos para estimar el confort térmico adaptativo en espacios interiores: Un estudio en la transición térmica de Ensenada, B.C., *Ingeniería Revista Académica, Universidad Autónoma de Yucatán*, 24(1), 1-17. <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/186>

Sarhadi, F., y Rad, V.B. (2020). The structural model for thermal comfort based on perceptions individuals in open urban spaces, *Building and Environment*, 185, 107260. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107260>

Tumini, I., y Pérez Fargallo, A. (2015). Aplicación de los sistemas adaptativos para la evaluación del confort térmico en espacios abiertos, en Madrid, *Hábitat Sustentable*, 5(2), 57–67. <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/1933>

ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DE ESTRATEGIAS PARA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN VIVIENDA, APLICANDO LA NORMATIVIDAD VIGENTE EN EL NOROESTE DE MÉXICO

COST-BENEFIT ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY STRATEGIES FOR HOUSING, APPLYING THE CURRENT REGULATIONS IN NORTHWEST MEXICO

ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO DE ESTRATÉGIAS PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM RESIDÊNCIAS, APLICANDO AS REGULAMENTAÇÕES ATUAIS NO NOROESTE DO MÉXICO

Cecilia Galindo-Borbón

Magíster en en Ciencias Ambientales
 Profesora de asignatura, Departamento de Arquitectura y Diseño
 Universidad de Sonora, Hermosillo, México
<https://orcid.org/0000-0002-9637-7173>
 cecilia.galindo@unison.mx (Autora de Correspondencia)

Ana Borbón-Almada

Doctora en Ciencias
 Profesora de tiempo completo, Departamento de Ingeniería Civil y Minas
 Universidad de Sonora, Hermosillo, México
<https://orcid.org/0000-0002-7781-2571>
 ana.borbon@unison.mx

José M. Ochoa-de-la-Torre

Doctor en Arquitectura
 Investigador de tiempo completo, Departamento de Arquitectura y Diseño
 Universidad de Sonora, Hermosillo, México
<https://orcid.org/0000-0001-6035-1249>
 josemanuel.ochoa@unison.mx

Irene Marincic-Lovriha

Doctora en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos
 Profesora de tiempo completo, Departamento de Arquitectura y Diseño
 Universidad de Sonora, Hermosillo, México
<https://orcid.org/0000-0002-8609-2748>
 irene.marincic@unison.mx



RESUMEN

El cambio climático ha afectado de manera desproporcionada a los sectores más vulnerables, y la eficiencia energética en edificaciones emerge como clave para mitigar y adaptarse a estos efectos. En México, los climas cálidos secos predominan en el 53% del territorio, especialmente en el norte, y aunque existe normativa para la eficiencia energética en la edificación, ésta tiene un impacto limitado. El estudio evalúa los costos y beneficios de dicha normativa que considera viviendas comunes en distintos climas de un estado del norte de México donde se analizaron 180 modelos y se concluyó que cumplir con la normativa aumentaría el costo de la vivienda en 1.93%, reduciría el consumo eléctrico en 26% y disminuiría las emisiones de CO₂e en 16.95%. Estos beneficios se obtuvieron sin cambiar los sistemas constructivos más utilizados y se priorizó sistemas de sombreado. Los resultados podrían orientar a políticas públicas más adecuadas a los contextos locales.

Palabras clave

cambio climático, vivienda, energía eléctrica, normalización, consumo de energía.

ABSTRACT

Climate change has disproportionately affected the most vulnerable sectors, and energy efficiency in buildings is essential for mitigating and adapting to these effects. In Mexico, hot, dry climates predominate in 53% of the country, especially in the north, and although there are energy efficiency regulations for buildings, they have a limited impact. This study evaluates the costs and benefits of these regulations considering ordinary dwellings in different climates in a state in northern Mexico, analyzing 180 models and concluding that complying with the regulations would increase the cost of housing by 1.93%, reduce electricity consumption by 26%, and decrease CO₂e emissions by 16.95%. These benefits were obtained without changing the most commonly used construction systems, although shading systems were prioritized. The results can guide public policies that are more appropriate to local contexts.

Keywords

climate change, housing, electric power, standardization, energy consumption.

RESUMO

As mudanças climáticas afetam desproporcionalmente os setores mais vulneráveis, e a eficiência energética em edifícios surge como uma das chaves para mitigar e adaptar-se a esses efeitos. No México, os climas quentes e secos predominam em 53% do território, especialmente no norte, e, embora existam regulamentações para a eficiência energética em edifícios, elas têm impacto limitado. O estudo avalia os custos e benefícios de tais regulamentações considerando residências comuns em diferentes climas em um estado do norte do México. Ele analisou 180 modelos e concluiu que a conformidade com a norma aumentaria o custo da moradia em 1,93%, reduziria o consumo de eletricidade em 26% e reduziria as emissões de CO₂e em 16,95%. Estes benefícios foram obtidos sem alterar os sistemas de construção mais comumente usados e os sistemas de sombreamento foram priorizados. Os resultados podem orientar políticas públicas mais adequadas aos contextos locais.

Palavras-chave:

mudança climática, habitação, energia elétrica, padronização, consumo de energia

INTRODUCCIÓN

El sexto informe del IPCC (2023) señala que los efectos del cambio climático han sido más graves de lo previsto, lo que afecta a los sistemas naturales y a los sectores socioeconómicos, especialmente a los más vulnerables. Estos impactos incluyen problemas de salud física y mental, como resultado de fenómenos como olas de calor extremo, que aumentan la mortalidad y morbilidad. El informe subraya la necesidad que los gobiernos enfrenten estos desafíos mediante políticas de adaptación y resiliencia, destacándose la importancia de la diversificación energética, la descentralización de la generación y la gestión de la demanda, con un enfoque particular en la eficiencia energética de las edificaciones como clave para mitigar y adaptarse al cambio climático.

Según el último informe de la Agencia Internacional de Energía, IEA (2023), el sector de la edificación representa el 30% del consumo final total de energía en el mundo. Esto se debe principalmente a la demanda de energía para el confort térmico de los espacios, donde la calefacción es una de las primeras demandas de uso final de energía y el enfriamiento de espacios es el uso final de mayor crecimiento en las últimas décadas en donde además, las predicciones para el aumento de superficie construida a nivel mundial ronda en un 20% de 2021 al 2030, y de la que el 80% se encontraría en economías de mercados emergentes, agravado por los efectos crecientes del cambio climático (IEA, 2022).

En México el sector de la edificación representa el 18% del consumo final total de energía que considera los edificios residenciales, comerciales y públicos y, el principal energético es la electricidad (Secretaría de Energía [SENER], 2023). Sin embargo, el consumo de energía está determinado en gran medida por las características del clima que condicionan la habitabilidad al uso de sistemas de enfriamiento (A/C) y, por lo tanto, la distribución del consumo en el territorio nacional no es uniforme. En general, en el 89% del territorio mexicano predominan los climas cálidos húmedos y secos, pero particularmente los climas cálidos secos (muy seco, seco desértico, seco y semiseco) que representan el 53% de la superficie total, y se ubican en la región norte del país (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2024b).

El gasto energético en los hogares se compone de combustibles, gas y electricidad y a través de este gasto se puede describir la demanda energética que identifica la fuente de energía, así como su nivel de consumo (Rodríguez et al., 2022). Particularmente, los estados del norte son los que invierten mayor recurso económico en el gasto energético (Figura 1); y, la electricidad puede superar el 60% y hasta el 70% de ese gasto (Rodríguez et al., 2022).

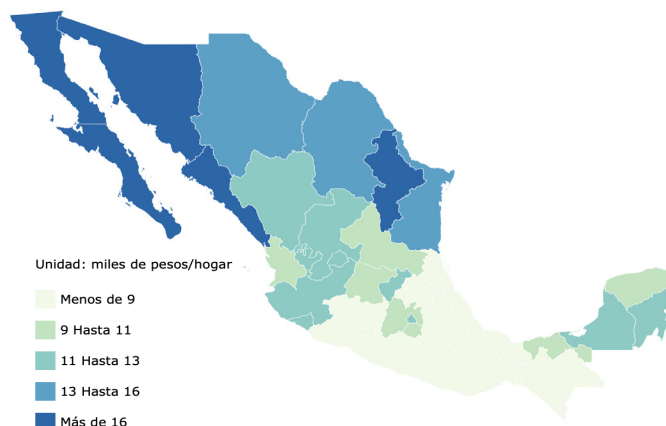


Figura 1. Gasto de energía por hogar en el territorio mexicano .
 Fuente: imagen extraída Secretaría de Energía [SENER] y Comisión Nacional del Uso Eficiente de la Energía [CONUEE] (2024), 19.80 \$ MEX/dólar para agosto de 2024.

A nivel nacional, los usos finales de la electricidad en el sector residencial se componen de la siguiente forma, el enfriamiento de espacios ocupa el 30%, del total, la refrigeración de alimentos el 20%, el uso de electrodomésticos y otros enseres el 15%, entretenimiento que se refiere específicamente a la televisión con una demanda del 13%, la iluminación con el 8% y, lavado de ropa con el 6%, calentamiento de agua 5%, calefacción 2% y bombeo 1% (Contreras et al., 2022). Es necesario subrayar que estos datos son promedios nacionales, y que el porcentaje del uso final por enfriamiento de espacios sería mayor en las zonas con temperaturas elevadas. No se tiene un dato preciso, pero, en las zonas de clima tropical, se consume un 14% más de energía eléctrica que en las de clima templado, mientras que, en los estados del norte, con clima seco, este consumo es de un 29% superior al del clima templado (Rodríguez, 2018; INEGI, 2022); esta diferencia se asume que corresponde principalmente al mayor uso de energía para el enfriamiento de espacios por las condiciones de temperatura.

Habría también que considerar, que es altamente probable que la necesidad de energía por confort térmico aumente; para dimensionar la incertidumbre, según el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático (INECC, 2022) para los estados del norte de México, en un mediano plazo y en un escenario RCP4.5 de estabilización media, la anomalía en la temperatura media sería de 1.9°C y para un escenario RCP8.5 de altas emisiones sería de 2.4°C (López-Díaz et al., 2022).

Este problema se agrava al reconocer que alcanzar el confort térmico requiere recursos económicos y energéticos suficientes, sin embargo, un sector de la población se encuentra en situación de vulnerabilidad debido a su limitado acceso. En la última década ha crecido el interés por este tema, ampliándose las

investigaciones sobre el fenómeno de la pobreza energética (Siksnelyte-Butkiene et al., 2021), lo que argumenta que ésta no sólo depende del acceso a la energía, sino que también está determinada por las características del territorio, el contexto temporal y las condiciones sociotécnicas y socioculturales específicas.

En este sentido, los niveles de ingreso (García Ochoa, 2022; Méndez et al., 2021; Panca & Calatayud, 2021), los precios de la energía y los subsidios (Durán & Condori, 2021; Méndez et al., 2021) son factores importantes, pero también influyen otros elementos, como las condiciones climáticas (García Ochoa, 2022; Santillán et al., 2020), normativas para la calidad de las viviendas y sus instalaciones (García Ochoa, 2022; Hernández, Aguayo y Duque, 2018; Méndez et al., 2021; García Ochoa, Ávila-Ortega y Cravioto, 2022; Panca & Calatayud, 2021), así como la asequibilidad de tecnologías energéticas (Hernández, Aguayo y Duque, 2018; García Ochoa, 2022; García Ochoa, Ávila-Ortega y Cravioto, 2022).

En este contexto, la incertidumbre sobre la capacidad de edificios y sistemas de acondicionamiento para garantizar confort térmico, junto con las limitaciones económicas de gobiernos e individuos, plantea un reto de política pública con impacto en la salud (IEA, 2022). He aquí donde radica la importancia de esta investigación, pues se identifica a la eficiencia energética como una estrategia para proveer, en cierta medida, dichas condiciones de habitabilidad.

En México existe una estructura normativa específica para la eficiencia energética en la edificación, con una serie de Normas Oficiales Mexicanas, (NOM) que regulan diversos aspectos técnicos, como el etiquetado de aparatos de aire acondicionado, electrodomésticos, sistemas de vidrios, y la envolvente térmica de edificaciones. Sin embargo, se destaca que las normativas para la envolvente térmica, específicamente la NOM-008-ENER-2001, Eficiencia Energética En Edificaciones, Envolvente de Edificios No Residenciales y la NOM-020-ENER-2011. Eficiencia Energética En Edificaciones, Envolvente de Edificios Residenciales, establecidas para racionalizar el uso de la energía en sistemas de aire acondicionado que considera un edificio de referencia como base, no han tenido el impacto esperado a pesar de ser obligatorias. Las razones por las que dichas normativas no han impactado lo esperado se atribuye a diversidad de factores, entre ellos aspectos logísticos y técnicos.

Entre los detalles logísticos se destaca que ambas normas no se integran a los reglamentos de construcción locales así como falta de coordinación por los 3 niveles de gobierno, no existe capacidad técnica de profesionales para su implementación, no

se exige de forma obligatoria en programas operados por organismos de crédito y vivienda, o en todo caso, se procuran sólo criterios opcionales y, existe una objeción del sector de la construcción, específicamente porque implica un costo adicional (Rodríguez, 2018; Martín-Domínguez et al., 2018)

Entre los detalles técnicos de la metodología de cálculo se identifica una sobreestimación de la absorción solar de la envolvente del edificio (Martín-Domínguez et al., 2018); la omisión de la capacidad calorífica de los materiales, dado que el modelo de cálculo no considera las variaciones de temperatura ambiental a lo largo del tiempo (Huelsz et al., 2014), lo que conlleva, en esencia, a un sobredimensionamiento del aislamiento. Además, la necesidad de una actualización de datos meteorológicos para responder al fenómeno del cambio climático y, que la norma no proporciona un modelo de confort (Guízar Dena et al., 2021).

La aplicación de normativas de eficiencia energética en las edificaciones de México es ineludible e impostergable, especialmente en las viviendas de las regiones del norte del país, dadas las condiciones críticas de cambio climático, el aumento de la demanda energética y los elevados costos económicos y sociales. Ante dicha urgencia, sería importante maximizar el potencial de las normativas vigentes, donde la aplicación de esta podría generar resultados significativos, especialmente al considerar las particularidades climáticas de esta región.

Este estudio se centra en la aplicación de la metodología de la NOM-020-ENER-2011. Eficiencia Energética En Edificaciones, Envolvente de Edificios Residenciales y el objetivo es identificar combinaciones de estrategias que maximicen el impacto en la evaluación del cumplimiento normativo con la menor inversión económica, que permitan definir beneficios en términos de ahorro por gasto de energía y disminución de emisiones, así como el costo de alcanzar el nivel de cumplimiento, al menos en su nivel mínimo. Además, se consideran los diseños y sistemas constructivos más comunes en la región y, por último, los resultados que pudieran contribuir a orientar políticas públicas mejor adaptadas a los contextos locales.

METODOLOGÍA

En este ejercicio se analizaron localidades ubicadas en un estado de la región norte de México, específicamente Sonora, donde el 95% del territorio estatal es clima cálido y seco (INEGI, 2024) y al 2017, el 71% de los hogares tenían A/C (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía [CONUEE], 2024).

Tabla 1: Localidades incluidas en la NOM-020 para Sonora, tarifa eléctrica correspondiente y clima. Fuente: Elaboración de los Autores, con información de CFE (2024), NOM-020 (2011), INEGI (2024).

Localidad	Latitud	Tarifa	Descripción de la Tarifa	Clima	Escalones de consumo
Hermosillo	29.10N	1F	Servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima en verano de 33°C	Muy seco muy cálido	Primer escalón de 1 a 1,200kWh, segundo escalón de 1,201 a 2500kwh, el resto es excedente.
Obregón	27.49N	1F		Seco muy cálido	
Guaymas	27.92N	1E	Servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima en verano de 32°C	Muy seco muy cálido	
Navojoa	27.07N	1E		Seco muy cálido	
Nogales	31.31N	1A	Servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima en verano de 25°C	Semiseco templado	Primer escalón de 1 a 300kWh, segundo de 301 a 1200 kWh, tercero de 1201 a 2500 kWh, el resto es excedente.

Este estudio consideró el análisis de 9 modelos de vivienda en las 4 orientaciones y a la vez en 5 tipos de clima en el Estado, los que dieron un total de 180 modelos analizados. Se realizó una evaluación inicial sin considerar condiciones de eficiencia y, con base en los resultados, se implementaron estrategias para alcanzar el nivel de eficiencia deseado cuantificándose los costos y posibles ahorros.

Para el análisis, se utilizó la NOM-020-ENER-2011. Eficiencia Energética En Edificaciones, Envolvente de Edificios Residenciales (2011) que en adelante llamaremos NOM-020, la que se aplica en las viviendas localizadas en ciudades cuyo suministro de energía eléctrica cuenta con las siguientes tarifas eléctricas: 1C, 1D, 1E y 1F (Resolución de la NOM-020-ENER-2011, 2016).

Estas tarifas las establece la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2024) y se definen según una clasificación de temperatura media mínima en verano; las tarifas van de la 1, 1A y hasta la 1F, y una tarifa de doméstica de alto consumo (DAC). La tarifa 1F es la que corresponde a la temperatura media mínima más alta y aplica al subsidio más alto para la temporada de verano. Los subsidios se estructuran en escalones de consumo y cada uno de estos presenta un incremento en el costo por kWh. Derivado de las altas temperaturas registradas en el 2023, los usuarios de energía eléctrica en el Estado de Sonora registraron consumos por mucho, superiores a los de otras regiones del país, lo que orilló a una condición extraordinaria de reclamo social; en este contexto se elaboró el Convenio de colaboración para apoyo tarifario para el Estado de Sonora (2024), donde se detalla un subsidio mayor que beneficia a todo el Estado, abarca los meses de abril a octubre, considera ajustes en los escalones de consumo, homologan las tarifas 1F y 1E y se mejoran las condiciones para el resto de las tarifas. Ver Tabla 1.

La NOM-020 incluye en sus tablas valores para el cálculo del flujo de calor, a través de la envolvente para

ciudades específicas, y en el caso de Sonora, considera sólo 5 localidades; Hermosillo y Ciudad Obregón que les corresponde tarifa 1F, Guaymas y Navojoa con tarifa 1E, y Nogales con la tarifa 1A, ver Tabla 1. Y, aunque la resolución de la NOM-020 indica que Nogales no es sujeto de la verificación de la norma, se realizará el análisis con el objetivo de ampliar las posibles observaciones.

Algunas de las características representativas del diseño de la vivienda económica en el clima cálido seco, son por lo general únicas en el terreno y se desplantan en uno de los límites de la propiedad lo que provoca que la vivienda no comparta muros, además de no contar con sistemas de aislamiento y, aunque pueden variar en su distribución, se conforman por un área común (estancia, comedor y cocina), una o varias recámaras y baño, además las fachadas no consideran protección solar (Romero Moreno et al., 2020) y la mayor proporción de ventanas están ubicadas en las fachadas principal y posterior. En términos de área de construcción, el 58% de la vivienda en el estado de Sonora está entre los 46 m² y los 150 m² (INEGI, 2020) y referente a los sistemas constructivos más utilizados, el 92% de las viviendas en el estado tienen muros de ladrillo, block, cemento o concreto (INEGI, 2022), particularmente muros de bloque de concreto de 0.12m de espesor (Romero Moreno et al., 2020); finalmente, las losas de techo de concreto o viguetas con bovedilla se presentan en un 72% (INEGI, 2022) donde particularmente predomina losa de vigueta y bovedilla de 0.15m de espesor (Romero Moreno et al., 2020).

Para este análisis, los 9 proyectos de modelos analizados de vivienda, se seleccionaron, y consideraron las características descritas en el párrafo anterior. La información de los proyectos fue proporcionada por diferentes empresas desarrolladoras de vivienda que se mantendrán anónimas. Estos modelos de 1 y 2 niveles van de los 43m² a los 126 m². En la Tabla 2 se detalla la información de cada modelo, que incluye, entre otros datos, la proporción de acristalamiento (%) de las viviendas

que corresponde a la proporción de ventanas respecto al total de superficie de los muros de la envolvente, además, se incluye en la tabla una nomenclatura para identificar a cada modelo en próximas figuras.

El método de cálculo de la NOM-020 estima la ganancia de calor por conducción y radiación del edificio proyectado y la compara con un edificio de referencia; para cumplir con la normativa las ganancias de calor del edificio proyectado debe ser igual o menor a las del edificio de referencia. Los resultados se presentan como porcentaje de ahorro, que resulta de la diferencia de la carga térmica (W) entre el edificio proyectado y el edificio de referencia. Para el cumplimiento se deberá alcanzar, al menos 0% de ahorro o más. Un número negativo representa gasto y no cumplimiento de la norma.

En la Tabla 3, se detallan los sistemas constructivos utilizados en la evaluación inicial. Respecto a la losa de piso, según la NOM-020, la porción de la envolvente que está directamente sobre la tierra se considera una ganancia de calor de cero, por lo tanto, no se incluyó.

Los valores de conductividad de cada material se tomaron de las tablas de anexos disponibles en la NOM-020 (2011) y NMX-C-460 (2009) y los valores que no estaban disponibles en estos listados, se tomaron de la ficha técnica del producto comercial, ver Tabla 3.

Los valores de referencia U establecidos por la normatividad mexicana pueden implicar un nivel elevado de aislamiento térmico. Esto se traduce en la necesidad de utilizar materiales con muy baja conductividad térmica, como los aislantes, para cumplir con los requerimientos. Sin embargo, y según la metodología de la norma, es posible optimizar el comportamiento térmico de la envolvente mediante la adopción de diferentes estrategias constructivas, como el uso de materiales ligeros, nuevas geometrías y soluciones innovadoras. Además, combinar estos enfoques con tecnologías de vidrios eficientes y sistemas de sombreado permite reducir la demanda de aislamiento. Asimismo, es fundamental contar con información más precisa sobre los valores de conductividad térmica de los materiales producidos localmente, lo que facilitaría la adecuación de las soluciones constructivas a las condiciones específicas de la región.

En el primer análisis, los resultados describen el nivel de cumplimiento del estado actual de las viviendas, es decir, sin estrategias adicionales para el cumplimiento de la NOM-020. Los resultados se describen relacionando algunas características del diseño como la proporción de acristalamiento y la orientación, así como el impacto del clima con los resultados de la NOM-020.

En un segundo análisis se aplican estrategias de eficiencia energética que impactan en el cálculo de la NOM. Las estrategias se aplicaron a aquellas viviendas que no

Tabla 2: Características de modelos analizados; 9 modelos en 4 orientaciones en los 5 tipos de clima disponibles en la NOM-020, con un total de 180 modelos. Fuente: Elaboración de los Autores.

Número de niveles	Área de construcción (m ²)	Proporción de acristalamiento (%) y sin sombreados	Nomenclatura
1	43.00	12.08	1N_43
1	54.00	9.43	1N_54
1	61.00	9.21	1N_61
1	66.00	8.60	1N_66
1	78.00	5.65	1N_78
2	97.00	6.62	2N_97
2	104.00	8.45	2N_104
2	113.00	8.19	2N_113
2	126.00	7.40	2N_126

Tabla 3: Descripción de los sistemas constructivos y valores utilizados para el cálculo de la evaluación inicial. Fuente: Elaboración de los Autores.

Sistema	Descripción	Conductividad (λ) W/mK	Fuente de los valores de λ	Espesor (m) según proyecto
Muros de block de concreto hueco	Mortero cemento arena	0.17	NMX-460	0.015
	Bloque de concreto con 2 o 3 huecos	1.11	NMX-460	0.120
Losa de vigueta y bovedilla	Concreto armado	1.74	NOM-020	0.040
	Poliestireno expandido de densidad nominal 12 kg/m ³ (Bovedilla de poliestireno)	0.04	Ficha técnica de producto comercial	0.090
	Vigueta de concreto armado	1.74	NOM-020	0.090
	Aplanado de yeso	0.372	NOM-020	0.01
Ventanas sin sombreado	Vidrio sencillo, coeficiente de sombra (CS) 1.00	0.93	NOM-020	0.006

Tabla 4: Descripción de los sistemas constructivos y valores utilizados para el cálculo de la evaluación con estrategias de mejora. Fuente: Elaboración de los Autores.

Sistema Mejorado	Descripción	Conductividad (λ) W/mK	Fuente de los valores de λ	Espesor (m) según proyecto
Muros de block de concreto hueco	Mortero cemento arena (en el exterior)	0.17	NMX-460	0.015
	Poliestireno expandido de densidad nominal 12 kg/m ³ (Placa exterior)	0.04	Ficha técnica de producto comercial	0.025
	Bloque de concreto con 2 o 3 huecos	1.11	NMX-460	0.120
	Mortero cemento arena (en el interior)	0.17	NMX-460	0.015
Losa de vigueta y bovedilla	Concreto armado (capa de compresión)	1.74	NOM-020	0.040
	Poliestireno expandido de densidad nominal 12 kg/m ³ (Bovedilla de poliestireno)	0.04	Ficha técnica de producto comercial	0.090
	Concreto armado (Vigueta)	1.74	NOM-020	0.090
	Aplanado de yeso (interior)	0.372	NOM-020	0.01
Ventana sencilla con película	Vidrio sencillo con película de control solar con un coeficiente de sombra (CS) 0.40	0.93	NOM-020	0.006

cumplieron en el primer análisis. La intención fue lograr cumplir con la NOM-020, al menos en su nivel mínimo. Los criterios para la selección de las estrategias consideran no modificar el diseño original, han de ser materiales comunes disponibles del mercado y deberán representar el menor costo posible. Para determinar dichos costos se realizó un análisis de precios unitarios que consideraron material, mano de obra y equipo con costos vigentes al 2024, además, se determinó un costo directo total de la vivienda mediante un análisis paramétrico de las partidas del proyecto y el costo estimado por m² de la vivienda económica en el 2024; con esta información se estimó el sobre costo económico del cumplimiento de la norma.

Las estrategias utilizadas se detallan a continuación:

- Sombreado horizontal de ventanas; todos los casos donde el proyecto no se cumplió con la normativa, se implementó el sombreado horizontal de ventanas como primera estrategia. El criterio para definir la longitud del elemento fue considerar la latitud de la ciudad como lo indica la tabla 1; se consideró también un período de sobrecalentamiento que abarca de mayo a octubre según las bases de datos climatológicas disponibles, así como la dimensión vertical de la ventana. Lo que resulta en un sistema de sombreado ideal, que protege de la radiación en los períodos críticos, pero también permite el calentamiento durante épocas más frías.

Si no se llega al cumplimiento de la norma con los sistemas de sombreado, se adiciona aislamiento en muros o mejoramiento de la calidad de las ventanas.

- Aislamiento en uno o dos muros con 0.025m de poliestireno expandido en el exterior. El criterio de la definición del muro a aislar fue la siguiente: si la fachada principal es norte o sur, se aisló el muro oeste. Si la fachada principal es este u oeste, se aisló muro sur.

En algunos casos se requirió asilar un segundo muro, adicionando el sur u oeste según corresponda. En la Tabla 4 se muestra la configuración de los sistemas constructivos mejorados.

- Mejora de ventanas. la estrategia consiste en mejorar las ventanas con alguna de las siguientes dos opciones: Si la vivienda mide menos de 100 m² se utiliza una película de control solar con al menos un valor de 0.4 del coeficiente de sombreado (CS) o, si la vivienda mide más de 100 m², se incluye un sistema de doble vidrio con película Low-E Doble y coeficiente de sombra (CS) 0.64. El criterio para una u otra opción depende del costo de la estrategia vs el costo de la vivienda, con la intención de no incidir excesivamente en el costo final. En la Tabla 4 se muestra la configuración de los sistemas constructivos mejorados.

En los casos críticos se utilizó el aislamiento en muros como la mejora de la calidad de ventanas. Un caso crítico se refiere a aquellos modelos que requieren todas las estrategias juntas para alcanzar el nivel mínimo de la norma.

Para calcular los consumos de energía en kWh, se tomaron los resultados de la carga térmica y se consideró el uso del A/C de abril a octubre correspondiente al período de subsidio definido en el Convenio de colaboración para apoyo tarifario para Sonora, (2024) y, un uso de 11 horas diarias que corresponde al promedio diario de A/C en la vivienda en el estado (INEGI, 2018).

Para definir el costo de la energía se consideró el consumo calculado por A/C más la proporción de consumo eléctrico por otros dispositivos descritos en la introducción, además del esquema tarifario vigente con subsidio según el Convenio de colaboración para apoyo tarifario para el Estado de Sonora, (2024)

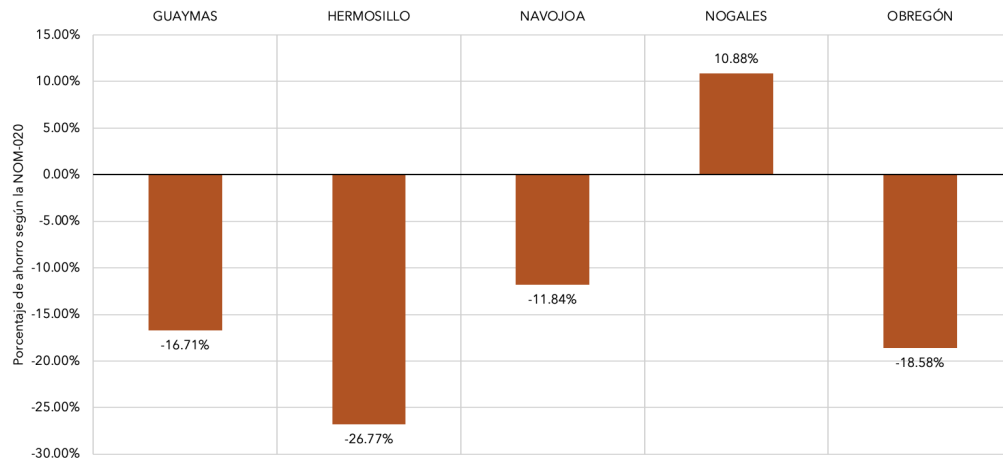


Figura 2. Promedio de ahorro de todos los modelos por ciudad en todas sus orientaciones según la NOM-020, sin estrategias de eficiencia energética. Fuente: Elaboración de los Autores.

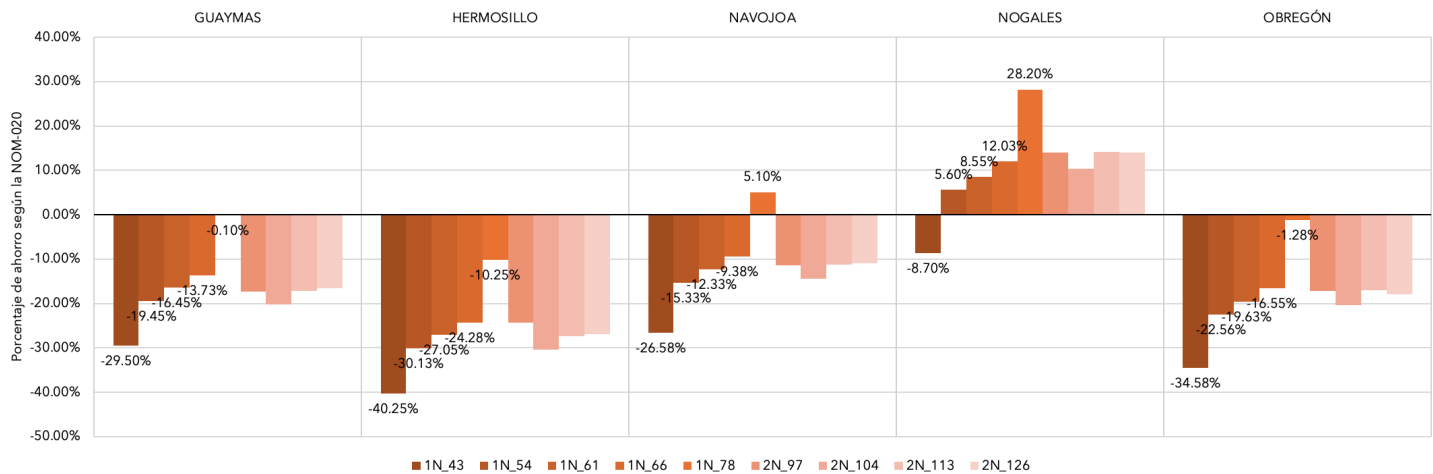


Figura 3. Promedio de ahorro por cada modelo en todas sus orientaciones por ciudad según la NOM-020, sin estrategias de eficiencia energética. Fuente: Elaboración de los Autores.

Finalmente, se hace un estimado del ahorro potencial en emisiones de CO₂e en que se considera el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional que representa el cálculo de las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero (GEI) por consumo de electricidad correspondiente al año 2023 (SEMARNAT, 2024a).

RESULTADOS

PRIMER ANÁLISIS

En la Figura 2, se observa el promedio de ahorro de todos los modelos analizados en 4 orientaciones por cada ciudad, sin considerar ningún tipo de estrategia de eficiencia energética. Los modelos que presentan mayor gasto o que están más lejos de cumplir con la NOM-020 son los localizados en Hermosillo con -26.77%, seguido de Obregón, Guaymas y Navojoa con -18.58%, -16.71%

y -11.84% respectivamente. En el caso de Nogales, el promedio de los modelos cumple con la NOM-020 con un nivel de ahorro promedio de 10.88%.

En la Figura 3 se presenta el promedio de ahorro por modelo en sus 4 orientaciones por ciudad, lo que evidencia el impacto de las variaciones particulares de diseño de cada modelo. En Guaymas, Hermosillo y Obregón todos los porcentajes son negativos y el modelo de menor ahorro es el 1N_46 que corresponde al de menor cantidad de m² y mayor porcentaje de acristalamiento, el que llega hasta el -40.25% de ahorro en Hermosillo. En Nogales todos los modelos en promedio tienen un porcentaje positivo, pero el modelo 1N_46 sigue siendo negativo con -8.70%. En Navojoa todos los modelos presentan en promedio ahorros negativos a excepción del 1N_78 con un 5.10%, de hecho, en todas las localidades, este modelo es el mejor evaluado, ya sea con un porcentaje negativo más cercano a cero, o bien, con un porcentaje de ahorro de hasta el 28.20% en Nogales.

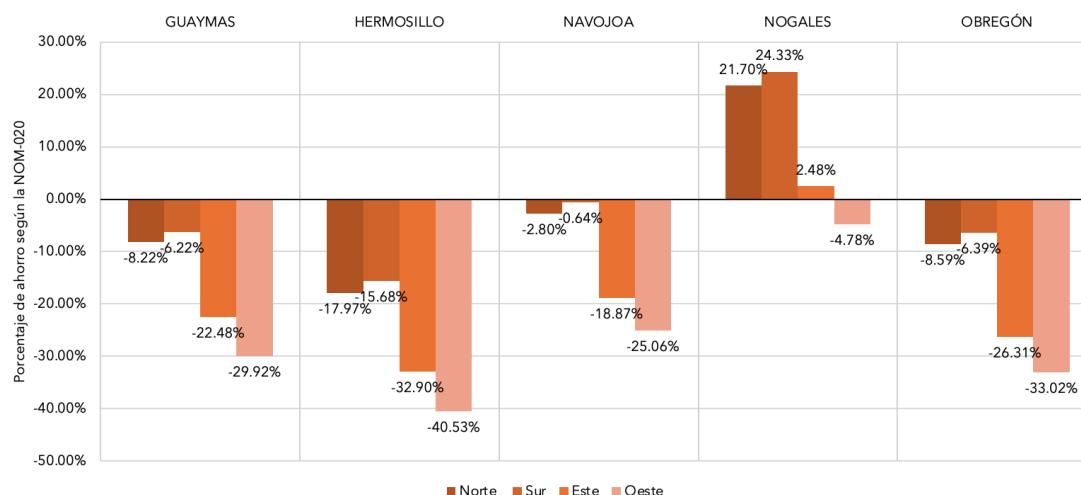


Figura 4. Promedio de ahorro de todos los modelos por orientación por ciudad según la NOM-020, sin estrategias de eficiencia energética. Fuente: Elaboración de los Autores.

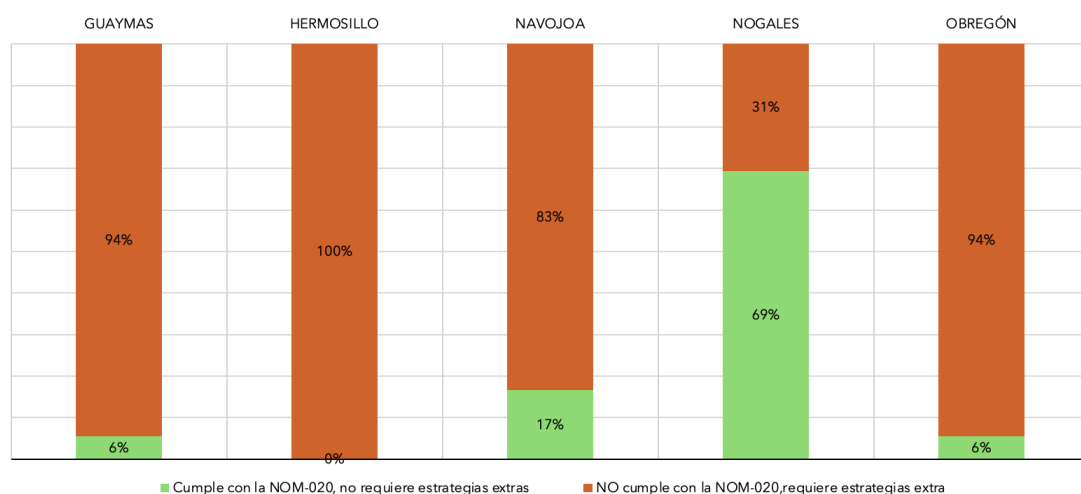


Figura 5. Porcentaje de casos por ciudad que requieren de estrategias adicionales para cumplir con la NOM-020. Fuente: Elaboración de los Autores.

En la Figura 4, se muestran los promedios de ahorro de todos los modelos analizados por orientación por ciudad, lo que nos permite visualizar el impacto que tiene la orientación en cualquier modelo. Las orientaciones más desfavorables son evidentemente este y oeste con valores negativos en casi todas las ciudades, lo que alcanza hasta un -40.53% en orientación oeste en Hermosillo. Las orientaciones norte y sur también son negativas en casi todas las ciudades, pero más cerca del ahorro que las anteriores. La excepción es Nogales con valores positivos en norte, sur y este, manteniéndose negativa la orientación oeste con un -4.78%.

Finalmente, en la Figura 5 se presenta el porcentaje de casos que requerirían de estrategias de eficiencia energética por ciudad. Es decir, de todos los modelos analizados en Guaymas, Navojoa y Obregón, el 94%, 83% y 94% respectivamente necesitan de estrategias de

eficiencia energética para el cumplimiento de la NOM-020; mientras que en Hermosillo el 100% de las viviendas lo requieren y en Nogales solo el 31%.

SEGUNDO ANÁLISIS

La Figura 6 muestra el promedio de ahorro de todos los modelos en 4 orientaciones por ciudad, con y sin estrategias. El impacto más grande fue en la ciudad de Hermosillo, donde el porcentaje promedio de ahorro pasó de -26.77% a 6.39% con 33.16 puntos porcentuales, seguido de Obregón con una diferencia de 25.29, Guaymas con 21.5 y Navojoa con 18.78 puntos porcentuales y, finalmente Nogales, que, aunque el promedio de ahorro era positivo con el 10.88%, aumentó al 17.39% de ahorro, lo que representa 6.51 puntos porcentuales.

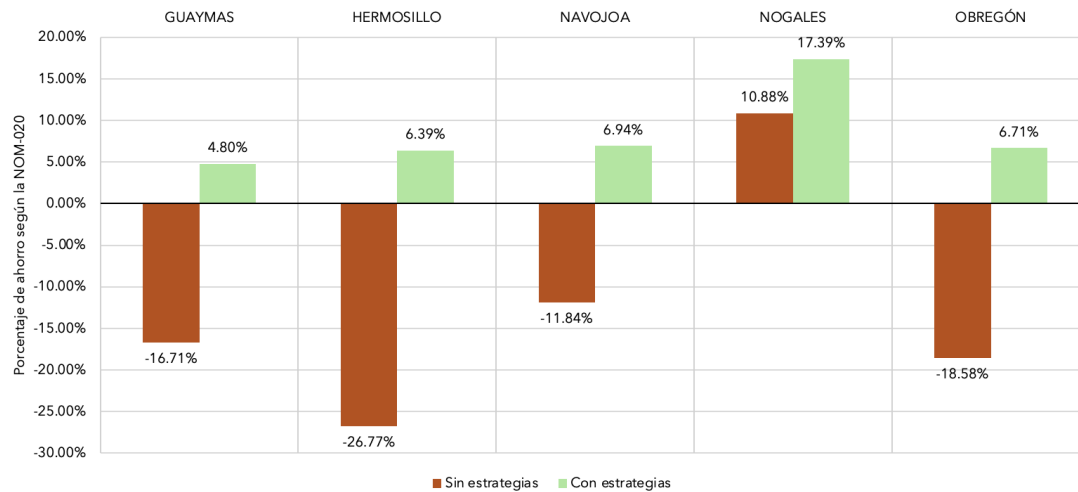


Figura 6. Comparación del promedio de ahorro de los modelos por ciudad según la NOM-020, con y sin estrategias de eficiencia energética. Fuente: Elaboración de los Autores.

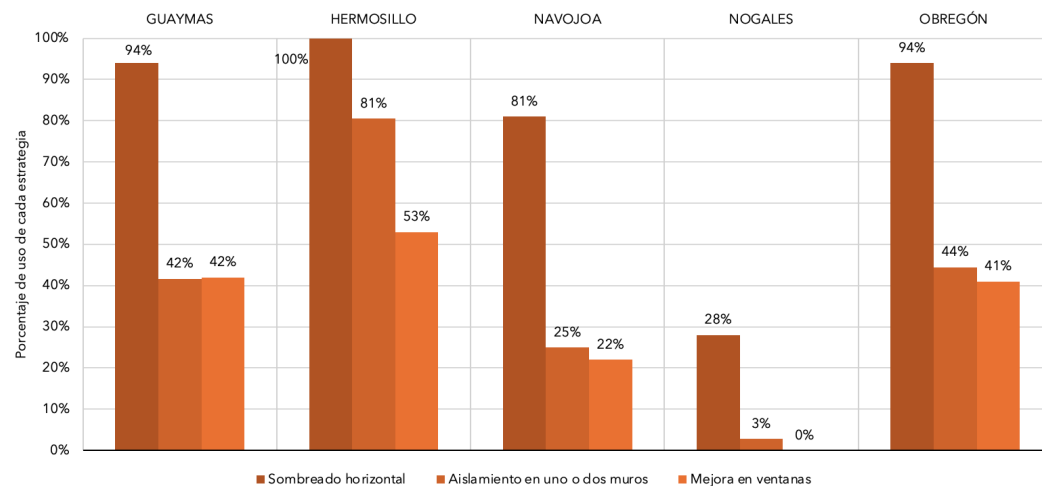


Figura 7: Porcentaje de uso estrategias implementadas para cumplir con la NOM-020 por ciudad. Fuente: Elaboración de los Autores.

Para lograr el cumplimiento de la NOM-020 con los niveles de ahorro graficados en la Figura 6, en la Figura 7 se muestra el porcentaje de uso de cada estrategia utilizada por ciudad. Es decir, el porcentaje de cada estrategia representa la proporción de veces que se utilizó la estrategia en particular, relativo al número de modelos analizados. Para cumplir con la NOM-020, en Hermosillo al 100% de las viviendas se les colocó sombreado horizontal, el 81% requirió aislamiento en al menos un muro y el 53% de los modelos se les mejoró la calidad de la ventana ya sea con película o ventana de doble vidrio. Obregón y Guaymas son muy similares, donde alrededor del 94% se le incluyó sombreado, y alrededor del 40% de los modelos requirió aislamiento y o mejora en ventanas. En el caso de Navojoa, el 81% requirió sombreado, mientras que sólo alrededor del 20% de los modelos requirió de aislamiento en muros y o mejora de ventanas.

Finalmente, en Nogales la estrategia de sombreado se aplicó al 28%, sólo el 3% requirió de aislamiento y no se utilizó la estrategia de mejorar ventanas.

COSTO DE IMPLEMENTACION DE LAS ESTRATEGIAS PARA EL CUMPLIMIENTO DE LA NOM-020

La implementación de las estrategias antes descritas generó el aumento de los costos directos de la vivienda según se muestran en la Figura 8. Hermosillo es la ciudad con el mayor sobrecosto para lograr el cumplimiento de la NOM-020, con un 2.95% en promedio, seguido de Obregón y Guaymas con sobrecostos promedio similares de 2.23% y 2.17% respectivamente, en Navojoa el sobrecosto promedio representa el 1.61% y finalmente en Nogales el 0.68% de sobrecosto promedio.

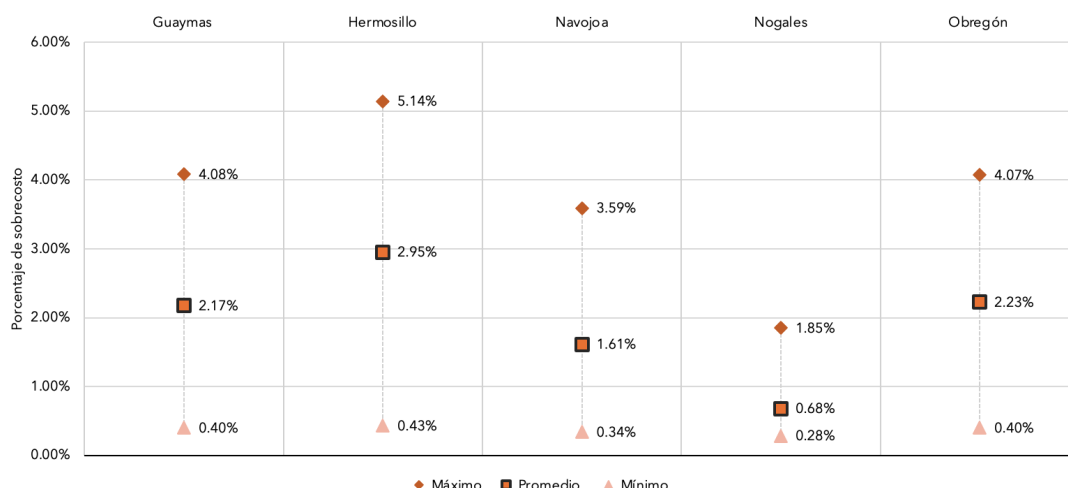


Figura 8: Sobrecostos por implementación de estrategias para cumplimiento de la NOM-020 por ciudad. Fuente: Elaboración de los Autores.

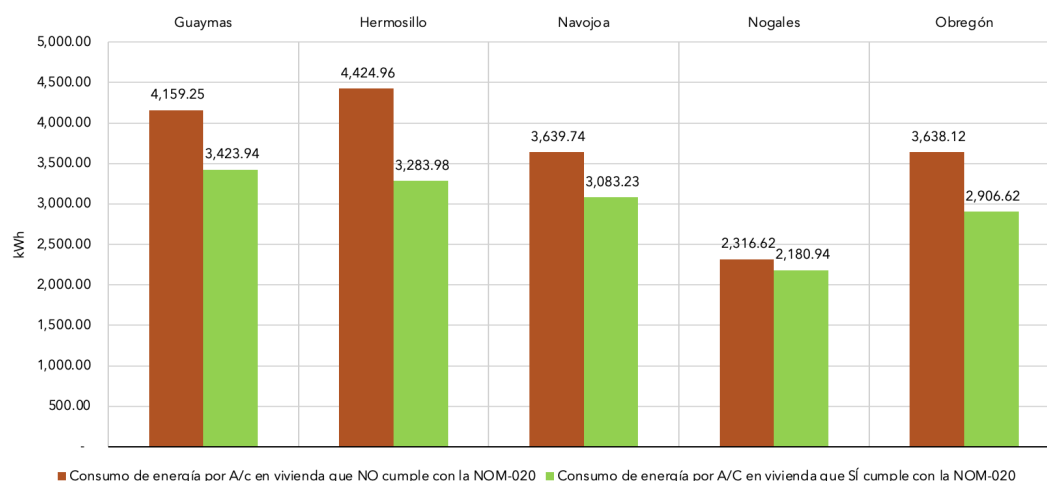


Figura 9: Promedio estimado de consumo de energía por A/C en kWh de todos los modelos por ciudad que no cumplen con la NOM-020 contra los consumos de energía estimados los que sí cumplen con la NOM-020. Fuente: Elaboración de los Autores.

ESTIMACIÓN DE AHORROS

De la diferencia del primer y segundo análisis se generan las estimaciones de los posibles ahorros en consumo y costos por energía eléctrica, así como reducciones de los GEI en CO₂e.

En la Figura 9, se presenta el promedio estimado de consumo de energía en kWh de todas las viviendas por ciudad que no cumple con la NOM-020 contra los consumos de energía estimados de la vivienda que sí cumple con la NOM-020. Estos valores de consumo corresponden al período de los meses de abril a octubre y con un uso promedio del A/C de 11 horas diarias (INEGI, 2018). El cálculo se limita sólo al consumo por el uso de A/C, es decir, no considera el consumo de energía por otros dispositivos. El impacto mayor es en Hermosillo con un 25.43%

de disminución de consumo de energía, seguido por Obregón y Guaymas con 20.22% y 17.53% respectivamente; el caso con menor impacto es Nogales con el 6.04%.

En la Figura 10, se presenta la estimación del gasto total por consumo de energía de la vivienda que no cumple con la NOM-020 contra el gasto total de la vivienda que sí cumple con la NOM-020. Para el cálculo se estimó que el uso de aire acondicionado, cómo se describió en la introducción, representa el 60% del consumo total de energía. Los cálculos contemplan el subsidio conforme al esquema tarifario vigente de la CFE (Convenio de Colaboración Para Apoyo Tarifario Para El Estado de Sonora, 2024) y corresponden al gasto acumulado durante la temporada de abril a octubre. Según los resultados, en Hermosillo se destinarían en promedio \$20,168.95

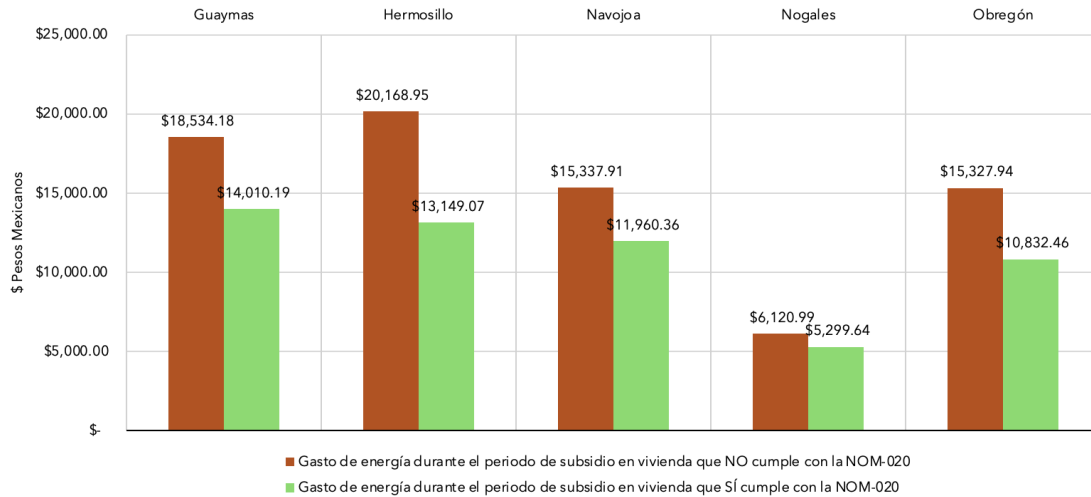


Figura 10: Promedio estimado de gasto en energía de abril a octubre en \$ pesos mexicanos de todas las viviendas por ciudad que no cumple con la NOM-020 contra el gasto en energía de la vivienda que sí cumple con la NOM-020. 19.80 \$ MEX/dólar para agosto de 2024. Fuente: Elaboración de los Autores.

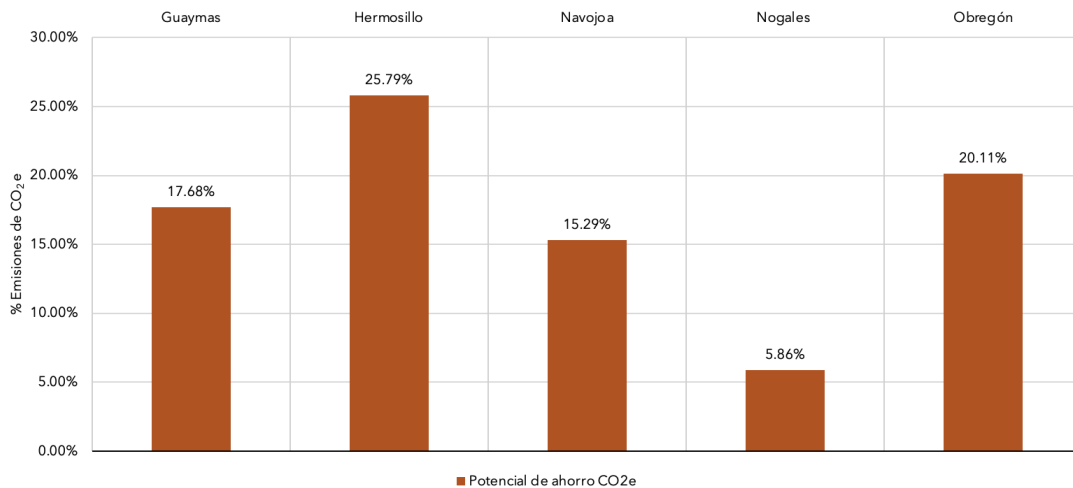


Figura 11. Potencial ahorro de CO2e por temporada de A/C de la vivienda que cumple con la NOM-020 por ciudad. Fuente: Elaboración de los Autores.

pesos mexicanos por la temporada subsidiada en la vivienda que no cumple, contra \$13,149.07 pesos mexicanos en la vivienda que sí cumple con la NOM-020 que representa un 35.32% de ahorro. En Obregón el ahorro promedio fue de 30.95%, Guaymas del 25.10%, Navojoa del 24.27% y Nogales del 15.80%. Vale la pena subrayar que el porcentaje de subsidio pudiera alcanzar hasta el 75% si se compara con la tarifa regular y que ese porcentaje varía porque depende del nivel de consumo.

Finalmente, en la Figura 11 se presenta el potencial de ahorro estimado de CO₂e de la vivienda que cumple con la NOM-020 por la temporada de uso de A/C con los siguientes valores: Hermosillo 25.79%, Guaymas 17.68%, Navojoa 15.29%, Nogales 5.86% y con Obregón 20.11%.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este estudio analiza modelos de viviendas ubicadas en un contexto específico, que considera condiciones climáticas particulares, características constructivas propias de la región y un esquema tarifario de energía particular. Estos factores varían considerablemente entre regiones y, en consecuencia, la pobreza energética depende no sólo de la disponibilidad y el costo de la energía, sino también de las limitaciones estructurales y culturales que condicionan su uso eficiente y seguro en cada contexto.

Este estudio consideró viviendas de 43, 54, 61, 66, 78, 97, 104, 113 y 126 m², con el objetivo de abarcar una variedad de áreas según los datos del INEGI, (2020) y, toma como línea base la losa de viga y bovedilla, dada su predominancia en la región (Romero Moreno

et al., 2020). Además, el estudio prioriza estrategias de sombreado, limita el aislamiento a 1 o 2 muros a un máximo de 1 pulgada y utiliza precios de construcción actualizados. Estas características, junto con el esquema tarifario especial para el Estado, representan las principales diferencias respecto al análisis realizado por la CONUEE, (2017), sin hallarse otro estudio comparable.

En este estudio se argumenta que, aunque se ha documentado que la normativa vigente requiere de mejoras significativas en la metodología de cálculo, de aplicarse el día de hoy al menos en su nivel mínimo se obtendrían beneficios y que es posible alcanzar el rango de eficiencia energética especificado en la norma mediante la combinación de diversas estrategias.

Dado que se utilizaron los mismos modelos para todas las ciudades analizadas, en la Figura 2 se muestra el impacto del clima en el nivel de eficiencia de acuerdo con el método de cálculo, donde Hermosillo es el caso más crítico. El caso de Nogales sugiere que, en promedio, las viviendas en su estado inicial sí cumplen con el nivel de eficiencia; este cumplimiento correspondería sólo a la eficiencia por aire acondicionado, pero, no hay forma de evaluar las condiciones de eficiencia en el período con temperaturas bajas. En la Figura 3, el modelo 1N_43 corresponde al de menor área y mayor porcentaje de acristalamiento siendo el peor evaluado en todas las ciudades incluso en Nogales con porcentajes negativos. Aunque la NOM-020 no aplicaría en Nogales según la resolución de la NOM-020, (2016), el caso del modelo 1N_43 ejemplifica que existe un segmento de viviendas que requeriría estrategias de eficiencia también para verano, especialmente aquellas más vulnerables.

Por el otro lado, en la misma Figura 3, el modelo 1N_97 es el de mejor evaluación dado que cumple en Navojoa y Nogales y en el resto de las ciudades, aunque presenta un valor negativo, los valores son más cercanos al cero. Lo que se observa de lo anterior es que este modelo es el que corresponde al de menor proporción de acristalamiento, ver Tabla 2.

Cuando se trata de orientación y, como era de esperarse, las viviendas que orientan su fachada principal al este u oeste son las más críticas, pero se observa un cambio significativo cuando los mismos modelos se orientan al norte o al sur; por ejemplo, en Hermosillo, los modelos orientados con la fachada principal al oeste tienen un -40.53% en promedio, pero los mismos modelos orientados al sur logran un promedio de -15.68, obteniendo una diferencia de 24.85 puntos porcentuales, ver Figura 4. Cabe aclarar que algunos de los modelos analizados tenían más proporción de ventanas en la fachada posterior, por consiguiente, cuando se evalúan las viviendas en orientación sur para fachada principal, obtienen mejor evaluación que la

norte. Por lo tanto, una estrategia muy importante para cumplir con la normativa sería modificar diseños para disminuir al máximo las superficies transparentes en las orientaciones desfavorables, independientemente donde se coloque la fachada principal.

Para Nogales, y como ya se había mencionado, la NOM-020 no sería obligatoria, pero aun así el 31% de las viviendas que se analizaron requirieron de mejoras (Figura 5), donde la mayoría de los casos se solventó con sistemas de sombreado y en muy pocos casos se utilizó aislamiento en muros (Figura 7) lo que representó un sobre costo promedio de 0.68% (Figura 8).

En el caso de Navojoa, el 83% de los modelos analizados requirió de estrategias (Figura 5) donde la mayoría de los casos se solventó con sistemas de sombreado y alrededor del 20% requeriría aislamiento y mejora de ventanas (Figura 7) lo que expresa un sobre costo promedio de 1.61% (Figura 8).

Guaymas y Obregón requirieron mejoras en el 94% de los casos evaluados (Figura 5), las estrategias para lograrlo incluyen sombreados en todos los modelos mejorados y, alrededor del 40% de los casos requirió aislamiento en uno o dos muros y mejorar las características de las ventanas (Figura 7) lo que representaría en promedio un sobre costo de alrededor del 2% por vivienda (Figura 8).

Finalmente, el caso más crítico es Hermosillo, donde todos los modelos evaluados requirieron de estrategias; al 100% se les aplicó sombreado, el 81% de los casos requirió de aislamiento ya sea en uno o en dos muros y, el 53% de los casos requirió mejora de ventanas. Esta ciudad representa el sobre costo promedio más grande con el 2.95%, pero también representa el de mayor ahorro en consumo y gasto de energía (Figura 10 y Figura 11). Habría que considerar, además, que Hermosillo es la ciudad más poblada del estado de Sonora, por lo que el ahorro de energía al aplicar la norma tendría potencialmente más impacto que en otras ciudades.

Es importante destacar el impacto del esquema tarifario en el gasto energético, ya que el subsidio puede cubrir hasta el 75% del total de la factura, dependiendo del nivel de consumo donde el costo del kWh excedente puede ser hasta cinco veces mayor que el del primer nivel. Aunque esta medida no es sostenible a largo plazo para el erario ni para el medio ambiente, resulta efectiva y beneficia a una gran parte de la población. Sin este apoyo gubernamental, los costos estimados de energía serían inasequibles para la mayoría de los hogares. En ausencia de eficiencia energética en las viviendas, los subsidios energéticos han funcionado como una solución temporal para aliviar esta carga económica.

CONCLUSIONES

Cumplir con el nivel mínimo de la NOM-020 en el Estado de Sonora representaría en promedio un sobre costo del 1.93% en la construcción, beneficiándose con un potencial de ahorro económico del 26% por energía eléctrica por temporada de abril a octubre y, una disminución del 16.95% en emisiones de CO₂e. Lo anterior se logró sin necesidad de cambiar los sistemas constructivos comúnmente utilizados en la vivienda de la región o empleándose aislamiento excesivo, además de que se dio prioridad a los sistemas de sombreado y el aislamiento se limitó a 1 pulgada en un muro, máximo 2 muros.

Los casos más críticos corresponden a viviendas con menor superficie construida, debido a que el porcentaje de acristalamiento resulta mayor e impacta de forma considerable en el cálculo, especialmente si las ventanas están colocadas en orientaciones críticas sobre todo en climas extremos, como el de Hermosillo. Por otro lado, se identificaron modelos que requerían mejoras adicionales en climas menos cálidos como el caso de Nogales, aunque éstas podrían haberse evitado si desde la etapa de diseño se hubiera considerado una orientación y protección de ventanas adecuado para la temporada caliente. En ningún caso se sabe cómo es la eficiencia de la envolvente durante la temporada fría. Implementar estrategias de eficiencia para "corregir" estos modelos impacta considerablemente el costo de la vivienda por la relación del costo de inversión versus el costo de la vivienda.

Además, con los datos analizados se plantean las siguientes configuraciones apropiadas para cada localidad analizada:

- Para Nogales, el sombreado de ventanas durante la temporada más caliente puede ser eficaz para cumplir con la normativa, así como evitar las ventanas en orientación oeste, o en su caso, colocar las ventanas más pequeñas en dicha orientación.
- Para Navojoa, además de la estrategia de sombreado en la temporada más caliente, es importante evitar ventanas en orientaciones este y oeste, o en su caso, colocar las ventanas más pequeñas en dichas orientaciones y, la estrategia de aislamiento en muros se requiere en algunos casos.
- Para Guaymas y Obregón, además de la estrategia de sombreado en la temporada más caliente, es relevante el aislamiento en uno o dos muros y o la mejora en la calidad de ventanas, dependiendo del diseño específico de la vivienda. Es importante evitar, en la medida de lo posible, las ventanas este y oeste, o en su caso, las más pequeñas en dicha orientación.
- Finalmente, para el caso de Hermosillo, es esencial la estrategia de sombreado en la temporada más caliente, la gran mayoría de los casos requiere aislamiento en uno o dos muros y la mejora en la

calidad de ventanas tiene un impacto considerable dependiendo del diseño específico de la vivienda. Es muy importante evitar, en la medida de lo posible, las ventanas este y oeste, pero particularmente en el oeste.

Se sabe que la habitabilidad de los espacios se garantiza mediante un marco normativo que integra reglamentos de construcción y normas de eficiencia energética alineados en sus objetivos y adaptados al contexto específico, exigiendo a desarrolladores y constructores el cumplimiento de estándares mínimos de calidad, accesibilidad y sustentabilidad en un contexto de cambio climático; pero en la realidad no es así. En este sentido, sería recomendable que los municipios incluyeran en los reglamentos de construcción una serie de buenas prácticas para el diseño local que considera las condiciones de temperatura específicos, proporciones de acristalamiento mínimo y máximo por orientación sin dejar de lado el tema de ventilación e iluminación natural. Además, se podría también establecer en los reglamentos que los sistemas constructivos base aquí analizados, o similares, se consideren como un nivel mínimo de características constructivas en la edificación para vivienda urbana.

Si bien es necesario mejorar el método de cálculo vigente de la NOM-020, así como considerar las capacidades de implementación del municipio y de los profesionales de la arquitectura y construcción, es fundamental que su aplicación inicie de inmediato. Aplicar la normativa vigente representa una oportunidad para mejorar las condiciones de habitabilidad comparada con las actuales, y mientras tanto, continuar el trabajo en el perfeccionamiento de la normativa vigente.

En investigaciones futuras, sería fundamental desarrollar proyectos más precisos sobre los valores de conductividad térmica de los materiales producidos localmente, para facilitar la adecuación de las soluciones constructivas a las condiciones específicas de la región. Asimismo, dado que el esquema tarifario se basa en niveles de consumo, sería relevante desarrollar estrategias innovadoras que permitan a los usuarios monitorear y gestionar su consumo de manera que maximicen los beneficios de esta estructura tarifaria.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, C.M.G.B., A.C.B.A., J.M.O.de la T., I.M.L.; Curación de datos, C.M.G.B.; Análisis formal, C.M.G.B., A.C.B.A., J.M.O.de la T., I.M.L.; Adquisición de financiación, J.M.O.de la T.; Investigación, C.M.G.B.; Metodología, C.M.G.B., A.C.B.A., J.M.O.de la T., I.M.L.; Administración de proyecto, J.M.O.de la T.; Software, C.M.G.B.; Supervisión, A.C.B.A., J.M.O.de la T., I.M.L;

Validación, C.M.G.B.; Visualización, C.M.G.B.; Escritura – borrador original, C.M.G.B.; Escritura – revisión y edición, Cecilia María C.M.G.B., A.C.B.A., J.M.O.de la T., I.M.L.

AGRADECIMIENTOS

Artículo derivado del Proyecto financiado por la Universidad de Sonora clave USO318009160 “Beneficios del cumplimiento de la NOM-020-ENER-2011 en clima cálido seco”

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Comisión Federal de Electricidad (CFE). (1 de Agosto de 2024). *Esquema tarifario vigente*. <https://App.Cfe.Mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Casa.AspX>

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2017). *Costos y beneficios de la Norma Oficial Mexicana para envolvente de edificaciones residenciales (NOM-020-ENER)*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/234755/Impacto_NOM-020-junio-2017-FINAL.pdf

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2024, August 1). *Porcentaje de hogares con aire acondicionado*. Indicadores estatales de eficiencia energética. <https://www.biee-conuee.net/datamapper/indicadores-para-todos-los-estados/#tasa-equipamiento-aire-acondicionado.html>

Contreras, M., Serrano-Medrano, M., y Masera, O. (2022). *Patrones de consumo energético en el sector residencial de México: un análisis desde la perspectiva de usos finales*. Taller hojarasca. https://conahcyt.mx/wp-content/uploads/pronaces/micrositios/energia_y_cambio_climatico/energia/cuadernos_tematicos/Cuaderno_Tematico_I_Pronaces_ECC_ISBN_final.pdf

Convenio de Colaboración Para Apoyo Tarifario Para El Estado de Sonora (2024). http://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2023/12/asun_4672056_20231204_1701195008.pdf

Durán, R. J., y Condori, M. A. (2021). Alcance de la Tarifa Social sobre los hogares en situación de pobreza energética de la Argentina urbana en el periodo 2016–2018. *Estudios Socioterritoriales, Revista de Geografía*, 29(075), 1–28. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/170441>

García Ochoa, R. (Coord.). (2022). *Pobreza energética. Visiones de América Latina*. El Colegio de la Frontera Norte y El Colegio de Michoacán. <https://libreria.colef.mx/detalle.aspx?id=7919>

García Ochoa, R. G., Avila-Ortega, D. I., & Cravioto, J. (2022). Energy services' access deprivation in Mexico: A geographic, climatic and social perspective. *Energy Policy*, 164, 112822. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112822>

Guízar Dena, A. J., Pascual, M. Á., y Fernández Bandera, C. (2021). Building Energy Model for Mexican Energy Standard Verification Using Physics-Based Open Studio SGSAVE Software Simulation. *Sustainability*, 13(3), 1521. <https://doi.org/10.3390/su13031521>

Hernández, M. F., Aguayo, L.F., y Duque, H. (2018). Índice de pobreza energética multidimensional por regiones para Colombia, *Economía Coyuntural*, 3(3), 35–72. http://www.scielo.org/bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2415-06222018000300003&nrm=iso

Huelsz, G., Barrios, G., y Rojas, J. (2014). Differences on Results from Steady-state and Time-dependent Wall/roof Heat Transfer Models in Mexican Climates. *Energy Procedia*, 57, 1825–1833. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.046>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2022). *Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático*. Proyecciones de Cambio Climático y Fichas Climáticas Por Estado y Municipios Más Vulnerables . <https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). *Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI)*. <https://Www.Inegi.Org.Mx/Programas/Encevi/2018/>.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Encuesta Nacional de Vivienda. ENVI 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/envi/2020/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). *Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares. ENIGH 2022*. <https://www.inegi.org.mx/programas/enigh/nc/2022/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024, August 1). *Geografía y Medio Ambiente. Climatología*. <https://Www.Inegi.Org.Mx/Temas/Climatologia/#mapas>.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

International Energy Agency (IEA). (2022). *World Energy Outlook 2022*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

International Energy Agency (IEA). (2023). *World Energy Outlook 2023*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

López-Díaz, F., Nava Assad, Y. S., Rojas Barajas, M., y González Terrazas, D. I. (2022). Guía de Escenarios de Cambio Climático para Tomadores de Decisiones. Instituto Nacional de Ecología al Cambio Climático (INECC). <http://140.84.163.2:8080/xmlui/handle/publicaciones/395>

Martin-Dominguez, I. R., Rodriguez-Muñoz, N. A., Romero-Perez, C. K., Najera-Trejo, M., y Ortega-Avila, N. (2018). Analysis of the Methodologic Assumptions of the NOM-020-ENER-2011—Mexican Residential Building Standard. *Environments*, 5(11), 118. <https://doi.org/10.3390/environments5110118>

Méndez, F. M., Rosa, P. C., & Castela Caruana, M. E. (2021). Pobreza energética en la Argentina actual. Revisiones y aportes metodológicos para su medición cuantitativa y cualitativa. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 32(62). <https://doi.org/10.33255/3262/748>

NMX-C-460-ONNCCE-2009, Pub. L. No. NMX-C-460-ONNCCE-2009, Diario Oficial de la Federación (2009). https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5145106&fecha=03/06/2010#gsc.tab=0

NOM-008-ENER-2001. Eficiencia Energética En Edificaciones, Envolvente de Edificios No Residenciales., Pub. L. No. NOM-008-ENER-2001, Diario Oficial de la Federación (DOF) (2001). https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=767644&fecha=25/04/2001#gsc.tab=0

NOM-020-ENER-2011. Eficiencia Energética En Edificaciones, Envolvente de Edificios Residenciales., Pub. L. No. NOM-020-ENER-2011, Diario Oficial de la Federación (DOF) (2011). https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5203931&fecha=09/08/2011#gsc.tab=0

Panca, C.-O., y Calatayud, A.-P. (2021). Determinantes socioeconómicos y transición de la pobreza energética de los hogares en la sierra rural del Perú, periodo 2010-2019. *Semestre Económico*, 10(2), 72–85. <https://doi.org/10.26867/se.2021.v10i2.121>

RESOLUCIÓN Por La Que Se Modifican Los Valores de Coeficiente Global de Transferencia de Calor (K) de La Tabla 1, Se Agregan Definiciones y Se Acota La Verificación de La Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011, Eficiencia Energética En Edificaciones.- Envolvente de Edificios Para Uso Habitacional, Publicada El 9 de Agosto de 2011., Pub. L. No. NOM-020-ENER-2011, Diario Oficial de la Federación DOF (2016). https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6154/sener11_C/sener11_C.html

Rodríguez, O. de B., (2018). *Energía y Edificaciones en México: Importancia y políticas públicas reserentes y futuras*. Cuaderno de la CONUEE No.10. <https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuadernoNo.10.pdf>

Rodríguez, O. de B., Navarrete, J., & Hernández, P. (2022). Pobreza energética en México y efectos de política pública en eficiencia energética de 1996 a 2016. In R. García Ochoa (Ed.), *Pobreza energética. Visiones de América Latina* (1st ed., pp. 1–270). Coordinación de Publicaciones de El Colegio de la Frontera Norte.

Romero Moreno, R. A., Bojórquez Morales, G., Vázquez Tépo, J. E., González Cruz, E. M., Ochoa de la Torre, J. M., Reséndiz Pacheco, O., Gómez Azpeitia, L. G., Pérez Sánchez, M. M., y Tejeda Martínez, A. (2020). Caracterización de la vivienda económica en México en R. A. Romero Moreno y J. M. Ochoa de la Torre (Eds.), *Confort térmico y ahorro de energía en la vivienda económica en México: regiones de clima cálido seco y húmedo* (1st ed., pp. 1–359). Universidad de Sonora y Universidad Autónoma de Baja California.

Santillán, O. S., Cedano, K. G., y Martínez, M. (2020). Analysis of energy poverty in 7 Latin American countries using multidimensional energy poverty index. *Energies*, 13(7), 1608. <https://doi.org/10.3390/en13071608>

Secretaría de Energía (SENER). (2023). *Balance Nacional de Energía 2022*. <https://www.gob.mx/sener/articulos/balance-nacional-de-energia-296106>

Secretaría de Energía (SENER) y Comisión Nacional del Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2024, February 3). *Indicadores estatales de eficiencia energética. Gastos en energía por hogar*. Gastos En Energía Por Hogar. <https://www.biee-conuee.net/datamapper/#gastos-energia-por-hogar.html>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2024a, February 29). *Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional, 2023*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/data/file/896217/Aviso_fesen_2023.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2024b, July 15). *Atlas Digital Geográfico*. Atlas Digital Geográfico. https://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_climas.html

Siksnyte-Butkiene, I., Streimikiene, D., Lekavicius, V., y Balezentis, T. (2021). Energy poverty indicators: A systematic literature review and comprehensive analysis of integrity. *Sustainable Cities and Society*, 67, 102756. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102756>

ANÁLISIS DE MORFOLOGÍAS EVOLUTIVAS CON CFD: MEJORAR LA VENTILACIÓN NATURAL EN VIVIENDA DE PATIO CENTRAL, EN ZONAS SEMI CÁLIDAS DE LATINOAMÉRICA

ANALYSIS OF EVOLUTIONARY MORPHOLOGIES WITH CFD: IMPROVING NATURAL VENTILATION IN CENTRAL COURTYARD HOUSING, IN SEMI-WARM AREAS OF LATIN AMERICA

ANÁLISE DE MORFOLOGIAS EVOLUTIVAS COM CFD: MELHORIA DA VENTILAÇÃO NATURAL EM HABITAÇÕES DE PÁTIO CENTRAL EM ÁREAS SEMI-QUENTES DA AMÉRICA LATINA

Diego Rodríguez-de-Ita

Magíster en Arquitectura

Estudiante de Doctorado, Profesor del Departamento de Arquitectura y Diseño Industrial, Facultad de Arquitectura

Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México

<https://orcid.org/0009-0001-2796-6484>

diego.rodriguezdt@uanl.edu.mx (Autor de Correspondencia)

Liliana Beatriz Sosa-Compeán

Doctorado en Filosofía de la Arquitectura y Asuntos urbanos

Profesora Investigadora en la Facultad de Arquitectura y Jefatura de Investigación en Diseño Industrial

Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México

<https://orcid.org/0000-0001-8811-3218>

Liliana.sosacm@uanl.edu.mx



RESUMEN

Este estudio busca reducir la demanda energética en la arquitectura mediante el uso de estrategias pasivas, específicamente enfocadas en la ventilación natural interior. Se realizaron simulaciones computacionales (CFD: Computational Fluid Dynamics) y se utilizó algoritmos paramétricos en Grasshopper, en que se aplicó una metodología basada en el diseño evolutivo. El objetivo es optimizar el diseño de viviendas unifamiliares de patio central con ventilación cruzada, al evaluar cómo la morfología de las viviendas influye en su desempeño en términos de ventilación natural. A través de procesos de morfogénesis y diseño evolutivo; se generaron más de 200 variaciones morfológicas (muestras), cuyos resultados permitieron seleccionar los modelos con mejor desempeño. Los genes más exitosos se combinaron en nuevas generaciones para repetir las evaluaciones, lográndose finalmente un modelo de vivienda que optimiza la ventilación hasta 2.5 veces más que el modelo tradicional de casa con patio central.

Palabras clave

diseño evolutivo, ventilación natural, arquitectura sustentable, CFD en vivienda de patio central.

ABSTRACT

This study aims at reducing energy demand in architecture through passive strategies, specifically focusing on natural indoor ventilation. Computational simulations (CFD: Computational Fluid Dynamics) were conducted, and parametric algorithms in Grasshopper were employed, applying a methodology based on evolutionary design. The aim is to optimize the design of single-family courtyard houses with cross-ventilation by evaluating how their morphology influences their performance in terms of natural ventilation. Through morphogenesis processes and evolutionary design, more than 200 morphological variations (samples) were generated, whose results allowed the selection of the best-performing models. The most successful genes were combined in new generations to repeat the evaluations, ultimately achieving a housing model that optimizes ventilation up to 2.5 times more than the traditional courtyard house model.

Keywords

evolutionary design, natural ventilation, sustainable architecture, CFD in courtyard housing.

RESUMO

Este estudo tem por objetivo reduzir a demanda de energia na arquitetura por meio do uso de estratégias passivas, com foco específico na ventilação natural interna. Foram utilizados a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) e algoritmos paramétricos no Grasshopper, nos quais foi aplicada uma metodologia baseada em design evolutivo. O objetivo é otimizar o projeto de residências unifamiliares com pátio central e ventilação cruzada, avaliando como a morfologia das residências influencia seu desempenho em termos de ventilação natural. Por meio de processos de morfogênese e design evolutivo, foram geradas mais de 200 variações morfológicas (amostras), cujos resultados permitiram a seleção dos modelos de melhor desempenho. Os genes mais bem-sucedidos foram combinados em novas gerações para repetir as avaliações e, por fim, chegou-se a um modelo de habitação que otimiza a ventilação até 2,5 vezes mais do que o modelo tradicional de casa com pátio central.

Palavras-chave:

design evolutivo, ventilação natural, arquitetura sustentável, CFD em habitação com pátio central

INTRODUCCIÓN

En el campo del análisis arquitectónico conforme a simulaciones computacionales, la utilización de herramientas digitales basada en la dinámica de fluidos computacionales (CFD) ha permitido avances significativos en el diseño, particularmente en la mejora de la ventilación natural. Enfocados en hacer un aporte a la arquitectura biofílica (Zhong et al., 2021) Este análisis parte de la estrategia de diseño sobre: "la morfología del entorno construido donde esta influye directamente en la dinámica del flujo de aire, afectando la distribución de la ventilación natural y la velocidad de las corrientes dentro del espacio" (ASCE. 2023a, pág. 107). Pudiendo mejorar las condiciones de confort (El Ahmar et al., 2019). Así mismo disminuir la demanda energética. Este análisis se enfoca en optimizar la tipología de vivienda de patio central con métodos paramétricos, Según Bensalem (1996):

Los estudios limitados sobre patios indican que, con tamaños grandes, una parte de la corriente de aire podría penetrar en el espacio vacío, elevando localmente la presión en la pared trasera del patio. Esto podría aumentar la ventilación cruzada en las paredes a sotavento. Este efecto fue menos evidente en patios más pequeños (pág. 74).

El mecanismo de ventilación que afecta mayormente a la vivienda patio central es el de presión del viento, cuando el viento incide en un edificio, crea una distribución de presiones estáticas en la superficie exterior del edificio que dependen de la dirección del viento, la velocidad, la densidad, la orientación de la superficie, condiciones circundantes y la forma del edificio (ASHRAE, 2009).

El problema principal radica en que los métodos de diseño no siempre consideran de manera óptima cómo las variaciones morfológicas afectan el comportamiento del flujo de aire al interior. En consecuencia, existe la necesidad de explorar enfoques que integren métodos evolutivos y simulaciones paramétricas para desarrollar tipologías arquitectónicas como vivienda que maximicen el aprovechamiento del viento. El objetivo es partiendo de la vivienda de patio central para crear configuraciones geométricas que mejoren la ventilación natural y se reduzca la demanda energética.

ESTADO DEL ARTE

En la investigación de Albel Tablada de la Torre et al. (2005) donde se utiliza CFD para estudiar viviendas de patio central de 3 niveles; se dieron cuenta que se optimiza el desempeño cuando la ventilación no es unilateral, si no cruzada. Con el mismo fin la importancia de contar con mayor cantidad de patios centrales. También se determinó que las habitaciones del piso superior del patio (Figura 1) estrecho tienen velocidades de aire más altas que los pisos superiores del patio más

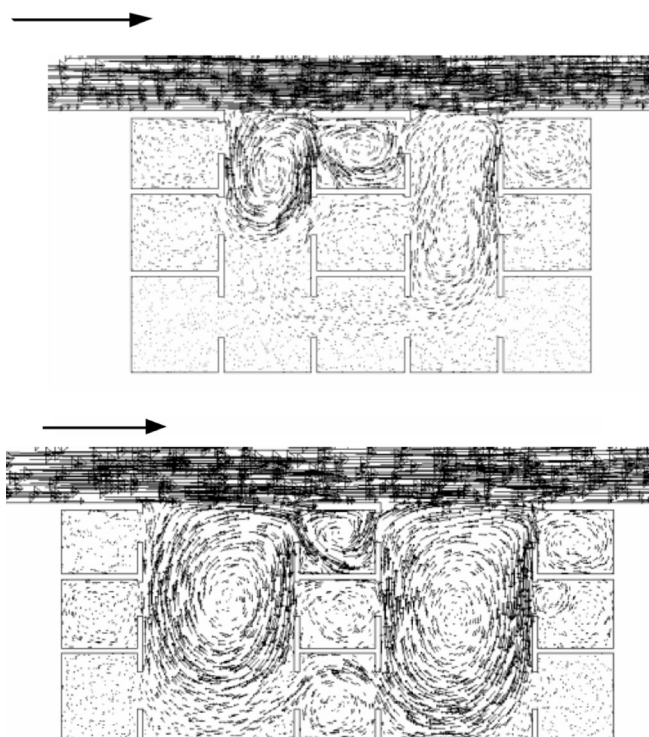


Figura 1. Flujo de aire dentro de dos patios interiores y habitaciones con ventanas abiertas. Fuente: Imagen extraída de Tablada de la Torre et al. (2005)

ancho; "ya que capturan la mayor parte del flujo de aire que ingresa a la cavidad del patio, provocando que las habitaciones de los pisos inferiores tengan velocidades de aire mucho más bajas" (Tablada de la Torre et al., 2005, pág. 3)

En la investigación de (Malkawi. et al., 2005) se presenta un modelo basado en algoritmos genéticos para la evolución del diseño y usa dinámica CFD para la evaluación del rendimiento del modelo, lo que genera la posibilidad de crear modelos que mejoren la ventilación natural y previsualizar los resultados (Zheng et al., 2020). Analizan y evalúan la capacidad de ventilación cruzada de un edificio de poca altura con persianas para crear sombra, conocidos también como louvers. Basado en el modelo de flujo de aire acoplado (similar al flujo de viento), el modelo acopla el flujo de aire interior y exterior para realizar la evaluación de la ventilación cruzada. La mayor reducción de la tasa de ventilación utilizada por louvers fue de hasta un 66,6%.

Rodrigues Marques Sakiyama et al. (2021) presentó un análisis de ventilación interior por CFD con el proceso de túnel de viento, se llegó a la conclusión que la orientación del edificio determina la calidad de la ventilación natural interior.

Los estudios de torres de viento también se consideran en este estado del arte ya que son soluciones arquitectónicas tradicionales que comparten el objetivo de mejorar la ventilación natural, además de la calidad higrotérmica,

mediante las torres de viento evaporativas no sólo se aumenta la cantidad de aire fresco, sino que también aumenta la humedad relativa del aire, lo que genera un mayor confort térmico. Esto sucede por el mecanismo de la ventilación de Presión de Chimenea (Stack Pressure) la que es causada por la masa de una columna de aire ubicada dentro o fuera de un edificio. También puede ocurrir dentro de un elemento de flujo, como un conducto o una chimenea. (ASHRAE, 2009)

METODOLOGÍA

Se siguió una metodología basada en la simulación paramétrica y CFD, integrándose los siguientes pasos:

- Modelo base (ancestro común): Se parte de un modelo inicial de vivienda de patio central, que actúa como ancestro común.
- Transformaciones morfológicas: Se utiliza la metodología algorítmica en Grasshopper (Echeverri Montes, 2021), se aplican una serie de transformaciones a la morfología del modelo base inspirados en la Teoría de las Transformaciones.
- Simulaciones CFD: Cada una de las tipologías generadas se evalúan mediante simulaciones CFD, con el objetivo de analizar el comportamiento de la ventilación natural en cada una de las transformaciones.
- Selección y cruce de genes: Se identifican las muestras "ganadoras" o las de mejor desempeño, después se reconocen las áreas de la vivienda que presentan los mayores caudales de ventilación. Estas áreas se combinan con otras muestras ganadoras.
- Selección final: Finalmente, esta segunda generación de muestras es evaluada y obtenemos la que presenta un mayor desempeño (fitness¹).
- Análisis de altura de ventanas: Se analiza con los resultados logrados el comportamiento más adecuado del viento en cuanto a alturas de ventanas (outlet), altura de antepechos y dintel.
- Comparación con el ancestro común: Se comparan los resultados de ambos en cuanto a el ángulo de inclinación de entrada de aire en el patio central.

TEORÍA DE LAS TRANSFORMACIONES

Es una propuesta de morfogénesis concebida por D'Arcy Thompson (1917, como se citó en Werritty, 2010) que examina especialmente desde una perspectiva geométrica, los diferentes tipos de transformaciones formales que podrían tener un significado biológico y fisicoquímico relacionado con la evolución (Figura 2) (Iurato y Igamberdiev, 2020). En la primera fila se muestran

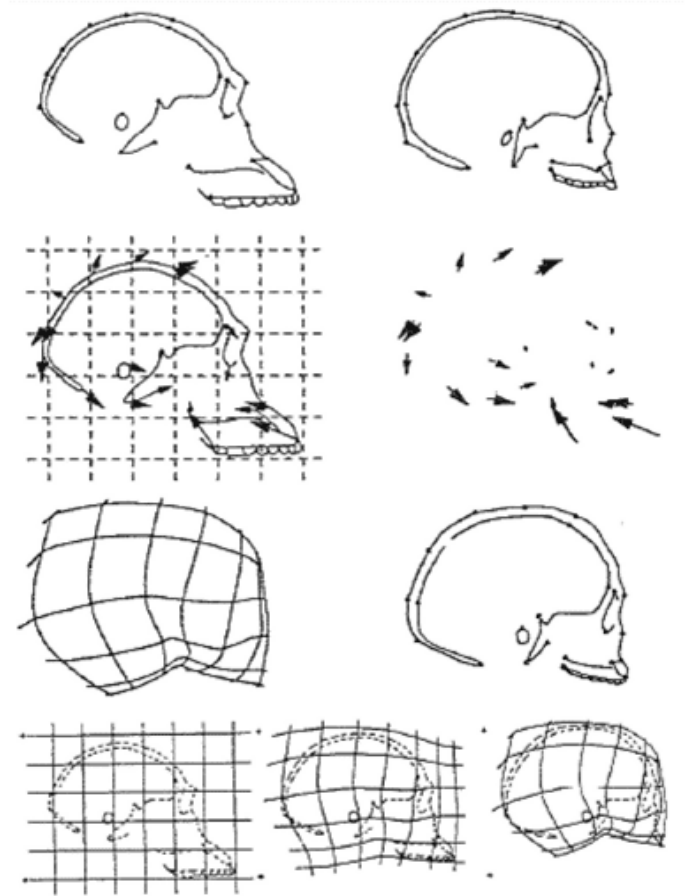


Figura 2. Teoría de las transformaciones. Fuente: Imagen extraído de Werritty (2010).

los puntos homólogos y los contornos indicados. En la segunda fila se representan los movimientos necesarios para llevar los puntos homólogos de la primera imagen a la segunda. Por último, en la fila inferior se presentan los dos extremos de la transformación (Werritty, 2010).

DISEÑO EVOLUTIVO

El término preferido de Darwin para evolución es "descendencia con modificación". La información genética se transmite entre generaciones en la mayoría de los organismos mediante el ADN (Whitlock, 2014). Normalmente la población se inicia de manera aleatoria, es decir, con elementos seleccionados al azar que se consideran potencialmente útiles en el entorno dado. Luego, se evalúa la aptitud o fitness de cada solución, lo que implica una medición o cálculo para determinar la eficacia relativa de cada una. Los resultados de esta evaluación se utilizan en la etapa de selección para decidir cuáles soluciones individuales continuarán en

¹ Fitness implica la capacidad de los organismos para sobrevivir y reproducirse en el entorno en el que se encuentran. La consecuencia de esta supervivencia y reproducción es que los organismos contribuyen con genes a la próxima generación (Allen, 2009).

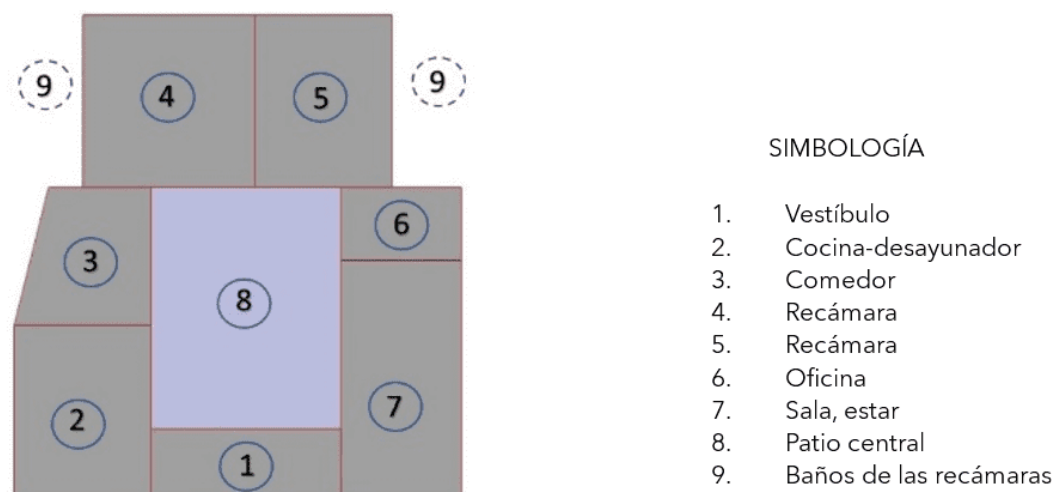


Figura 3. Diseño del ancestro común. Las áreas 9 (baños) son excluidas del análisis. Fuente: Elaboración de los Autores.

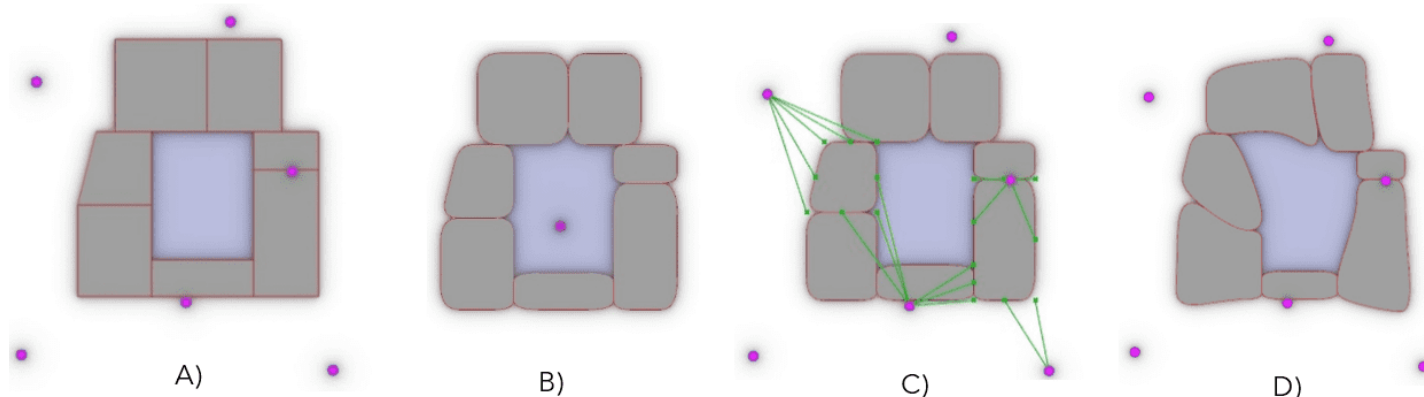


Figura 4. Transición. Fuente: Elaboración de los Autores.

la competencia por recursos. (Banzhaf, 2013). Las variaciones se pueden dar por mutación, duplicación o cruce de genes, entre otros. De acuerdo con Banzhaf los componentes principales del diseño evolutivo para crear muestreos generación a generación es la siguiente:

- Evaluación: Como proceso la adaptación describe la parte del cambio evolutivo en un rasgo que es impulsado por la selección natural. Como estado se refiere a "el rasgo de las adaptaciones" (Futuyma, 2017).
- Reproducción: La multiplicidad de especies implica que la evolución se ramifica en diferentes linajes de población a lo largo del tiempo.
- Variación: En la reproducción, es crucial que exista variabilidad entre los descendientes para que la selección natural pueda operar de manera efectiva.
- Selección: determina qué especies tienen las mejores cualidades para la reproducción.

RESULTADOS

A continuación, se presenta el modelado del proceso algorítmico, evolutivo y de simulación por CFD de este análisis en una serie de pasos.

PASO 1: MODELO BASE

El ancestro común (Figura 3) del cual se van a realizar las futuras transformaciones morfológicas, se diseñó con sustento en tipologías arquitectónicas históricas de vivienda de patio central, como la vivienda tradicional mozabita (Argelia) (Zamani et al., 2012) y la casa Kahkeshan, en la ciudad de Isfahan (Irán), junto a la premisa que el patio central tenga colindancia directa a todas las áreas de la casa, también que se acceda mediante un vestíbulo hacia áreas sociales, así las áreas privadas se encuentran al final del recorrido. Se elabora un algoritmo en Grasshopper que crea variaciones de este ancestro común, cada variación se considera una muestra. El algoritmo debe tener

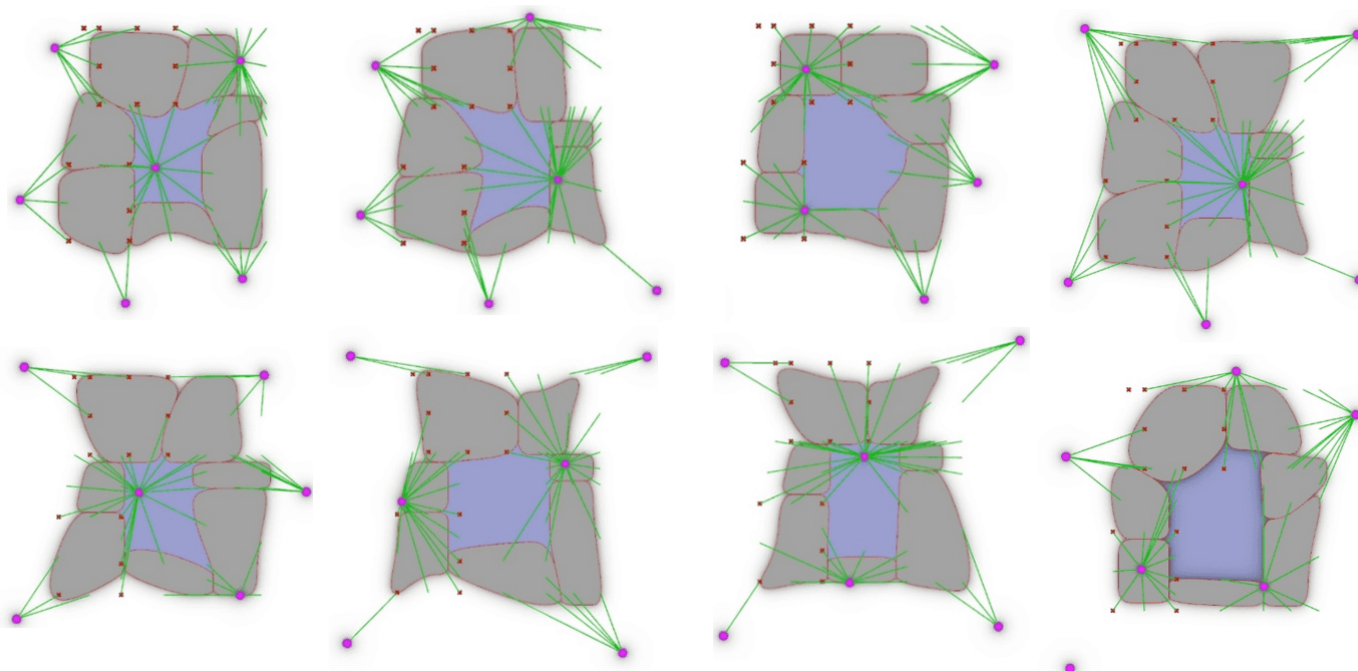


Figura 5. Algunas muestras obtenidas. Fuente: Elaboración de los Autores.

condiciones paramétricas muy concretas, para que en cada transformación los resultados siempre deben dar una única superficie cerrada, sin que se crucen líneas, superficies o vértices. Además, que todas estas muestras guardan un área total muy similar.

PASO 2: TRANSFORMACIONES MORFOLÓGICAS

Inspirado en la teoría de las transformaciones; los vértices de cada área de la vivienda (cocina, recámara, etc) son estirados en dirección hacia los puntos representados con esferas de color violeta (Figura 4), éstas se colocan en rangos de aleatoriedad en el espacio, los puntos aleatorios estiran a los vértices que se encuentren más cerca de éstos, la fuerza (magnitud) de esta dirección se encuentra en relación con la distancia que se tiene en estos puntos.

Se comienza convirtiendo primero las áreas cuadradas a redondear las esquinas (Figura 4 B). La figura 4 (C) para fines explicativos sólo está midiendo hacia los puntos aleatorios de las áreas del comedor, la sala y el vestíbulo. Los modelos se hacen a partir de todas las áreas. En la figura 5 se observan las muestras obtenidas.

Así mismo para cumplir con una estructuración ordenada y lógica de cada modelo de casa, se contempla la selección parcial de las curvas colindantes al patio central, esto con el fin de seleccionar una parte como ventana y otra como elemento de estructuración de tipo columna (estas reglas serán ejecutadas por el algoritmo con base a la derivada del contorno de cada geometría, que contempla la alternancia entre figuras contiguas: donde las curvas más pequeñas obtenidas de la derivación son consideradas



Figura 6. Alternancia estructural. En violeta puntos de control de los vértices. En celeste: aberturas de salida de aire. En blanco: aberturas de entrada. Fuente: Elaboración de los Autores.

como columnas) (Figura 6). De este modo se determina también las superficies o límites de borde, datos indispensables para determinar el cálculo por CFD (Figura 8).

PASO 3: SIMULACIONES CFD

La herramienta principal del estudio es Grasshopper, donde se hace el algoritmo evolutivo y el proceso de selección, así como la simulación de ventilación natural a través de Butterfly. Este último es un complemento y una biblioteca de Python para crear y ejecutar

simulaciones avanzadas de CFD en que se utiliza OpenFOAM² (Ladybuy Tools [LLC], 2022). CFD implica la resolución de ecuaciones diferenciales parciales acopladas, que deben resolverse de manera sucesiva; se puede utilizar para resolver problemas de flujo de fluidos, transferencia de calor, reacciones químicas e incluso tensiones térmicas. Las ecuaciones principales permanecen constantes para todas las aplicaciones de flujo de aire y transferencia de calor en ambientes interiores, pero las condiciones de contorno cambian según el problema específico: por ejemplo, la distribución de la habitación puede variar o la velocidad del aire de suministro (ASHRAE, 2009).

El tipo de simulación empleado en este experimento se denomina "Inlet-Outlet", que simula el flujo de aire impulsado por el viento en interiores para evaluar la eficacia de la ventilación. Es el método más adecuado a diferencia del túnel de viento (estudio de tipo urbano), HVAC³, entre otros. Estos cálculos toman superficies geométricas de grasshopper como límites de borde, para distinguir los tres valores indispensables para esta simulación: 1. Inlet: entrada de aire natural. 2. Outlet: salida de aire natural. 3. Walls: límites de borde, contorno o en este caso la morfología de la vivienda. Inlet es la superficie que representa al patio central en el punto más alto de la casa (Figura 8).

Debido a que todas las zonas geográficas tienen distintos valores de velocidad de aire, temperatura y de inclinación por la topografía, densidad de edificios, vegetación, etc. (ASCE, 2023d). Por lo que para realizar este proceso en un sitio en concreto se deberá de hacer de acuerdo con la información meteorológica de la zona geográfica en donde se encuentre. (Figura 9). Se observa que los resultados pueden variar hasta en 200 m/s debido a estos factores.

Los valores de velocidad de aire de entrada se consideran en rangos de aleatoriedad de 0.2 a 0.8 a m/s. Valores de percepción de una ventilación en "calma" (Soler & Palau, 2022). Además, se tienen valores pequeños negativos verticalmente o eje z de 10 grados: esta es una práctica común en el análisis de la dinámica del viento en entornos urbanos. Aunque no se utilizó un túnel de viento, la lógica de aplicar variaciones en ángulos pequeños es consistente con estándares como los mencionados en el (ASCE, 2023c, pág. 25), recomienda probar direcciones de viento en incrementos de 10 grados de azimut, un enfoque diseñado para capturar respuestas significativas del flujo de aire.

La temperatura de entrada se establece aleatoria entre 22 a 35, debido a que es la temperatura en la que se considera que este modelo de casa habitación puede tener mayor

provecho y alcance para mitigar la sensación de calor sin utilizar medios mecánicos. Se utiliza el componente "Wall" para definir los límites de borde o contorno de toda la vivienda; la temperatura para éste se considera de entre 15 a 30°, aunque se repitieron simulaciones con 40° que reportan pocas diferencias debido a que es un modelo de vivienda de patio central. Los restantes parámetros de este componente vienen por defecto del software, estos incluyen una condición no deslizamiento (no-slip), gradiente de presión cero (zero gradient) en la dirección perpendicular a la pared, entre otros (OpenFOAM, 2019). La presión en este tipo de análisis es generada mediante la velocidad y dirección del aire por lo que se determina a 0 el valor de presión, lo que indica que los valores de presión comienzan desde este valor.

Para adaptar el componente SnappyHexMesh (SPM) a una arquitectura con formas curvas se tomaron diversas fuentes de información, como Wolf Dynamics (2018). Contrario de cómo está preestablecido el input "snap" debe estar desactivado, el input "additional parameter" para ello se debe colocar el número entero más bajo posible: 1; mientras más bajo este número, el componente se adhiere mejor a superficies curvas.

Los resultados que se obtienen en las simulaciones son el diagrama de flujo de ventilación interior (análisis horizontal x, z) y un diagrama de presión. El primero consiste en un campo de vectores (V total) que contienen (N) cantidad de celdas con un vector cada una: cada vector tiene dirección y magnitud (o fuerza), que representa la velocidad y dirección del viento en m/s. Cada variación que se obtiene en el proceso evolutivo es sometida a estas pruebas, las magnitudes se suman y se dividen entre N para obtener un promedio de velocidad del viento al interior de la vivienda (V interior) (Ecuación 1):

$$V_{interior} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \| V_i \| \quad (\text{Ecuación 1})$$

Los vectores con celdas de SPM igual o menor a 0.5 son descartados ya que son vacías y no contienen magnitud. Por lo que en muchos casos N reduce su valor considerablemente, que resulta en N efectiva.

ANÁLISIS DEL ANCESTRO COMÚN SIMULACIONES CFD

La primera evaluación: ancestro común (Figura 7) obtiene una velocidad interior de 0.8367 m/s. V total= 410 m/s. N= 490. En la segunda generación de modelos ocurren las transformaciones morfológicas explicadas en el Paso 1, debido a ello se evaluaron 75 modelos distintos.

2 OpenFOAM es un software de código abierto utilizado para simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD).

3 HVAC "Heating, Ventilation, and Air Conditioning" Es un sistema utilizado para proporcionar calefacción y refrigeración mecánicamente en edificios residenciales y comerciales.

4 Diseñada específicamente para generar mallas Hexa dominantes de alta calidad para geometrías complejas (Wolf Dynamics, 2018).

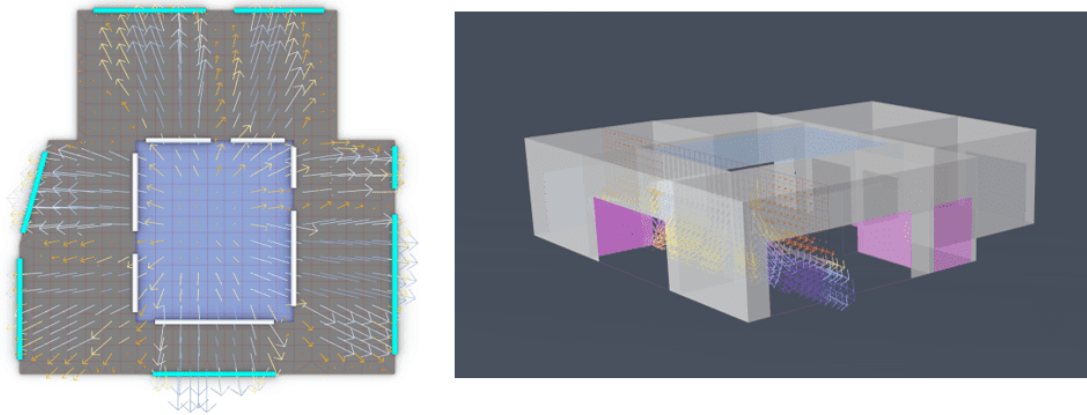


Figura 7. Simulación del ancestro común Fuente: Elaboración de los Autores.



Figura 8. Datos de entrada para la simulación. Fuente: Elaboración de los Autores.

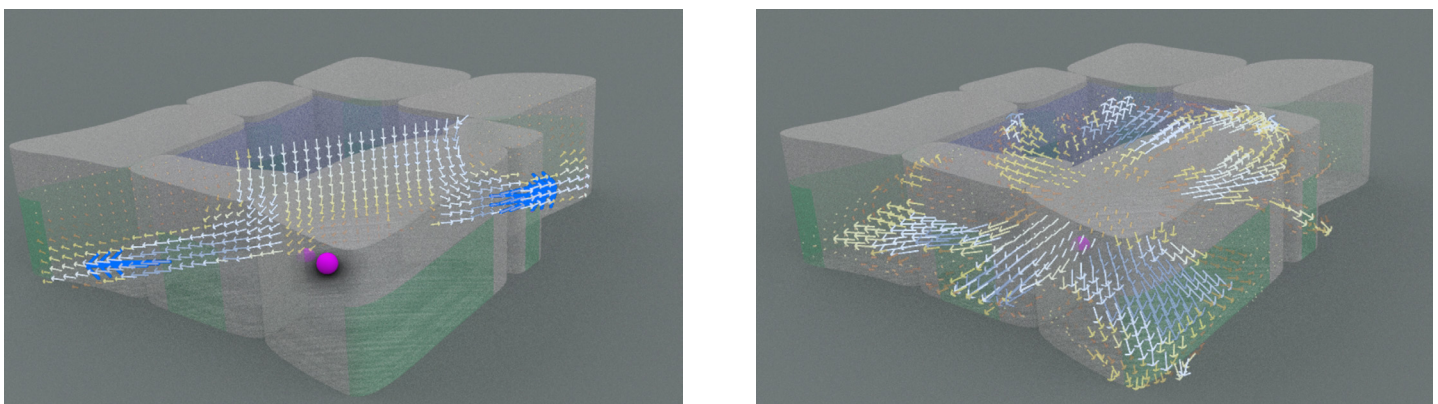


Figura 9. Análisis de los modelos. A), Análisis vertical: con coordenadas en x. B): Análisis horizontal: x, z. Fuente: Elaboración de los Autores.

En la figura 8 se representa en azul: superficie inlet. En turquesa: superficie outlet. En verde: normal de la superficie. En blanco "walls" (muros). Figura 7 (B): rejilla Snappy Hex Mesh (SHM).

PASO 4: SELECCIÓN Y CRUCE DE GENES

En el análisis se extraen los vectores de mayores magnitudes, para esto se encuentra cuál de los puntos

aleatorios son los que determinan estos vectores (Figura 9). Estos puntos son los que se combinan junto a los de otra especie campeona para definir la reproducción, variación y morfología general de los modelos de la tercera generación. En la figura 10 se observa cómo se seleccionan únicamente 3 puntos aleatorios de los 6 a 8 originales. De este modo se discretizarán únicamente los genes más poderosos, así mismo se suman nuevos puntos al azar para enriquecer la variación de los modelos

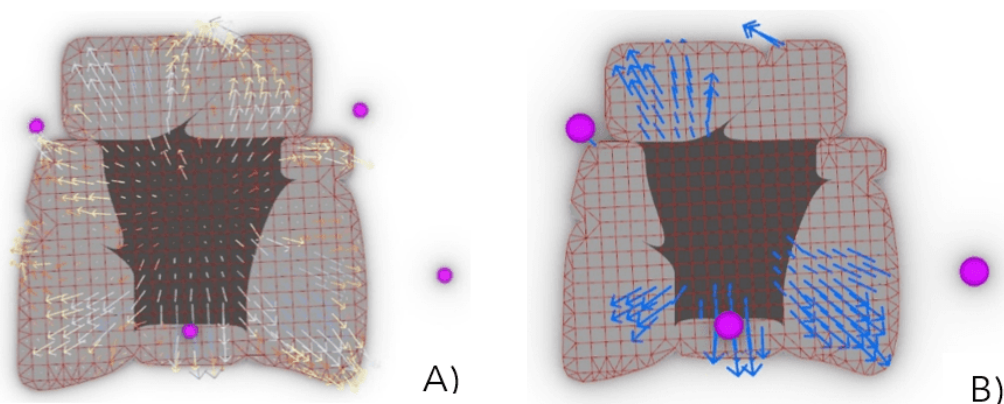


Figura 10. Proceso de combinación de genes ganadores. Los vectores de color azul (B) tienen mayor magnitud. Fuente: Elaboración propia del Autor.

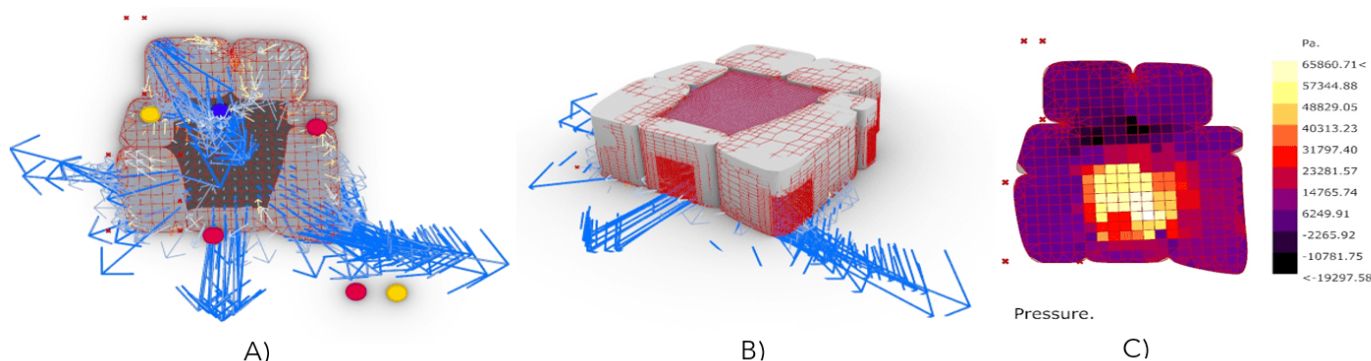


Figura 11. Modelado ganador 09 de la tercera generación. Visualización de los vectores aumentada. Fuente: Elaboración de los Autores.

Tabla 1. Análisis de altura de ventanas del modelo 09 de la segunda generación. Fuente: Elaboración de los Autores.

Sim.	Tipo de simulación	H análisis horizontal (m)	Sum. Total (m/s)	V interior (m/s)	H ventana (m)	H dintel (m)	H antepecho (m)
A	Vertical		925.3	1.7	0.5	2.3	1.2
B	Vertical		1398.7	2.6	0.8	2.0	1.2
C	Vertical		1471.2	2.7	1.4	0.6	2.0
D	Vertical		1474.5	2.7	2.3	0.6	1.1
E	Vertical		1439	2.7	2.3	1.6	0.1
F	Horizontal	3.2	1557.4		0.8	0.8	2.4
G	Horizontal	0.1	1620.2		0.8	0.8	2.4
H	Horizontal	0.1	1760.6		2.3	0.1	1.6

obtenidos.

PASO 5: SELECCIÓN FINAL

El modelo con mejor fitness es el modelo 09 de la tercera generación, teniendo $V_{total} = 1,760.62$ m/s. $N=855v$, observado en la figura 11; se tienen esferas azules como puntos aleatorios del modelo campeón de una generación previa, puntos rosados de otro modelo campeón y puntos azules que representan nuevas posibilidades para esta última generación.

PASO 6: ANÁLISIS DE ALTURA DE VENTANAS (OUTLET)

Se elaboran análisis verticales (x, z) y horizontales (x, y) en dos modelos con el mejor fitness sobre el desempeño de la ventilación natural en cuestión de altura de ventanas (outlet), junto a variaciones de altura en antepecho y dintel. (Figura 11). Los desempeños más altos se obtienen

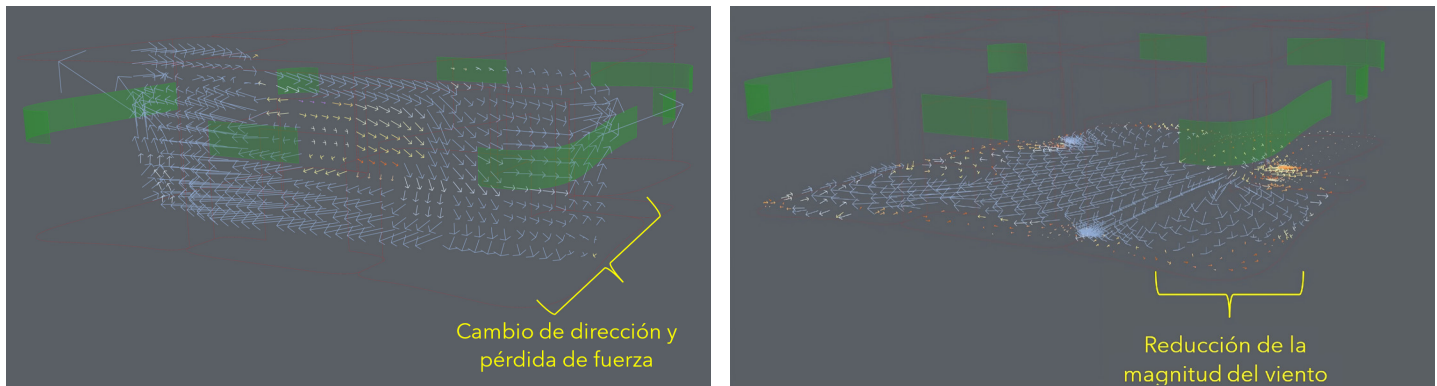


Figura 12. Análisis Outlet, simulaciones A, E, G, H. especificadas en la Tabla 2. Fuente: Elaboración de los Autores.

Tabla 2. Comparación con el ancestro común. Fuente: Elaboración de los Autores.

Tipo de simulación	H corte h (m)	(N) vector	Sum. Total (m/s)	V entrada: X (m/s)	V entrada: Z (m/s)	V interior (m/s)	H ventana (m)
A.C.	0.1	412	160	0.8	- 0.5	0.38	
M.G.		911	825.3			0.90	
A.C.		482	322		- 1.0	0.62	2.3
M.G.		922	1253			1.32	
A.C.		482	402	0.2	-2.0	0.83	
M.G.		965	1662			1.72	

cuando la ventana se ubica al nivel de piso con alturas de 1.4 a 2.3 metros, y los menores a partir del decrecimiento de los 0.80 m.

Se obtienen Vtotales considerables (Tabla 1, sim. F y G) con alturas de 0.8 m. y grandes antepechos, pero como se observa: la dirección del viento cerca de los antepechos y dinteles se ve desviada perpendicularmente a los muros o contornos, que se interpretan como zonas de estancamiento y turbulencias (ASCE, 2023b), las que pueden provocar una disminución en el caudal de la ventilación. (Figura 12).

PASO 7: ANÁLISIS ALTURA DE VENTANAS (OUTLET)

Se comparan los resultados de ambas simulaciones en relación al ángulo de inclinación de entrada de aire en el patio central. AC= Ancestro común, MG= Modelo Ganador.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo de mayor fitness obtuvo 1355 N, donde más de 500 son celdas vacías, por lo tanto, N efectiva es 855. Vtotal= 1,760.62 m/s. En este modelo 85% de los vectores son mayor a 1.6 m/s. Esto significa que en

Tabla 3. Escala de Beaufort. Fuente: Información extraída de Soler & Palau (2022)

Escala de Beaufort	Nombre de viento	Velocidad (m/s)
0	Calma	0.5
1	Aire ligero	1.5
2	Brisa ligera	3
3	Brisa suave	6

85% de la vivienda sin contar al patio central tiene una velocidad mayor a 1.6 m/s. Esto se interpreta que con este procedimiento se reduce la temperatura dentro de la vivienda hasta 4.2° (Tabla 4) en un 85% del área en la vivienda (Soler & Palau, 2022) y de acuerdo con la Escala de Beaufort se pasa de tener una sensación de ventilación de "calma" a "aire ligero" (Tabla 3).

El modelo ganador es 2.50 veces mayor al ancestro común en cuanto a tener una velocidad de aire natural al interior de la vivienda, este es representado en la Figura 13 mediante pre visualización.

Tabla 4. Efecto sobre el cuerpo humano. Fuente: Información extraída de Soler & Palau (2022)

Velocidad del aire en las personas (m/s)	Sensación de que la temperatura ambiente se ha rebajado en (°C)
0.1	0
0.3	1
0.7	2
1.0	3
1.6	4
2.2	5

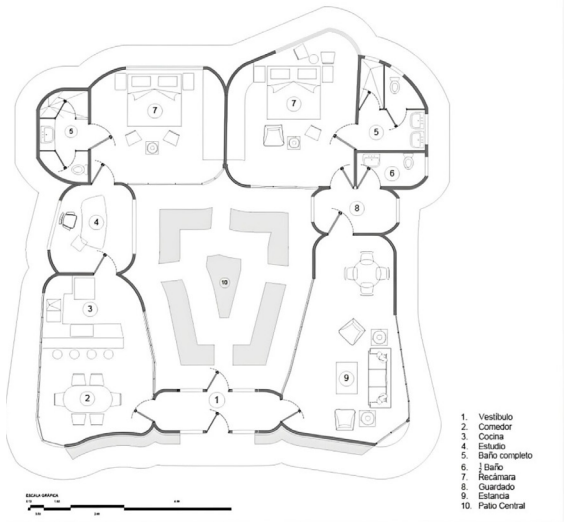


Figura 13. Aplicación y visualización de los resultados del modelo 03 de la segunda generación. Fuente: Elaboración de los Autores.

CONCLUSIONES

Estos resultados muestran que es posible analizar y obtener un mejor desempeño de la ventilación natural interior en una vivienda a través del proceso de diseño evolutivo presentado en este artículo. Lo que resulta adecuado en el contexto de la arquitectura biofílica por su sustentabilidad e incorporación de patrones de la naturaleza en su morfología.

Este proceso debería considerarse en un contexto de diseño arquitectónico, ya que la metodología permite analizar el desempeño de la ventilación natural en la vivienda de patio central mediante diseño evolutivo y CFD. Esto muestra cómo el diseño evolutivo puede ser una herramienta efectiva para explorar variaciones morfológicas. Además, este método se propone para añadir valor para trabajar junto a los métodos y técnicas de arquitectura sustentable existentes como la losa-jardín, earthship, entre otros. También se propone este método para contemplar la posibilidad de llevarse cabo mediante técnicas de construcción contemporáneas como la impresión 3D en concreto.

Los resultados podrían ampliarse si se elabora una mayor evaluación de especies, esto implicaría desde el crecimiento del área de la vivienda, nuevas áreas, usos, disposiciones, entre otros. Así como la mejora del algoritmo; como aumentar el valor de genes o ADN y partir de un ancestro común de diferente naturaleza. Hasta la exploración del comportamiento de la ventilación en distintas tipologías de vivienda con distintas entradas y salidas de aire. La búsqueda y experimentación en otros fenómenos que causan una hipótesis de investigación relevante como el efecto “embudo”, “la espiral”, “biomimética”, entre otros. Así como analizar propiedades higrotérmicas de la ventilación natural como la humedad del aire.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, D. R. de-I. y L. a-S. C.; Curación de datos, D. R. de-I.; Análisis formal, D. R. de-I.; Adquisición de financiación, D. R. de-I. y L. a-S. C.; Investigación, D. R. de-I.; Metodología, D. R. de-I. y L. a-S. C.; Administración

de proyecto, D. R. de-I.; Recursos, D. R. de-I. y L. a-S. C.; Software, D. R. de-I.; Supervisión, D. R. de-I. y L. a-S. C.; Validación, D. R. de-I.; Visualización, D. R. de-I.; Escritura – borrador original, D. R. de-I. y L. a-S. C.; Escritura – revisión y edición, D. R. de-I.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo brindado a través de la beca CONAHCYT para el desarrollo de esta investigación, “Diseño Evolutivo para la optimización del confort en la ventilación natural”

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, O. H. (2009). Fitness and its role in evolutionary genetics. *Nature Reviews Genetics*, 10, 531-539. <https://doi.org/10.1038/nrg2603>

ASCE. (2023a). Appendix D: Effective Strategies to Reduce Dynamic Wind-Induced Response in ASCE, Prestandard for Performance-Based Wind Design (V1.1, pp. 107-108). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784482186>

ASCE. (2023b). Chapter 6: Modeling and Analysis. in ASCE, Prestandard for Performance-Based Wind Design (V1.1, pp. 34-45). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784482186>

ASCE. (2023c). Chapter 5.2.2: Site-Specific Hazard Analysis in ASCE, Prestandard for Performance-Based Wind Design. (V1.1, pp. 23-25). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784482186>

ASCE. (2023d). Chapter 5.3: Wind tunnel test methodologies in ASCE, Prestandard for Performance-Based Wind Design (pp. 25-30). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784482186>

ASHRAE. (2009). INDOOR ENVIRONMENTAL QUALITY, Chapter 13: Indoor Environmental Modeling (TC 4.10, Indoor Environmental Modeling) in ASHRAE, *Handbook: Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. <https://www.ashrae.org/technical-resources/technical-committees/complete-list-of-tcs-with-home-pages>

Banzhaf, W. (2013). Chapter 17: Evolutionary Computation and Genetic Programming in A. Lakhtakia, & R. J. Martín Palma (Eds), *Engineered Biomimicry* (pp. 430-447). Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415995-2.00017-9>

Bensalem, R. (1996). *Wind-Driven Natural Ventilation in Courtyard and Atrium Type Buildings* [Thesis Doctor, School of Architectural Studies. University of Sheffield]. <https://etheses.whiterose.ac.uk/3000/1/DX197102.pdf>

Echeverri Montes, P. (27 septiembre de 2021). Grasshopper para Rhino: ¿qué es y cómo se utiliza? *Echeverrimontes*. <https://www.echeverrimontes.com/blog/grasshopper-para-rhino-que-es-y-como-se-utiliza>

El Ahmar, S., Battista, F., y Fioravanti, A. (2019). Simulation of the thermal performance of a geometrically complex Double-Skin Facade for hot climates: EnergyPlus vs. OpenFOAM. *Building Thermal, Lighting, and Acoustics Modeling*, 12, 781-795. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0530-8>

Futuyma, D. J. (2017). Section III: Natural selection and adaptation in J. Losos (Ed.), *Princeton Guide of Evolution* (pp. 189-200). Princeton University Press. https://www.kokkonuts.org/wp-content/uploads/jennions_kokko_2014_The_Princeton_Guide_to_Evolut.pdf

Iurato, G., y Igamberdiev, A. U. (2020). D’Arcy W. Thompson’s On Growth and Form: A landmark for the mathematical foundations of epigenetics. *BioSystems*, 198, 104279. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2020.104279>

Ladybug Tools (LLC). (2022). Butterfly. <https://www.ladybug.tools/butterfly.html>

Malkawi, A. M., Srinivasan, R. S., Yi, Y. K., y Choundhary, R. (2005). Decision support and design evolution: integrating genetic algorithms: CFD and visualization. *Automation in Construction*, 14(1), 33-44. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2004.06.004>

OpenFOAM. (2019). OpenFoam: User Guide v2112. <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-bcs-derived-wall.html>

Rodrigues Marques Sakiyama, N., Frick, J., Bejat, T., y Garrecht, H. (2021). Using CFD to Evaluate Natural Ventilation through a 3D Parametric Modeling Approach. *Energies*, 14 (8), 2197. <https://doi.org/10.3390/en14082197>

Soler & Palau. (2022, Albril). Velocidad del aire. Los efectos y la velocidad del aire. S&P (Soler & Palau Ventilation Group). <https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-velocidad-del-aire/>

Tablada de la Torre, A. E., Blocken, B., Carmeliet, J., De Troyer, F., y Verschure, H. (13-16 de noviembre de 2005). *The influence of courtyard geometry on air flow and thermal comfort: CFD and thermal comfort simulations*. In Proceedings of the 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture (Vol. 1, pp. 75–80). NDU Publishing; Lebanon.

Werritty, A. (2010). D’Arcy Thompson’s ‘On Growth and Form’ and the Rediscovery of Geometry within the Geographic Tradition. *Scottish Geographical Journal*, 126(4), 231-257. <https://doi.org/10.1080/14702541.2010.549344>

Whitlock, M. C. (2014). Section I.4: From DNA to Phenotypes in J. Losos (Ed.), *Princeton Guide of Evolution*. (pp. 40-49). Princeton University Press. https://www.kokkonuts.org/wp-content/uploads/jennions_kokko_2014_The_Princeton_Guide_to_Evolut.pdf

Wolf Dynamics. (2018). Mesh generation using snappyHexMesh. http://www.wolfdynamics.com/wiki/meshing_OF_SHM.pdf

Zamani, Z., Taleghani, M., y Hoseini, S. B. (2012). Courtyards as solutions in green architecture to reduce environmental pollution. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 30 (1), 385-396. https://repository.tudelft.nl/file/File_c83b7492-d5d2-4e89-8554-017b6d40e7f7?preview=1

Zheng, J., Tao, Q., y Li, L. (2020). Numerical study of wind environment of a low-rise building with shading louvers: Sensitive analysis and evaluation of cross ventilation. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 19(6), 541-558. <https://doi.org/10.1080/13467581.2020.1758113>

Zhong, W., Schröder, T., y Bekkering, J. (2021). Biophilic design in architecture and its contributions to health, well-being, and sustainability: A critical review. *Frontiers of Architectural Research*, 11(1), 114-141. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.07.006>

LA NATURALEZA EN LOS ESPACIOS PARA EL ADULTO MAYOR: UN ENFOQUE BIOFÍLICO, EN EL MUNDO

NATURE IN SPACES FOR OLDER PEOPLE: A BIOPHILIC APPROACH, IN THE WORLD

A NATUREZA EM ESPAÇOS PARA IDOSOS: UMA ABORDAGEM BIOFÍLICA, NO MUNDO

Hanlly del Pilar Velarde-Espinoza

Estudiante de Arquitectura y Diseño de Interiores,
 Facultad de Arquitectura y Diseño
 Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú
<https://orcid.org/0009-0006-5848-6565>
 hanllyve17@hotmail.com (Autor de Correspondencia)

Alberto Carlos Llanos-Chuquipoma

Arquitecto
 Docente tiempo completo, Carrera de Arquitectura y Diseño de Interiores,
 Facultad de Arquitectura y Diseño, Carrera de Arquitectura y Urbanismo -
 Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú
<https://orcid.org/0000-0001-7525-7669>
 betico10@hotmail.com



RESUMEN

El propósito del estudio es conocer cómo la biofilia puede condicionar el diseño de espacios arquitectónicos del adulto mayor. La investigación es descriptiva, cualitativa y no experimental, se utilizó la revisión documental de antecedentes teóricos y arquitectónicos para precisar el tema de estudio, el comportamiento de la variable e identificar criterios arquitectónicos. Se analizaron cinco casos de la realidad empírica para validar los criterios y obtener lineamientos de diseño. Asimismo, uno de los resultados obtenidos en los cinco casos fue el lineamiento de generar terrazas y espacios exteriores naturales transitables que crean integración con el área libre y éstos conecten con el entorno natural, un lineamiento aplicado en un 100 por ciento de los casos estudiados. Se concluye que, la biofilia condiciona el diseño de espacios del adulto mayor al generar una relación fluida entre interior/exterior mediante espacios abiertos y semiabiertos, que incluyan la naturaleza y promuevan la interacción social de los ancianos.

Palabras clave

biofilia, naturaleza, adultos mayores, teoría biofílica

ABSTRACT

The study aims to find out how biophilia can condition the design of architectural spaces for older people. The research is descriptive, qualitative, and non-experimental, using a documentary review of the theoretical and architectural background to specify the subject of study, the behavior of the variable, and to identify architectural criteria. Five cases of empirical reality were analyzed to validate the criteria and obtain design guidelines. Similarly, one of the results obtained in the five cases became the guideline to generate terraces and natural, walkable outdoor spaces that create integration with open areas and connect with the natural environment, a guideline applied in 100% of the cases studied. It is concluded that biophilia conditions the design of spaces for older people by generating a fluid indoor/outdoor relationship through open and semi-open spaces, which includes nature and promotes social interaction among older people.

Keywords

biophilia, nature, older people, biophilic theory

RESUMO

O objetivo do estudo é descobrir como a biofilia pode condicionar o projeto de espaços arquitetônicos para idosos. A pesquisa é descritiva, qualitativa e não-experimental. Uma revisão documental de antecedentes teóricos e arquitetônicos foi utilizada para definir o objeto de estudo, o comportamento da variável e identificar critérios arquitetônicos. Cinco casos de realidade empírica foram analisados para validar os critérios e obter diretrizes de projeto. Da mesma forma, um dos resultados obtidos nos cinco casos foi a diretriz de criar terraços e espaços externos naturais e transitáveis que permitam a integração com a área aberta e a conexão com o ambiente natural, diretriz aplicada em 100% dos casos estudados. Conclui-se que a biofilia condiciona o projeto de espaços para idosos ao gerar uma relação fluida entre o interior e o exterior por meio de espaços abertos e semiabertos que incluem a natureza e promovem a interação social dos idosos.

Palavras-chave:

biofilia, natureza, idosos, teoria biofílica

INTRODUCCIÓN

La biofilia integra el entorno natural con el ser humano, busca una conexión directa e indirecta entre ambos para promover la integración con el medio ambiente, permitiendo la coexistencia del bienestar de todos los individuos y un entorno más equilibrado (Trevisan y Silva, 2024). Asimismo, se indica que la biofilia actúa como respuesta a diversos estímulos naturales, a través del contacto con la naturaleza urbana, demostrándose los beneficios sociales, fisiológicos e incluso emocionales; y que esta naturaleza urbana se manifiesta mediante el contacto directo o indirecto (Villalpando y Bustos, 2023). Es sabido que, el diseño biofílico constituye un aporte esencial en la arquitectura, relaciona las características de los entornos construidos y los elementos naturales, mediante patrones biofílicos que se agrupan en tres dimensiones: Naturaleza en el espacio, Analogías Naturales y La naturaleza del espacio. La teoría biofílica de la naturaleza en el espacio hace referencia a la presencia directa, física y efímera de los elementos naturales en el lugar (Gareca, 2022), siendo la dimensión más relevante en el presente estudio.

Por otro lado, el ritmo acelerado del envejecimiento en los países se ha incrementado y con ello la necesidad de equipamientos y espacios para las personas adultas mayores, donde puedan mejorar su funcionalidad, bienestar y su inserción social de manera efectiva (Araya et al., 2018). A nivel mundial, el incremento de la población adulta mayor resalta la importancia de contar con equipamientos que ofrezcan una solución adecuada que mejoren la calidad de vida de este grupo, que

además proporcionen espacios en los ámbitos: físico, emocional, económico, educativo y social (Barahona, 2020). Los espacios recreativos para personas mayores no siempre son los adecuados y seguros en dichos equipamientos, por lo que es necesario crear áreas donde realizar actividades que puedan generar bienestar físico, emocional y social en esta población adulta mayor (Quispe, 2023).

Asimismo, existe la necesidad de incorporar la biofilia en los espacios del adulto mayor para su beneficio, ya que, en la actualidad los espacios donde realizan sus actividades diarias no buscan una solución adecuada para ellos, siendo deficientes en su infraestructura y el correcto uso de los espacios (Lorenzo, 2020). Estudios de casos seleccionados de la investigación: Ciudades biofílicas, espacios verdes y calidad de vida en la zona metropolitana de San Luis Potosí, México han demostrado que el contacto con la naturaleza tiene un impacto positivo en la salud y el bienestar, y que las personas adultas mayores tienen una inclinación innata hacia los espacios naturales, para aprovechar los grandes beneficios que éstos ofrecen (Moreno y Sánchez, 2018). Además, aplicar los principios biofílicos en los espacios arquitectónicos para adultos mayores mejora su calidad de vida, su seguridad y su confort emocional, al permitirles interactuar socialmente, a través de diversas actividades en entornos construidos con un diseño de arquitectura biofílica (Failoc y Ojeda, 2022).

Las personas mayores son las que tienen más dificultades para mantenerse activas debido a sus condiciones o limitaciones físicas. Se ha demostrado que incorporar la naturaleza en espacios, tiene una



Figura 1. Principios de la teoría biofílica de la naturaleza en el espacio. Fuente: Elaboración de los autores adaptados de Medina et al. (2023)

gran importancia en el bienestar físico y psicológico de las personas de edad avanzada, ya que mejora las condiciones de habitabilidad, movilidad y equilibrio mediante la integración de elementos naturales en el diseño arquitectónico (Torrontegui, 2020). A medida que las personas envejecen, la salud tiende a disminuir y son más propensas a enfermedades, movilidad reducida e incluso trastornos. Los patrones biofílicos traen beneficios en las personas, particularmente en

los mayores. Integrar el diseño biofílico demuestra que, da mejoras y beneficios en la calidad de vida de esta población de edad avanzada, los que suelen ser los más vulnerables física y mentalmente (Mari Tamil, et. al., 2023).

La presente investigación busca determinar cómo el diseño arquitectónico puede usar la incorporación de la naturaleza en los espacios, para fomentar la socialización y ofrecer apoyo emocional a los adultos mayores;



Figura 2. Antecedentes teóricos y arquitectónicos. Fuente: Elaboración de los autores.

esto promueve la participación con la comunidad, la naturaleza y consigo mismos. Se ha estudiado que la biofilia mejora los espacios mediante la conexión entre lo construido y lo natural, lo que genera influencias positivas y beneficios en los ambientes, lo que a su vez proporciona mayor bienestar y confort, sobre todo para

las personas de la tercera edad (Medina et al., 2023). El diseño biofílico contribuye de forma directa e indirecta a mejorar la calidad de vida en los entornos residenciales, como la comodidad, la accesibilidad y las relaciones para así generar un interés activo y un desarrollo para el diseño biofílico (Lee y Park, 2022).

11 PROGRAMA CENTROS DIURNOS DEL ADULTO MAYOR: RECOMENDACIONES PARA MEJORAR SU FUNCIONAMIENTO

GEROKOMOS

Araya, A.-X., Iriarte, E., Rioja, R., González, G., Araya, A.-X., Iriarte, E., Rioja, R., & González, G. (2018). Programa Centros Diurnos del Adulto Mayor: Recomendaciones para mejorar su funcionamiento. *Gerokomos*, 29(1), 9-12.

El estudio contribuye a entender a las personas mayores con un servicio que reporte beneficios en su funcionalidad, aumento de bienestar y mayor inserción social. También las mejoras del lugar con criterios inclusivos y flexibles.

12 ENVEJECIMIENTO, SENTIDO DE LUGAR E PLANEAMIENTO URBANO: FACILITADORES E BARRERAS

PSICOLOGIA EM ESTUDO

Albuquerque, D., Goulart, F., Klavdianos, N., Günther, I., & Portella, A. (2023). Envelhecimento, sentido de lugar e planejamento urbano: Facilitadores e barreiras. *Psicologia em Estudo*, 28. <https://doi.org/10.4025/psicoestud.v28i0.54416>

Mejorar la calidad de vida, y a su vez el envejecimiento con nuevas formas que comprenden la conexión de las personas adultas mayores con el medio ambiente dando una relación anciano-entorno.

13 CRIANÇAS DA NATUREZA: VIVÊNCIAS, SABERES E PERTENCIMENTO

INFÂNCIAS E EDUCACÃO DAS RELAÇÕES ÉTNICO-RACIAIS

Timba, L., & Profice, C. C. (2019). Crianças da Natureza: Vivências, saberes e pertencimento. *Educação & Realidade*, 44(2), e88370. <https://doi.org/10.1590/2175-623688370>

La experiencia de niños en la naturaleza y las posibles consecuencias en su desarrollo, todo apartir de la naturaleza. El estudio demuestra las condiciones biofílicas y discute los dibujos y habla de niños.

14 ARQUITECTURA BIOFÍLICA: INFLUENCIA DE SU APLICACIÓN EN EL DISEÑO DE UN CENTRO RESIDENCIAL PARA EL ADULTO MAYOR

REVISTA DE INVESTIGACIÓN APOORTE SANTIAGUINO

Medina Changa, M., Migliori Ochoa, L., & Soria Caballero, G. (2023). Arquitectura biofílica: Influencia de su aplicación en el diseño de un centro residencial para el adulto mayor. *Apoorte Santiaguino*. <https://doi.org/10.32911/as.2023.v16.n2.1058>

La biofilia da espacios con conexión entre el entorno construido y la naturaleza. Usar criterios de la arquitectura biofílica en una residencia, da una influencia positiva, generando beneficios en los ambientes y adultos.

15 A FRAMEWORK OF SMART-HOME SERVICE FOR ELDERLY'S BIOPHILIC EXPERIENCE

SUSTAINABILITY

Lee, E. J., & Park, S. J. (2020). A framework of smart-home service for elderly's biophilic experience. *Sustainability*, 12(20), 8572. <https://doi.org/10.3390/su12208572>

Los servicios y hogares inteligentes, refuerzan la experiencia de la naturaleza con las personas, dando una vida sostenible entre las personas mayores. La naturaleza en entornos residenciales sostenibles.

16 EL CONTEXTO Y EL CENTRO RESIDENCIAL PARA LAS PERSONAS ADULTAS MAYORES EN COLOMBIA Y ESPAÑA

REVISTA DE ESTUDIOS COOPERATIVOS

Osorio Bayter, L., & Salinas Ramos, F. (2016). El contexto y el centro residencial para las personas adultas mayores en Colombia y España. *La empresa social. Una alternativa para el bienestar. REVESCO. Revista de Estudios Cooperativos*, 121, 205-227.

Los espacios donde un adulto pueda vivir y compartir sus años. Mejora el bienestar hacia el adulto mayor en los hogares o residencias.

17 ADULTO MAYOR: ENVEJECIMIENTO, DISCAPACIDAD, CUIDADO Y CENTROS DÍA

SALUD UNINORTE

Pinilla Cárdenas, M. A., Ortiz Álvarez, M. A., & Suárez-Escudero, J. C. (2022). Adulto mayor: Envejecimiento, discapacidad, cuidado y centros día. *Revisión de tema. Salud Uninorte*, 37(02), 488-505. <https://doi.org/10.14482/sun.37.2.618.971>

El proceso y los modelos del envejecimiento, la discapacidad, el cuidado y los centros día para atención de toda la población adulta mayor, brinda el cuidado integral de dichas personas en los lugares.

18 HÁBITAT Y ADULTO MAYOR: EL CASO DE VALPARAÍSO

REVISTA INVI

Fadda, G., & Cortés, A. (2009). Hábitat y adulto mayor: El caso de Valparaíso. *Revista INVI*, 24(66). <https://doi.org/10.4067/S0718-8358200900200003>

El índice de envejecimiento es mayor, y busca la calidad de vida de este grupo etario según su localización y situación socioeconómica. El hábitat urbano brinda condiciones propicias para este grupo de población.

19 PROMOTING STRESS AND ANXIETY RECOVERY IN OLDER ADULTS: ASSESSING THE THERAPEUTIC INFLUENCE OF BIOPHILIC GREEN WALLS AND OUTDOOR VIEW

FRONTIERS IN PUBLIC HEALTH

Xiaoxue, S., & Huang, X. (2024). Promoting stress and anxiety recovery in older adults: Assessing the therapeutic influence of biophilic green walls and outdoor view. *Frontiers in Public Health*, 12, 1352611. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1352611>

Incorporar los principios de conexión con la naturaleza en los entornos interiores sobre todo en los centros de atención para adultos mayores, contribuye con la reducción del estrés y el alivio de ansiedad.

20 ENVEJECIMIENTO Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN A LOS ENTORNOS URBANOS DESDE LA GERONTOLOGÍA AMBIENTAL

ESTUDIOS DEMOGRÁFICOS Y URBANOS

García-Valdez, M. T., Sánchez-González, D., & Román-Pérez, R. (2018). Envejecimiento y estrategias de adaptación a los entornos urbanos desde la gerontología ambiental. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 34(1), 101-128. <https://doi.org/10.24201/edu.v34i1.1810>

La adaptación a entornos urbanos en el envejecimiento con estrategias de adaptación ambiental en el lugar, debido a los activos personales y los atributos y funciones del ambiente urbano.

DESCUBRIENDO LA TEORÍA BIOFÍLICA DE LA NATURALEZA EN EL ESPACIO

La teoría biofílica se basa en la idea que los seres humanos sienten una conexión innata con la naturaleza. Una de sus dimensiones es la naturaleza en el espacio, cuyo objetivo es vincular lo construido con el entorno natural. Esta dimensión busca reforzar la integración del medio exterior con los espacios interiores construidos, que considera la incorporación de elementos naturales en los espacios para promover el bienestar, fomentar habilidades y aumentar la productividad. La teoría biofílica se compone de tres principios clave: la composición volumétrica y naturaleza, espacios abiertos y relación con el entorno natural y finalmente, elementos naturales y arquitectura, Figura 1.

METODOLOGÍA

El estudio es una investigación de tipo descriptiva en cuanto a su profundidad, que define el comportamiento de la variable biofilia. También se clasifica como una investigación cualitativa debido a la condición de los datos, los que fueron enfocados en obtener información no cuantificable basada en la observación. Además, se considera una investigación no experimental, ya que no se manipula la variable, sino que se basa principalmente en la observación del comportamiento de la biofilia en análisis de casos empíricos.

Por lo tanto, el estudio se estructura en tres fases de investigación, la que comienza con la revisión documental de antecedentes teóricos y arquitectónicos para precisar el tema de estudio y de la variable biofilia. Para la búsqueda de los antecedentes teóricos, que aborden el tema de investigación de manera general, se usaron investigaciones y artículos científicos. Dicha revisión de antecedentes teóricos fue necesaria para conocer todo lo vinculado a la biofilia y cómo se relaciona con el adulto mayor (Figura 2).

Por otro lado, los antecedentes arquitectónicos, abordan el tema de investigación de manera específica se incluyeron investigaciones y artículos científicos. Asimismo, esta revisión documental de los antecedentes arquitectónicos contribuye con la investigación para conocer cómo la biofilia se puede integrar en un diseño arquitectónico para el adulto mayor, ver Figura 3.

Durante el proceso, se desarrolla una lista de bases de datos y buscadores oficiales de la Universidad Privada del Norte, como EBSCO, Google académico, y documentos en revistas indexadas (Web of Science, Scopus y Scielo) (Figura 2 y Figura 3), el estudio de estos documentos arroja criterios arquitectónicos agrupados en tres categorías de estudio: Composición Volumétrica, Tipología Espacial y Detalles Arquitectónicos.

Posteriormente se hizo la selección de una muestra finita, que estuvo compuesta por cinco casos empíricos de la realidad, los que contenían los criterios arquitectónicos

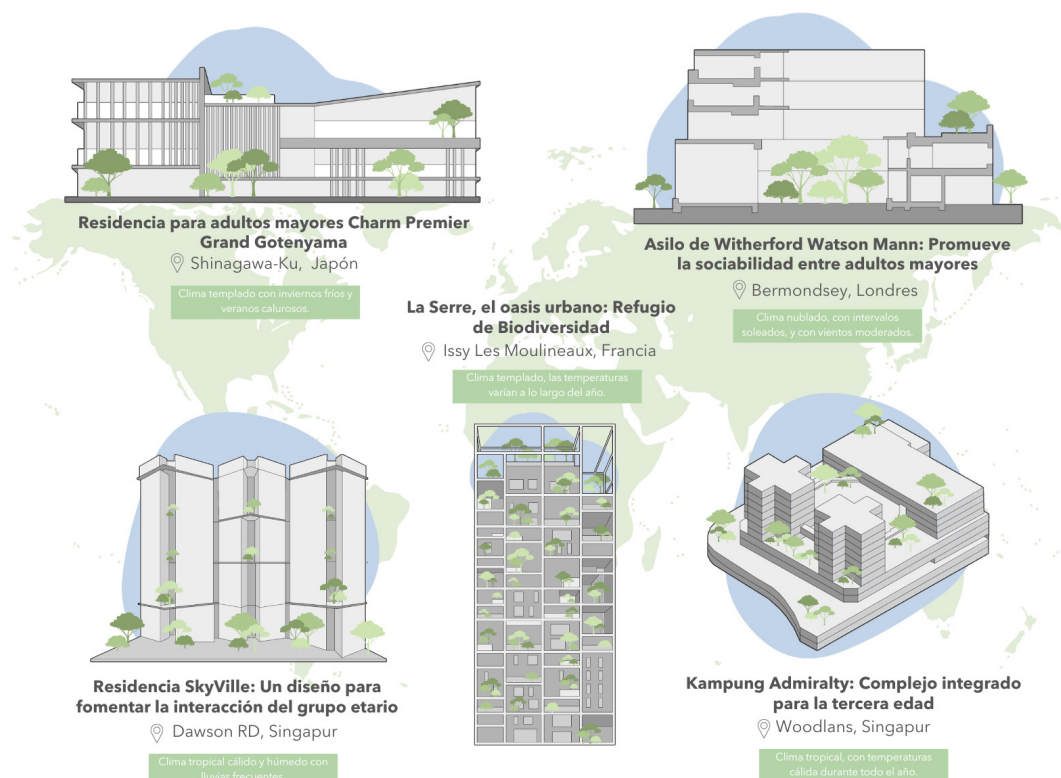


Figura 4. Casos arquitectónicos en el ámbito internacional. Fuente: Elaboración de los autores.

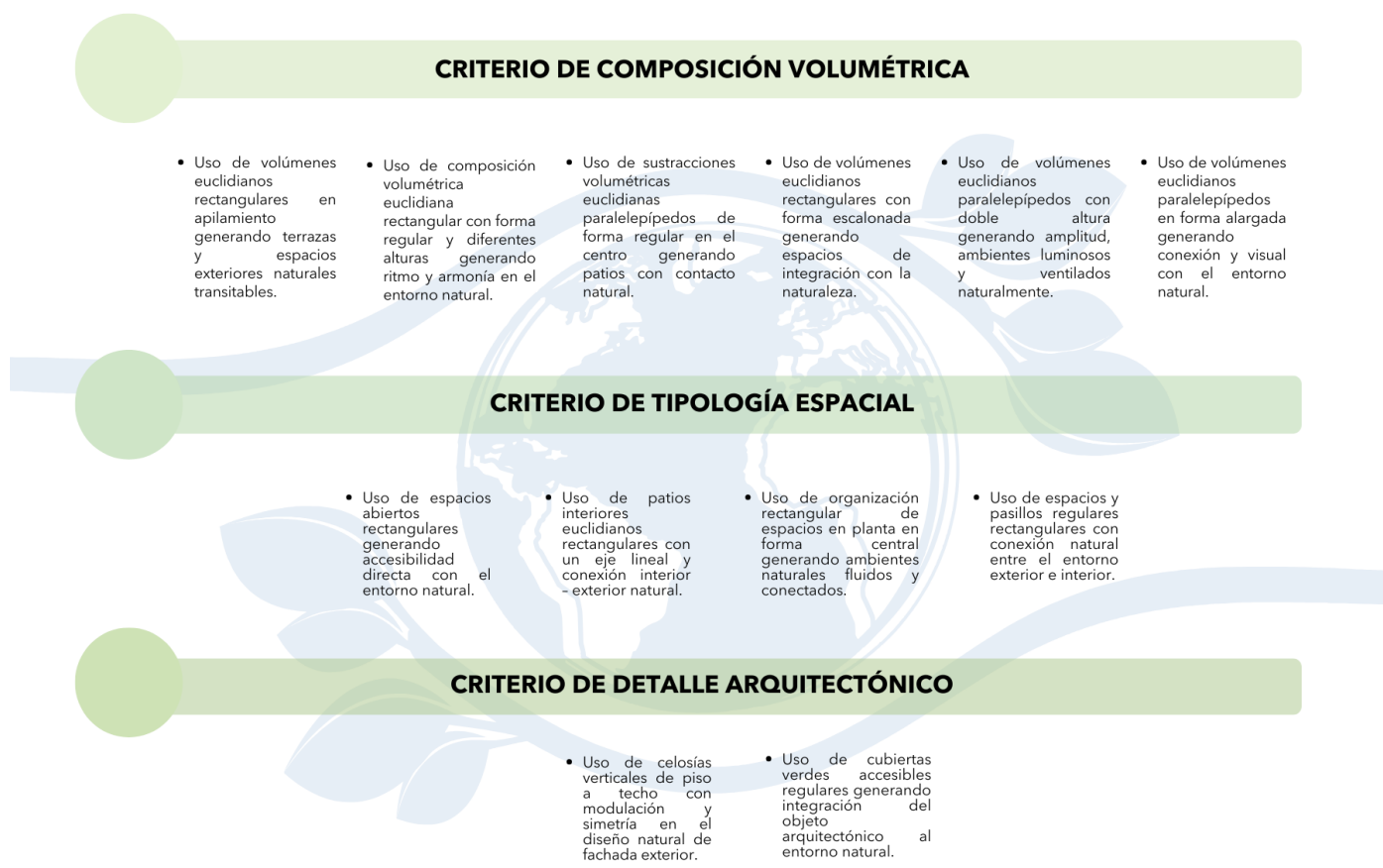


Figura 5. Criterios arquitectónicos. Fuente: Elaboración de los autores basada en la bibliografía.

previamente identificados en los antecedentes estudiados como se puede ver en la Figura 5, siendo esta la razón de la selección de los casos; con el objetivo de identificar y validar los criterios arquitectónicos analizados en las tres categorías de estudio. Dichos casos fueron seleccionados por ser homogéneos, pertinentes y representativos, además son del ámbito internacional (Figura 4); cada caso arquitectónico fue modelado con el software SketchUp Pro.

Finalmente, en la tercera fase se describen de manera cualitativa y gráfica los resultados obtenidos en el análisis de casos arquitectónicos, que confirma la aplicación de los criterios arquitectónicos en la realidad empírica que repercuten en el espacio y se convierten de esta manera en lineamientos de diseño arquitectónico, repartidos entre las tres categorías de estudio (Tabla 1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para demostrar la relación entre los espacios arquitectónicos destinados al adulto mayor y la naturaleza, se estudiaron y analizaron cinco casos arquitectónicos de ámbito internacional previamente presentados. En cada caso se realizó una recolección

y análisis de datos, los que se presentarán mediante un lenguaje descriptivo inicial, acompañado de gráficos explicativos.

1. CASO N°01: RESIDENCIA PARA ADULTOS MAYORES CHARM PREMIER GRAND GOTENYAMA

Diseñado por los arquitectos Nikken Housing System Ltd, en el año 2022 en un área de 4,397m² (Abdel, 2023). Es una residencia para adultos mayores entrelazada en la ciudad, situada en una verde calle del centro de Tokio, Japón. Cuenta con un gran vestíbulo de doble altura que inunda de luz el espacio, tiene la interacción estratégica de los niveles exteriores e interiores con sensación de apertura y continuidad a todos los espacios, creándose un recorrido fluido. Los espacios están iluminados y ventilados de forma natural, que concibe la conexión perfecta con el mundo exterior y reducción del impacto medioambiental.

Efectivamente, el Hogar de Ancianos integra principios biofílicos en su diseño, que conecta a los residentes con el entorno urbano y el paisaje natural de Tokio, lo que favorece sus habilidades sociales. Según García et al. (2018), las estrategias de adaptación ambiental promueven el envejecimiento activo y social. Según esto, se entiende que, aunque los factores ambientales

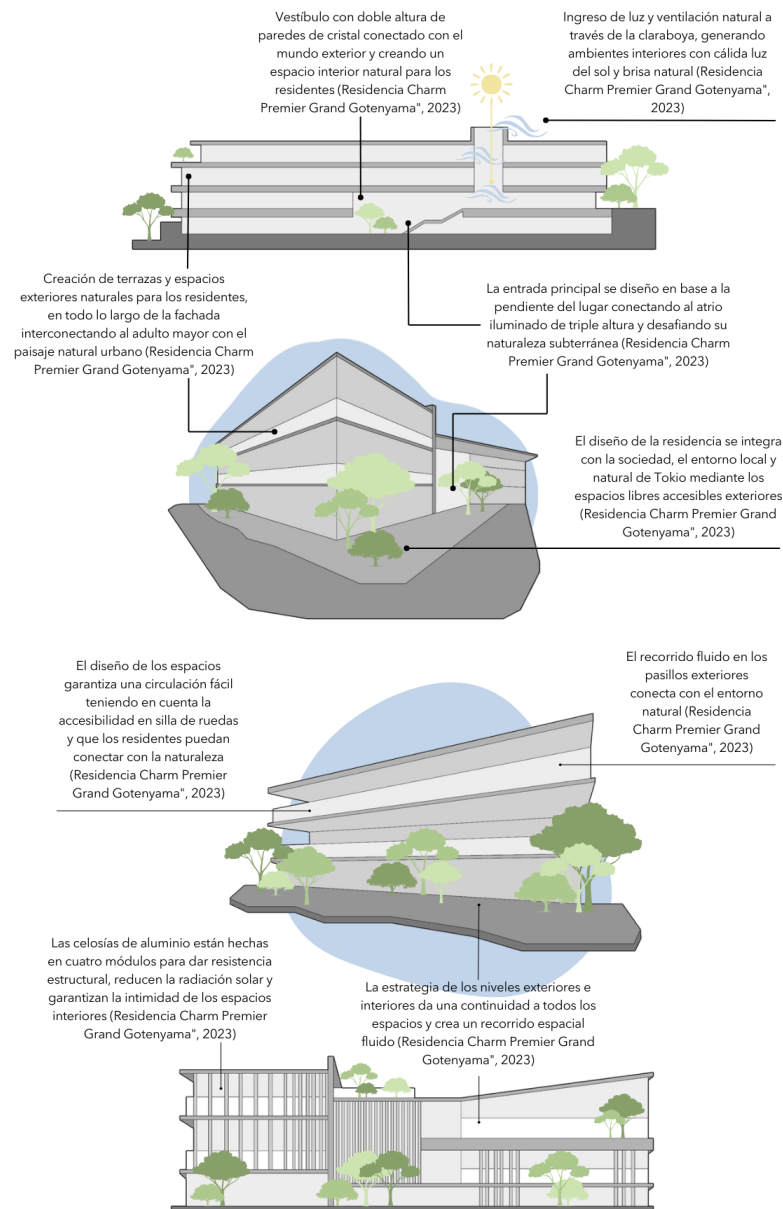


Figura 6. Gráfica de caso N° 01. Fuente: Elaboración de los autores.

influyen en las habilidades del adulto mayor, el diseño biofílico vincula los espacios interiores con el medio natural exterior, permitiendo que los adultos mayores participen activamente y eviten el aislamiento, lo que favorece sus habilidades sociales (Figura 6).

2. CASO N°02: KAMPUNG ADMIRALTY: COMPLEJO INTEGRADO PARA LA TERCERA EDAD

Diseñado por los arquitectos WOHA, con un área total de 32,331.60m² (Castro, 2018), con un límite de altura de 45m en el vecindario de Woodlands ubicada en la región norte de Singapur. Considerado como el pueblo vertical, que conecta a la naturaleza con las personas. Los apartamentos presentan principios de diseño

con ventilación natural y óptima luz diurna, la zona verde principal se presenta de forma escalonada con techos accesibles y transitables, además la luz natural es producto de los ventanales perimetrales y el patio central que posee.

El complejo en Woodlands, Singapur satisface las necesidades de la tercera edad, a través de un parque comunitario que integra la biofilia, que promueve la interacción social y activa. Fadda y Cortés (2019) indican que el hábitat urbano y los espacios sociales dan condiciones propicias para este grupo etario. De acuerdo con esto, se infiere que, no sólo es necesario crear espacios de socialización, sino también integrar un diseño biofílico, permitiendo que los residentes se

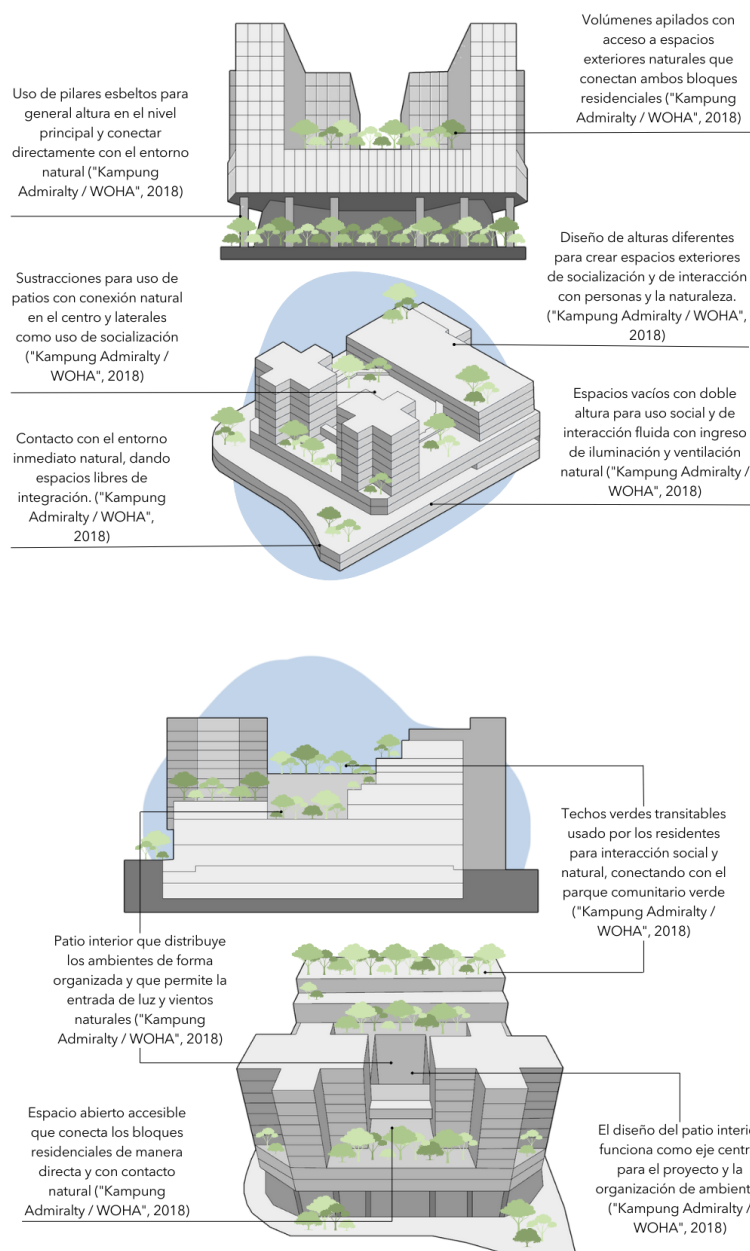


Figura 7. Gráfica de caso N° 02. Fuente: Elaboración de los autores.

conecten con la naturaleza y consigo mismos, lo que mejora sus habilidades sociales (Figura7).

3. CASO N°03: RESIDENCIA SKYVILLE: UN DISEÑO PARA FOMENTAR LA INTERACCIÓN DEL GRUPO ETARIO

Diseñado por los arquitectos WOHA, con un área de 29,392m² (ArchDaily, 2016), ubicado en Dawson Rd, Singapur el proyecto es libre, todas las áreas comunes están completamente abiertas al público, está ubicado en un área de vivienda en altura mixta. Presenta una plaza ubicada a lo largo de un parque lineal, también el diseño ofrece tres variaciones de planta para cada tamaño de unidad, los diseños son flexibles y se basan en espacios libres de

columnas y vigas. Todos los ambientes son iluminados y ventilados naturalmente, debido al diseño abierto.

El proyecto está diseñado para fomentar la interacción social mediante un diseño biofílico, que brinda a los residentes acceso libre a diversos espacios y áreas comunes abiertas al público. Osorio y Salinas (2016) señala que, generar espacios da posibilidades de participación e implicación social al adulto mayor. Conforme a esto, se deduce que, el crear espacios no es suficiente para fomentar habilidades sociales, sino que el entrelazar dichos espacios con elementos naturales conecta a las personas de forma que incentivan la participación social (Figura 8).

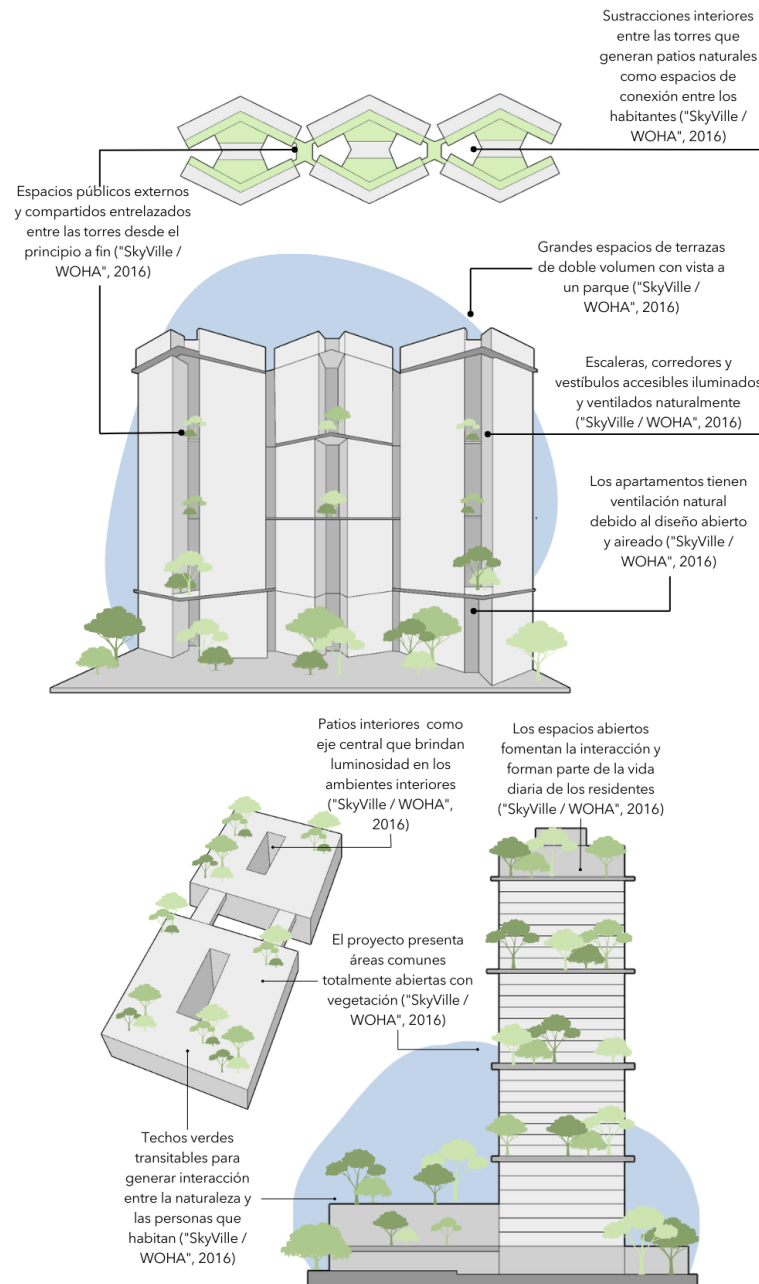


Figura 8. Gráfica de caso N° 03. Fuente: Elaboración de los autores.

4. CASO N°04: LA SERRE, EL OASIS URBANO: REFUGIO DE BIODIVERSIDAD

Diseñado por MVRDV, en colaboración con la arquitecta Alice Tricom, en el año 2023, ubicado en Issy Les Moulineaux, Francia, cuenta con un total de 3,000m² de área libre (Fakharany, 2023), el proyecto residencial cuenta con 190 unidades distribuidos en 22 pisos, en los que 30% corresponde a viviendas sociales. El proyecto integra la naturaleza en el entorno urbano, que establece un refugio de biodiversidad, en el que destaca la naturaleza como característica central. También proporciona un camino compartido amplio que anima a las personas a utilizar el espacio verde y socializar.

El proyecto incorpora abundante vegetación, integra la biofilia con la arquitectura del edificio para incentivar las actividades sociales de los residentes. Albuquerque et al. (2023) señalan que, la planificación urbana crea una conexión anciano-entorno, favoreciendo sus vínculos sociales y comunitarios. De acuerdo con esto, se infiere que no sólo planificar la ciudad ayuda a las habilidades sociales; sino también la implementación de la biofilia, que promueve la participación de los adultos mayores (Figura 9).

5. CASO N°05: ASILO WITHERFORD WATSON MANN: PROMUEVE LA SOCIABILIDAD ENTRE ADULTOS MAYORES

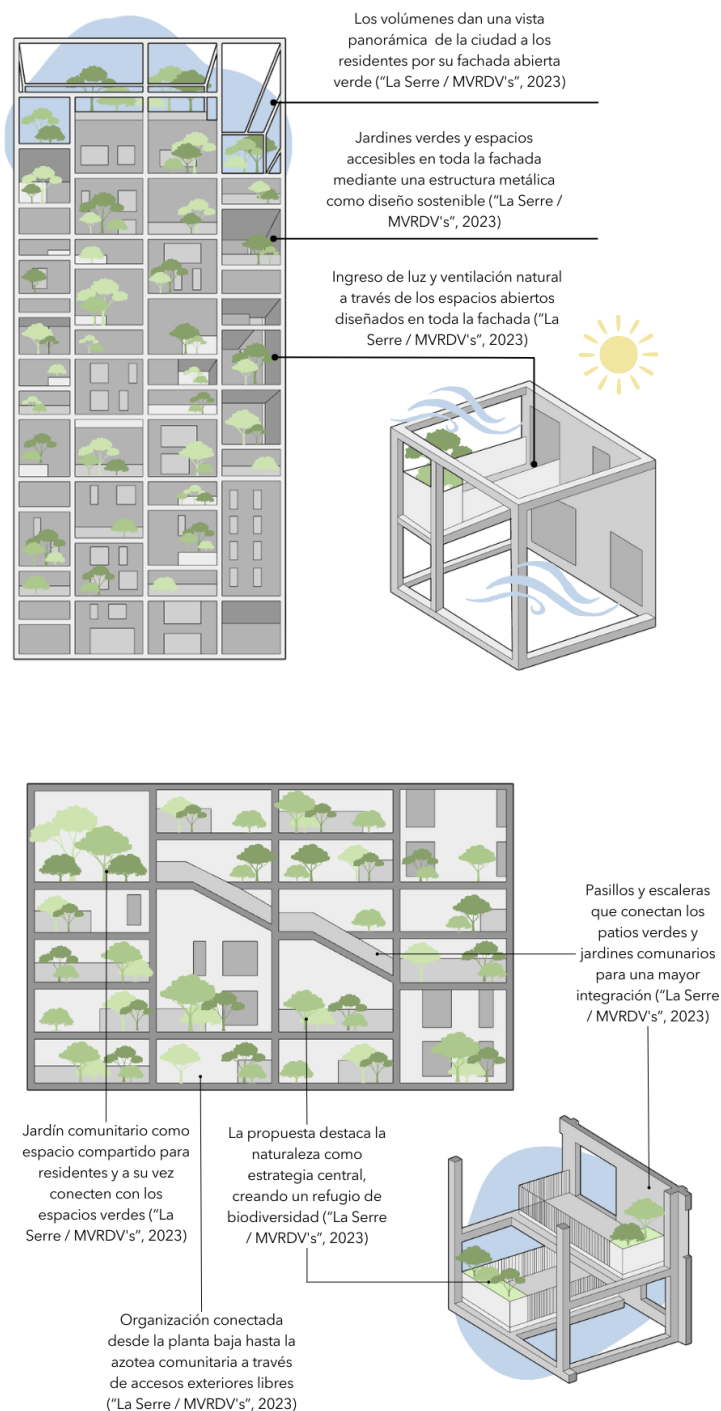


Figura 9. Gráfica de caso N° 04. Fuente: Elaboración de los autores.

Diseñado por arquitectos de Witherford Watson Mann Architects, ubicada en Bermondsey, Londres con un área de 6,152m² (Santos, 2016), es un alojamiento para unos 90 residentes. El proyecto cuenta con cinco pisos y una elevación principal de dos niveles acristalados. La residencia está conectada por un patio central, el proyecto entrega abundancia verde, amplias vistas paisajísticas vecinas y la naturaleza se integra con el entorno natural tradicional por su diseño exterior y el tipo de materiales que emplea.

El proyecto es un edificio urbano, activo, abierto y en contacto directo con el exterior natural, donde las personas mayores interactúan y socializan en espacios diseñados con elementos biofílicos que fueron aplicados para dar ambientes con encuentros verdes. Pinilla Cárdenas et al. (2021) indican que, las infraestructuras orientadas al cuidado y bienestar del adulto mayor mejoran sus habilidades sociales. Según esto, se deduce que crear estancias no fomentan por completo la participación de este grupo etario, sino que el integrar elementos

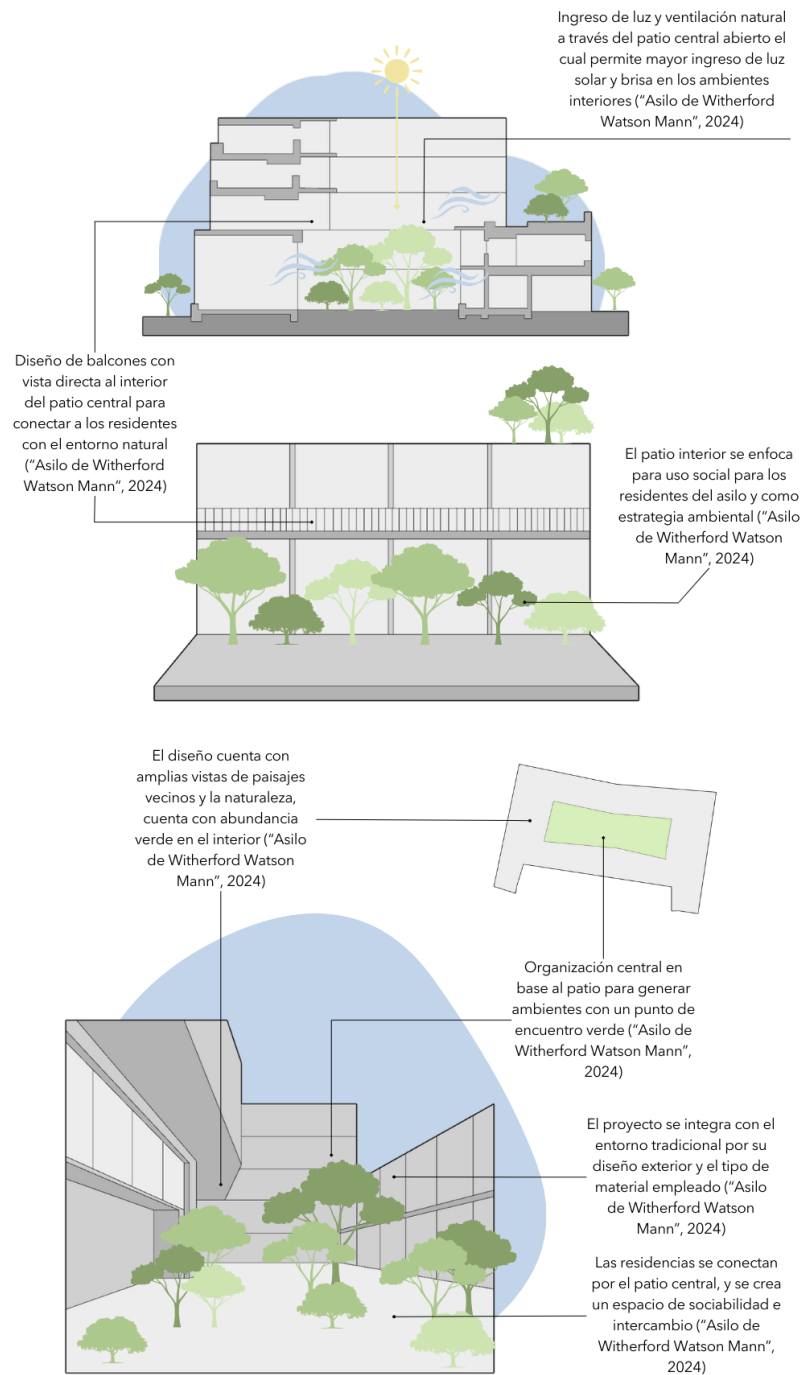


Figura 10. Gráfica de caso N° 05. Fuente: Elaboración de los autores.

naturales a dichas infraestructuras para fomentar sus actividades sociales (Figura 10).

En efecto, el diseño con principios biofílicos refuerza la integración social, ya que la conexión con la naturaleza fomenta la participación de las personas adultas mayores dentro y fuera de los espacios construidos según lo encontrado en los cinco casos de estudio analizados. Sin embargo, Araya et al. (2018) señalan que, el contacto único entre personas mayores tiene

un impacto significativo en la inserción social dentro de estos espacios, donde se genera la participación de los adultos mayores. De acuerdo con esto, se puede inferir que, aunque el contacto social entre personas mayores es un factor importante, no es suficiente por sí solo para fomentar el desarrollo de sus habilidades sociales. Es necesario aplicar los principios biofílicos en el diseño arquitectónico ya que, contribuye a crear un entorno que facilita la interacción y estimula su participación. Aplicar la integración de elementos naturales y la conexión con el

Tabla 1. Lineamientos finales. Fuente: Elaboración de los autores.

Lineamientos	Resultados	Porcentaje
Lineamientos de composición volumétrica		
Uso de volúmenes euclidianos paralelepípedos con doble altura que generan amplitud, ambientes luminosos y ventilados naturalmente para crear espacios interiores confortables, que presenten amplitud vertical en el interior, además de aprovechar la luz natural como también la circulación del aire que proporciona espacios frescos y mejor iluminados por la mayor altura empleada.	Casos N° 1, 2, 3, 4, 5	100%
Uso de composición volumétrica euclidiana rectangular con forma regular y diferentes alturas que generan ritmo y armonía en el entorno natural para brindar un patrón volumétrico que integre el entorno natural, además de crear una variación de luces y sombras mediante las alturas compuestas en el diseño volumétrico que da flexibilidad y funcionalidad.	Casos N° 2	20%
Uso de volúmenes euclidianos rectangulares en apilamiento que generan terrazas y espacios exteriores naturales transitables para crear integración con el área libre, que también los espacios tengan conexión con el entorno natural que entrega como resultado ambientes sociales accesibles al aire libre como zonas de descanso y recreación para los usuarios.	Casos N° 1, 2, 3, 4, 5	100%
Uso de volúmenes euclidianos paralelepípedos en forma alargada que origina conexión y visual con el entorno natural para integrarlo con el paisaje natural y crear espacios interiores que aprovechen la entrada de luz y brisa natural por medio de la fachada alargada que mejora los ambientes y que éstos cuenten con una vista panorámica al exterior.	Casos N° 1, 3, 4	60%
Uso de volúmenes euclidianos rectangulares con forma escalonada crea espacios de integración con la naturaleza para dar funcionalidad, que se relaciona con el entorno natural mediante espacios accesibles como zonas de interacción social con las demás personas y con la naturaleza inmediata por la forma empleada en el diseño.	Casos N° 2	20%
Uso de sustracciones volumétricas euclidianas paralelepípedos de forma regular en el centro que origina patios con contacto natural para integrar los espacios con la naturaleza y que éstos sean funcionales alrededor de los patios que funcionan como punto de encuentro central que conecta con los demás ambientes.	Casos N° 2, 3, 5	60%
Lineamientos de tipología espacial		
Uso de espacios abiertos rectangulares que ocasiona accesibilidad directa con el entorno natural para brindar integración social mediante los espacios abiertos y el acceso fluido de éstos con la naturaleza, que establece una conexión directa de las personas con el entorno verde inmediato.	Casos N° 2, 3, 5	60%
Uso de espacios y pasillos regulares rectangulares con conexión natural entre el entorno exterior e interior para crear ambientes funcionales y brindar una relación con la naturaleza, además de permitir una fluidez entre los espacios interiores y exteriores mediante caminos con visual directa natural.	Casos N° 1, 3, 4, 5	80%
Uso de patios interiores euclidianos rectangulares con un eje lineal y conexión interior - exterior natural para crear espacios que sean funcionales y accesibles por la distribución ordenada de los ambientes, que dan como resultado un mejor uso de dichos espacios e incorporación de la naturaleza.	Casos N° 2, 3, 5	60%
Uso de organización rectangular de espacios en planta en forma central que genera ambientes naturales fluidos y conectados para que los ambientes estén interconectados entre ellos y que los usuarios tengan una mejor accesibilidad a todos los espacios, además de dar ambientes funcionales y con mayor conexión con el entorno natural.	Casos N° 1, 4, 5	60%
Lineamientos de detalle arquitectónico		
Uso de cubiertas verdes accesibles regulares que integra el objeto arquitectónico al entorno natural para ser utilizados como espacios de recreación social que brinde bienestar ambiental y que éstos se relacionen con la naturaleza, que da como resultado espacios transitados superiores.	Casos N° 2, 3, 4	60%
Uso de celosías verticales de piso a techo con modulación y simetría en el diseño natural de fachada exterior para dar un enfoque natural y funcione como un control solar, que brinda privacidad a los ambientes interiores, sombras y una circulación de vientos, también aporta orden en la fachada además de servir como estructura.	Casos N° 1	20%

Tabla 2. Cualidades espaciales / biofílicas. Fuente: Elaboración de los autores.

Cualidades espaciales / biofílicas	Caso N° 1 Residencia para adultos mayores Charm Premier Grand Gotenyama	Caso N° 2 Kampung Admiralty: Complejo integrado para la tercera edad	Caso N° 3 Residencia Skyville: Un diseño para fomentar la integración del grupo etario	Caso N° 4 La Serre, el Oasis Urbano: Refugio de Biodiversidad	Caso N°5 Asilo Witherford Watson Mann: Promueve la sociabilidad entre adultos mayores
Integración de la vegetación	X	X	X	X	X
Acceso a la luz natural	X	X	X	X	X
Espacios sociales naturales	X	X	X	X	X
Uso de materiales sostenibles	X	X			X
Conexión con el entorno natural	X	X	X	X	X

entorno exterior son principios esenciales para promover las habilidades sociales del adulto mayor.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos de doce lineamientos teóricos de diseño arquitectónico en la Tabla 1 de lineamiento finales, el que está organizado por categorías: lineamientos de composición volumétrica, tipología espacial y detalle arquitectónico. También se indica en qué casos arquitectónicos se encuentran dichos lineamientos, además de señalar un porcentaje que indica cuántos de todos los casos analizados usan el lineamiento, igualmente se realizó un análisis de comparación de los cinco casos estudiados, de cualidades espaciales / biofílicas donde se observa que casos poseen o no poseen tal cualidad (Tabla 2).

CONCLUSIONES

Finalmente, el estudio demuestra que la relación entre la biofilia y los espacios arquitectónicos destinados a adultos mayores es fundamental para promover sus habilidades sociales. La biofilia condiciona a la arquitectura con la incorporación de elementos naturales en el diseño arquitectónico que promuevan la conexión entre el adulto mayor y el entorno que los rodea. Los espacios biofílicos permiten a la población adulta interactuar con la naturaleza, lo que puede contribuir a su bienestar psicológico y físico; esta interacción ayuda a la motivación en el objeto social, ya que, al proporcionar áreas naturales, terrazas, espacios al aire libre, se dan oportunidades para la socialización e integración debido al contacto directo con el medio natural.

Asimismo, los elementos biofílicos pueden mejorar la experiencia vital de los adultos mayores, que contribuye

con una vida socialmente activa, además, el diseño biofílico en los espacios puede fomentar el desarrollo de las habilidades y crear áreas donde las personas disfruten de las actividades dentro del espacio arquitectónico, integrándose y conectándose con la naturaleza presente. Esta población de edad avanzada interactúa en los espacios naturales, que lo motivan a la participación de actividades debido al diseño de los espacios arquitectónicos con patrones biofílicos.

Por otro lado, se obtuvieron resultados que evidencian la conexión entre los espacios arquitectónicos y la naturaleza, como se observa en la Tabla 2, que resume los lineamientos identificados en los casos analizados. Por ejemplo, uno de los lineamientos consiste en generar terrazas y espacios exteriores naturales transitables que crean integración con el área libre y éstos conecten con el entorno natural; este lineamiento está presente en los cinco casos estudiados. Otro lineamiento se refiere a los espacios y pasillos con conexión natural entre el entorno exterior e interior que proporcionan ambientes funcionales relacionados con la naturaleza, este lineamiento se observa en sólo cuatro de los casos estudiados.

La biofilia aporta significativamente a la calidad de vida de los adultos mayores, ya que permite interactuar de manera sencilla con espacios que cuentan con plantas y áreas verdes, fomentándose así su bienestar social, además, la biofilia facilita la conexión entre los espacios arquitectónicos y la naturaleza, ya que crea áreas sociales donde los adultos mayores pueden socializar activamente. Los resultados también demuestran que la biofilia promueve las relaciones sociales de los adultos mayores, lo que evidencia su vinculación con el medio natural.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRedit

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

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo de la Universidad Privada del Norte, por la implementación de un proyecto piloto para la elaboración de artículos científicos dentro del curso Proyecto de Tesis en Arquitectura y Diseño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdel, H. (2023). Residencia para adultos mayores charm premier grand gotenyama / nikken housing system ltd. ArchDaily Perú. <https://www.archdaily.pe/pe/1009812/residencia-para-adultos-mayores-charm-premier-grand-gotenyama-nikken-housing-system-ltd>

Albuquerque, D., Goulart, F., Klavdianos, N., Günther, I., y Portella, A. (2023). Envelhecimento, sentido de lugar e planejamento urbano: Facilitadores e barreiras. *Psicologia em Estudo*, 28. <https://doi.org/10.4025/psicolestud.v28i0.54416>

Araya, A.-X., Iriarte, E., Rioja, R., y González, G. (2018). Programa Centros Diurnos del Adulto Mayor: Recomendaciones para mejorar su funcionamiento. *Gerokomos*, 29(1), 9-12. https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1134-928X2018000100009&lng=es&nrm=iso&tln=es

ArchDaily. (2016). Skyville / woha. ArchDaily Perú. <https://www.archdaily.com/800832/skyville-woha>

Barahona-Picado, M.-F. (2020). De la casa a la comunidad: Centro diurno para adulto mayor en Florencia de San Carlos [Proyecto de grado]. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Arquitectura y Urbanismo. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/12169>

Castro, F. (2018). Kampung admiralty / woha. ArchDaily Perú. <https://www.archdaily.pe/pe/905354/kampung-admiralty-woha>

Failoc Rojas, R. J., y Ojeda Carrasco, D. del J. (2022). Biofilia aplicada al diseño arquitectónico del Centro de

atención del adulto mayor en el distrito de Zorritos—Tumbes, 2022 [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/120343>

Fadda, G., y Cortés, A. (2019). Hábitat y adulto mayor: El caso de Valparaíso. *Revista INVI*, 24(66), 89-113. <https://doi.org/10.4067/S0718-83582009000200003>

Fakharany, N. (2023). Comienza la construcción de La Serre, el oasis urbano de MVRDV en las afueras de París (Trad. M. Arellano). ArchDaily Perú. <https://www.archdaily.pe/pe/1010087/comienza-la-construccion-de-la-serre-el-oasis-urbano-de-mvrdv-en-las-afueras-de-paris>

García-Valdez, M. T., Sánchez-González, D., y Román-Pérez, R. (2018). Envejecimiento y estrategias de adaptación a los entornos urbanos desde la gerontología ambiental. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 34(1), 101-128. <https://doi.org/10.24201/edu.v34i1.1810>

Gareca Apaza, M. L. (2022). Biofilia: La naturaleza como factor de tendencia en el diseño de una vivienda. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 20(26), 137-160. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-87872022000200137

Lee, E.-J., y Park, S.-J. (2022). Biophilic experience-based residential hybrid framework. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14), 8512. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148512>

Lorenzo Suruchaqui, K. C. (2020). Aplicación del diseño biofílico en los espacios de centros de atención para el adulto mayor en Villa El Salvador [Tesis de Pregrado]. Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/87968>

Mari, T., Hua, H., Gunasagaran, S., Veronica, N., Srirangam, S., y Kuppusamy, S. (2023). Biophilic design for elderly homes in malaysia for improved quality of life. *Journal of Engineering Science and Technology*, 18, 96-112. https://jestec.taylors.edu.my/Special%20Issue%20THINK%20SPACE%202022/STAAUH%202022_09.pdf

Medina Changa, M., Migliori Ochoa, L., y Soria Caballero, G. (2023). Arquitectura biofílica: Influencia de su aplicación en el diseño de un centro residencial para el adulto mayor. *Revista de Investigación Aporte Santiaguino Ingeniería e Innovación*, 16(2), 154-165. <https://doi.org/10.32911/as.2023.v16.n2.1058>

Moreno-Mata, F. A., y Sánchez-Moreno, D. M. (2018). Ciudades biofílicas, espacios verdes y calidad de vida en la zona metropolitana de San Luis Potosí, México. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, (24), 48-59. <https://www.redalyc.org/journal/4779/477957975007/html/>

Osorio Bayter, L., y Salinas Ramos, F. (2016). El contexto y el centro residencial para las personas adultas mayores en Colombia y España. La empresa social Una alternativa para el bienestar. *REVESCO. Revista de Estudios Cooperativos*, 121, 205-227. https://doi.org/10.5209/rev_REVE.2016.v121.51307

Pinilla Cárdenas, M. A., Ortiz Álvarez, M. A., y Suárez-Escudero, J. C. (2021). Adulto mayor: Envejecimiento, discapacidad, cuidado y centros día. Revisión de tema. *Salud Uninorte*, 37(2), 488-505. <https://doi.org/10.14482/sun.37.2.618.971>

Quispe Mendizabal, D. H. (2023). Arquitectura biofílica en el diseño de áreas recreativas del Centro de Atención Social y Recreación del Adulto Mayor. DCGAL -2023 [Tesis de pregrado]. Universidad Privada de Tacna. <http://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/3206>

Santos, S. (2016). Asilo de Witherford Watson Mann promueve la sociabilidad entre adultos mayores (Trad. J. T. Franco). ArchDaily Perú. <https://www.archdaily.pe/pe/780841/witherford-watson-manns-central-london-almshouse-promotes-sociability-for-the-elderly>

Trevisam, E., y Silva De Oliveira, S. C. (2024). Contributions of biophilia to sustainable development. *Veredas do Direito – Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável*, 21, e212408. <https://doi.org/10.18623/rvd.v21.2408>

Torrontegui Figueroa, A. (2020). Reconociendo la biofilia en el hábitat residencial: El diseño arquitectónico como determinante de la percepción de la naturaleza en lo urbano [Tesis Pregrado]. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180419>

Villalpando Flores, A. E., y Bustos Aguayo, J. M. (2023). La naturaleza urbana en las ciudades contemporáneas. La importancia del diseño biofílico en la salud pública. *Academia XXII*, 14(28), 8-29. <https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2023.14.28.87234>

Xiaoxue, S., y Huang, X. (2024). Promoting stress and anxiety recovery in older adults: Assessing the therapeutic influence of biophilic green walls and outdoor view. *Frontiers in Public Health*, 12, 1352611. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1352611>

Yue, M., Zhang, X., y Zhang, J. (2024). Biophilic experience in high-rise residential areas in china: Factor structure and validity of a scale. *Sustainability*, 16(7), 2866. <https://doi.org/10.3390/su16072866>

Zanatta, A. A., José Santos-Junior, R., Perini, C. C., y Fischer, M. L. (2019). Biofilia: Produção de vida ativa em cuidados paliativos. *Saúde em Debate*, 43(122), 949-965. <https://doi.org/10.1590/0103-1104201912223>

POTENCIAL DE UN SISTEMA DE BAJO COSTO PARA MEDIR LA CALIDAD AMBIENTAL INTERIOR EN CLIMAS EXTREMOS LATINOAMERICANOS HACIA LA EQUIDAD ENERGÉTICA

Recibido 07/08/2024
Aceptado 02/12/2024

POTENTIAL OF A LOW-COST SYSTEM FOR MEASURING INDOOR ENVIRONMENTAL QUALITY IN LATIN AMERICAN EXTREME CLIMATES TOWARDS ENERGY EQUITY

POTENCIAL DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA MEDIR A QUALIDADE AMBIENTAL INTERIOR EM CLIMAS EXTREMOS DA AMÉRICA LATINA VISANDO A EQUIDADE ENERGÉTICA

Claudia Eréndira Vázquez-Torres

Doctora en Arquitectura
Posdoctorante de la Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Modelado y Optimización de Procesos Energéticos y Ambientales
Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México
<https://orcid.org/0000-0002-5388-0780>
claudia.vazquez@correo.uady.mx (Autor de Correspondencia)

Renán Gabriel Quijano-Cetina

Doctor en Ingeniería
Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México
<https://orcid.org/0000-0001-9515-9249>
renan.quijano@correo.uady.mx

Israel Sánchez-Domínguez

Doctor en Ingeniería
Técnico Académico Titular B TC, Unidad Académica del IIMAS en Yucatán
Universidad Nacional Autónoma de México, Mérida, México
<https://orcid.org/0000-0002-7040-9552>
israel.sanchez@iimas.unam.mx

Bassam Ali

Doctor en Ingeniería
Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Modelado y Optimización de Procesos Energéticos y Ambientales
Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México
<https://orcid.org/0000-0001-7526-6952>
baali@correo.uady.mx



RESUMEN

La salud pública presenta retos multidisciplinares que implican una combinación entre el bienestar físico, mental y social. Dos limitaciones para cuantificar los contaminantes en interiores (gases, compuestos químicos y partículas en suspensión) son el elevado coste comercial y la complejidad de los sistemas de medición disponibles. En este escenario, se utilizó un enfoque experimental para desarrollar un sistema con sensores de bajo coste para medir variables que influyen en la salud humana y ambiental. Los procesos de calibración, validación y ajuste técnico se realizaron en una localidad de clima extremo en el sur de México, bajo estándares nacionales e internacionales. Los resultados principales mostraron la viabilidad del uso de herramientas de bajo coste para medir contaminantes en países en vías de desarrollo. El 57 % de los datos de H₂S mostraron un rendimiento superior a 150 ppm, lo que se considera perjudicial para la salud humana. Por otro lado, el proceso de desarrollo del sistema de medición en la localidad de estudio demostró la importancia de disponer de datos para medir los niveles de contaminación ambiental según los hábitos y costumbres de cada región. Los sensores y sistemas de acceso abierto se utilizaron para beneficiar directamente a investigadores con recursos limitados y a los sectores público y privado interesados en medir variables medioambientales y de confort para promover el acceso universal al conocimiento.

Palabras clave

sistema de medición ambiental, sensores de bajo costo, calidad ambiental interior, medición de contaminantes.

ABSTRACT

Public health has multidisciplinary challenges involving a combination of physical, mental, and social welfare. Two limitations to quantifying indoor pollutants (gases, chemical compounds, and suspended particles) are the high cost and the complexity of available measurement systems. Under this scenario, an experimental approach was used to develop a low-cost system to measure variables that affect human and environmental health. Calibration, validation, and technical adjustment processes were conducted in an extreme-climate location in southern Mexico, following domestic and international standards. The key results showed the feasibility of using low-cost tools to measure pollutants in developing countries. 57% of the data for H₂S had a result above 150 ppm, which is considered harmful to human health. On the other hand, developing the measurement system in the studied locality showed the importance of having data to measure environmental pollution levels according to each region's habits and customs. Sensors and open access systems were used as these can directly benefit resource-constrained researchers and the public and private sectors interested in measuring environmental and comfort variables to promote universal access to knowledge.

Keywords

environmental measurement system, low-cost sensors, indoor environmental quality, pollutant measurement.

RESUMO

A saúde pública apresenta desafios multidisciplinares que envolvem uma combinação de bem-estar físico, mental e social. Duas limitações para a quantificação de poluentes internos (gases, compostos químicos e partículas em suspensão) são o alto custo e a complexidade dos sistemas de medição disponíveis. Neste cenário, uma abordagem experimental foi utilizada para desenvolver um sistema de baixo custo para medir variáveis que afetam a saúde humana e ambiental. Os processos de calibração, validação e ajuste técnico foram realizados em um local de clima extremo no sul do México, seguindo padrões nacionais e internacionais. Os principais resultados mostraram a viabilidade do uso de ferramentas de baixo custo para medir poluentes em países em desenvolvimento. 57% dos dados relativos ao H₂S tiveram um resultado acima de 150 ppm, o que é considerado prejudicial à saúde humana. Por outro lado, o desenvolvimento do sistema de medição na localidade estudada mostrou a importância de contar com dados para medir os níveis de poluição ambiental de acordo com os hábitos e costumes de cada região. Foram utilizados sensores e sistemas de acesso aberto, pois podem beneficiar diretamente pesquisadores com recursos limitados e os setores público e privado interessados em medir variáveis ambientais e de conforto para promover o acesso universal ao conhecimento.

Palavras-chave:

sistema de medição ambiental, sensores de baixo custo, qualidade ambiental interna, medição de poluentes

INTRODUCCIÓN

En América Latina, las personas pasan cantidades considerables de tiempo en interiores, lo que hace que la calidad ambiental interior (IEQ, en inglés) sea vital para la salud y la productividad (Nilandita et al., 2019). Muchas de ellas experimentan una mala calidad del aire interior, lo que se asocia con diversos problemas de salud, como el síndrome del edificio enfermo y un rendimiento cognitivo reducido en entornos educativos. (Khalil & Kamoona, 2022), y se ha visto que los factores ambientales contribuyen a entre el 25% y el 33% de estos problemas de salud en todo el mundo (Instituto Nacional de Salud Pública, 2022). Además, se ha visto que la exposición al dióxido de azufre (SO_2) puede dañar las vías respiratorias de los asmáticos (Nurhisana & Hasyim, 2022). En este sentido, Mentese et al. (2020) identificaron una correlación entre contaminantes interiores y variables de confort con síntomas respiratorios, donde la persistencia de estos contaminantes interiores está influenciada por las condiciones climáticas y las características del edificio. (Enyoh et al., 2020). En consecuencia, las estrategias de mitigación dependen de los contaminantes específicos, los métodos de construcción y las políticas energéticas vigentes. La investigación ha resaltado la necesidad de tener sistemas de monitoreo efectivos, lo que indica que el aire interior a menudo puede estar más contaminado que el aire exterior, enfatizando la necesidad de soluciones sólidas para abordar estos riesgos (Kim & Sohanchyk, 2022).

El potencial de los sistemas de bajo costo (LCS, en inglés) para medir la IEQ en interiores en climas extremos en América Latina es un problema apremiante. A medida que la urbanización continúa aumentando en América Latina, la calidad del aire interior se ha convertido en una preocupación importante, con implicaciones para la salud pública y la eficiencia energética. La interacción entre la calidad del aire interior (IAQ, en inglés) y la eficiencia energética es compleja, y lograr una IAQ óptima a menudo entra en conflicto con las medidas de ahorro de energía. (Dabanlis et al., 2023). Esto es particularmente relevante en climas extremos donde las estrategias de ventilación deben equilibrarse cuidadosamente para evitar exacerbar los niveles de contaminación interior (Tran et al., 2020). Los principales contaminantes del medio ambiente se dividen en gases (CO , CO_2), compuestos químicos (CH_2O , NO_2), y material particulado (MP). Al reaccionar con óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles también pueden afectar la salud del edificio y de sus usuarios a corto y largo plazo (Jung et al., 2021). Mientras tanto, el SO_2 y los NO_x son responsables de la lluvia ácida y la contaminación del aire en las zonas urbanas. Por otro lado, NO_2 en combinación con el MP10 aumenta la morbilidad en pacientes con enfermedades crónicas cardíacas y de las vías respiratorias altas (Secretaría de Salud, 2019). Finalmente, está el dióxido de carbono (CO_2), un gas incoloro, inodoro e insípido de la combustión completa

del carbono y la respiración biológica (Administración de Seguridad y Salud Ocupacional [OSHA], 2015). En resumen, el potencial de un LCS para medir la IEQ en climas extremos en América Latina no es solo una cuestión de salud pública, sino también un paso crítico hacia el logro de la equidad energética.

Jung et al. (2021) descubrieron que el costo es una limitación para medir los contaminantes de interiores, especialmente en países en desarrollo con bajos recursos de investigación. Aunque se han desarrollado sistemas para medir el MP y las concentraciones de gases utilizando placas de desarrollo (Arduino, Raspberry Pi, etc.) (Kalia & Ansari, 2020), se ha demostrado que la exposición a la contaminación es mayor cuando están presentes factores como la pobreza y la segregación (Burbank et al., 2023). Las condiciones de salud tienen limitaciones adicionales, dada la falta de información sobre la presencia de contaminantes en el ambiente interior y exterior, el cambio climático y otros problemas. García et al. (2013) estudiaron los niveles de contaminación en Guadalajara, México, y encontraron concentraciones más altas de SO_2 después de la temporada de lluvias. Los diversos climas de México, que van desde áridos hasta tropicales, afectan significativamente la IEQ y la salud pública. Por ende, la implementación de sistemas de medición puede empoderar a las comunidades, especialmente en áreas de bajos ingresos, para mejorar proactivamente sus condiciones de vida, promoviendo así la equidad energética y la salud pública (Koengkan et al., 2020).

La situación económica en México refuerza la necesidad de soluciones de bajo costo, ya que muchos hogares enfrentan limitaciones financieras. Así, el desarrollo de sistemas asequibles promovería una adopción generalizada, permitiendo a las comunidades monitorear y mejorar su IEQ sin costos significativos (Nugroho et al., 2016). Esta perspectiva es crucial para la equidad energética, ya que los hogares de bajos ingresos a menudo soportan mayores gastos energéticos y peores condiciones de vida, lo que agrava los problemas de salud relacionados con una IEQ inadecuada. (Balza et al., 2024). El LCS también podría mejorar la comprensión de la conexión entre los factores ambientales interiores y los resultados de salud, ayudando a identificar fuentes de contaminación e informar las intervenciones de salud pública, beneficiando en última instancia a las poblaciones vulnerables (Ginebreda & Barceló, 2022). Sin embargo, en los países latinoamericanos, los autores no pudieron encontrar un LCS que integre la medición de gases, compuestos químicos, material particulado y variables de confort térmico en un mismo sistema. Por esta razón, es importante generar nuevas alternativas que cumplan con los requisitos nacionales.

El objetivo principal fue evaluar un sistema integral de monitoreo de bajo costo, utilizando tecnología actual, y validar su desempeño técnico en un proyecto de vivienda social en condiciones climáticas extremas en México,

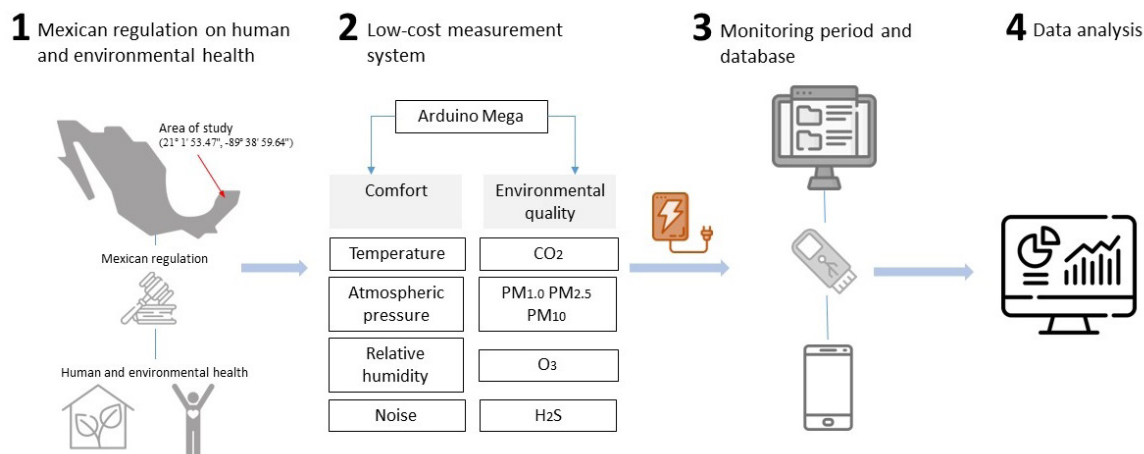


Figura 1. Desarrollo metodológico para el sistema de medición. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 1. Recomendaciones regulatorias para los principales contaminantes ambientales. Fuente: Elaboración de los autores.

Contaminante	Estándar mexicano	OMS (Organización Mundial de la Salud, 2021)	NAAQS / EPA (Agencia de Protección Ambiental, 2022)
CO	26 ppm (1 hora) (Secretaría de Salud, 2021b)	4 mg/m ³ 4 h)	35 ppm/h*
NO ₂	0,106 ppm (1 hora) (Secretaría de Salud, 2022a)	25 µg/m ³ (24 h)	0,05 ppm (1 año)
SO ₂	0,11 ppm (24 hora) (Secretaría de Salud, 2019)	40 µg/m ³ (24 h)	0,14 ppm (24 h)
MP	MP2,5 45 µg/m ³ (24 horas)	MP2,5 15 µg/m ³ (24 horas)	MP2,5 35 µg/m ³ (24 horas)
	MP10 75 µg/m ³ (24 horas) (Secretaría de Salud, 2022b)	MP10 45 µg/m ³ (24 horas)	MP10 150 µg/m ³ (24 horas)
O ₃	0,09 ppm (1 h) (Secretaría de Salud, 2021a)	60 µg/m ³ temporada alta	0,07 ppm (8 horas)
Pb	0,5 µg/m ³ (1 año) (Secretaría de Salud, 2021c)	-	0,15 µg/m ³ **

* No debe excederse esta concentración una vez al año

** promedio de 3 meses

como es el caso de Mérida, Yucatán, México. Este estudio servirá de guía para el control ambiental en estos espacios con pobreza energética y vulnerabilidad. Las mediciones obtenidas fueron evaluadas bajo los criterios de las normas mexicanas. En resumen, desarrollar un LCS para medir la IEQ en México es crucial no solo desde el punto de vista económico, sino también para la salud pública, la equidad energética y la sostenibilidad.

METODOLOGÍA

Se empleó un método experimental con las siguientes fases (Figura 1):

1. Revisión de las regulaciones vigentes de salud ambiental para edificios (nacionales e internacionales).
2. Colocación de sensores de bajo costo para las variables de IEQ en un recipiente con orificios de 2 pulgadas en todos los lados para permitir el flujo de aire.

3. Período de monitoreo y creación de una base de datos. La ubicación es un desarrollo urbano representativo del sur de México (Figura 1). El sistema de medición se colocó en el hall de entrada, punto clave para el intercambio de condiciones climáticas internas y externas. El período de monitoreo consideró el tiempo que le toma a todos los sensores tener una lectura válida. La frecuencia de muestreo fue de 20 minutos, y las mediciones se registraron del 22-09-2023 al 22-10-2023.
4. Análisis de los resultados.

REGULACIONES DE SALUD AMBIENTAL PARA EDIFICIOS

La Tabla 1 presenta estándares nacionales e internacionales que establecen límites y recomendaciones para contaminantes interiores. La Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2019 (Secretaría de Salud, 2019) sobre la salud ambiental establece un máximo de 0,075 ppm

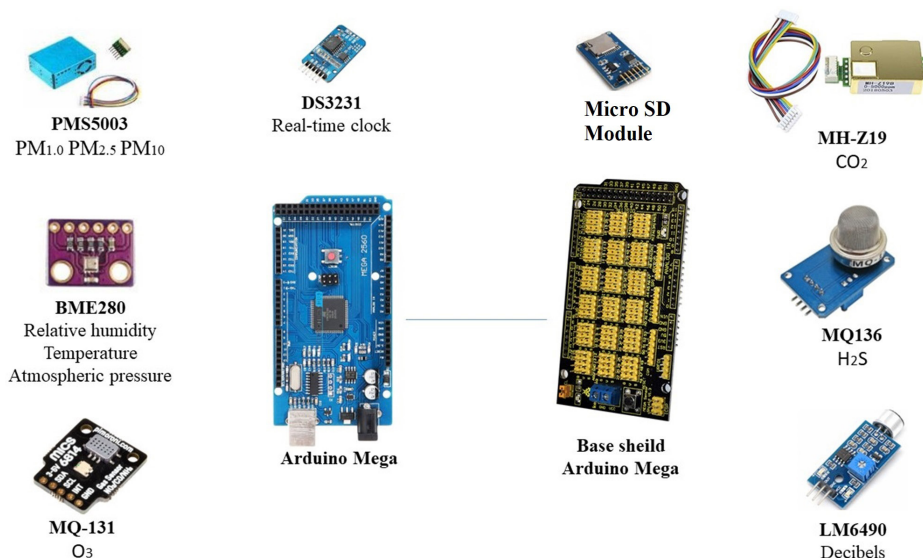


Figura 2. Diagrama de sensores utilizados en el LCS. Fuente: Elaboración de los autores.

por hora en un promedio aritmético de 3 años para SO_2 , o 0,04 ppm diarias como máximo durante tres años consecutivos. La Norma Oficial Mexicana (Secretaría de Salud, 2022b) establece valores permisibles para MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$. El O_3 puede causar una reducción considerable en los rendimientos de los cultivos agrícolas. (Secretaría de Salud, 2021a). Las Pautas de Calidad del Aire (Organización Mundial de la Salud, 2021) se basan en una evaluación global y regional de las enfermedades causadas por la contaminación del aire. Estos niveles no son obligatorios, pero se consideran una referencia para la IEQ. La Tabla 1 resume las recomendaciones de concentración de contaminantes de las normas mexicanas e internacionales.

Los niveles de CO_2 indican la calidad del aire porque un exceso de este compuesto químico puede convertirse en un gas asfixiante. ASHRAE (2024) sugiere que los niveles de CO_2 interior no deben superar las 1000 ppm (ASHRAE, 2024; Gangwar et al., 2024). Mientras tanto, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional establece un límite de 5000 ppm en 8 horas y 2 ppm cada 15 minutos para el formaldehído (OSHA, 2015). En México, se han establecido límites máximos de concentración para los siguientes contaminantes en el aire ambiente: ozono, monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, plomo, material particulado total y material particulado menor a de 10 y 2,5 micrómetros (Secretaría de Salud, 2021a).

DESARROLLO DE SISTEMAS DE BAJO COSTO

El desarrollo del prototipo consideró las etapas que se describen a continuación.

- Selección del sistema. La selección y adquisición se basan en análisis regionales personalizados y en la disponibilidad de mercado para medir variables de IEQ

como gases, componentes químicos, MP y niveles de ruido.

- Calibración.
- Ajustes y validación.
- Análisis de resultados.

La Figura 2 muestra los sensores y los componentes del sistema de medición. El LCS redujo el costo de los equipos de medición comerciales para registrar las mismas variables ambientales en aproximadamente un 85%, lo que resultó en un costo total de USD \$350.

CALIBRACIÓN

La calibración consistió en configurar el sistema de medición para una casa en el sur de México, coordenadas (21° 1' 53.47", -89° 38' 59.64"). La ubicación experimenta una temperatura media anual de 33,6 °C (Sistema Meteorológico Nacional, 2020). Tiene una humedad relativa anual típica del 73% y una irradiación solar anual promedio de 233,5 W/m² (Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos, 2023). Las características térmicas extremas de la localidad determinaron el interés por este sitio. Se utilizó equipo de monitoreo comercial con certificados de calibración para validar las mediciones de los sensores del LCS. En esta sección se presenta la calibración de la variable de humedad relativa como ejemplo. El procedimiento descrito fue muy similar y, en muchos casos, fue el mismo que se utilizó para todas las variables medidas por el LCS. Primero, el sensor BME280 de bajo costo, capaz de proporcionar mediciones de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica, se conectó a la placa de desarrollo Arduino Mega de código abierto y se configuró para tomar lecturas de humedad relativa cada 10 segundos. El promedio de estas lecturas se almacenó cada 5 minutos. La frecuencia de muestreo se seleccionó para coincidir con la configuración del sistema de adquisición de datos HOBO U12-012, utilizado

Tabla 2. LCS (BME280) e instrumento de referencia (HOBO U12-012). Fuente: Elaboración de los autores.

Sensor	Marca	Rango de medición	Precisión	Resolución
BME280	BOSCH	0 – 100 %	±3%	0,008 %
HOBO U12-012	Inicio	5 – 95 %	±2,5%	0,05 %

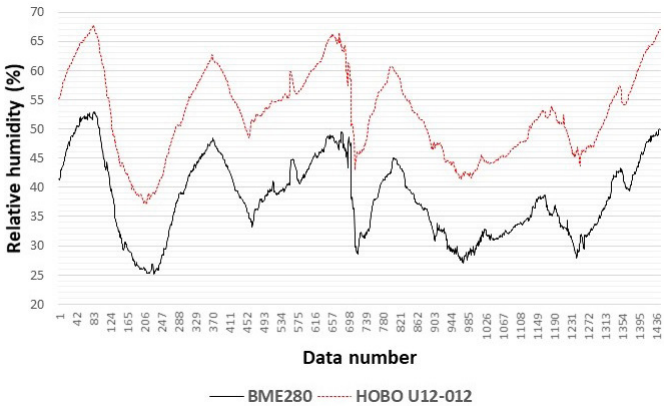


Figura 3. Mediciones de humedad relativa según el LCS y el instrumento de referencia. Fuente: Elaboración de los autores.

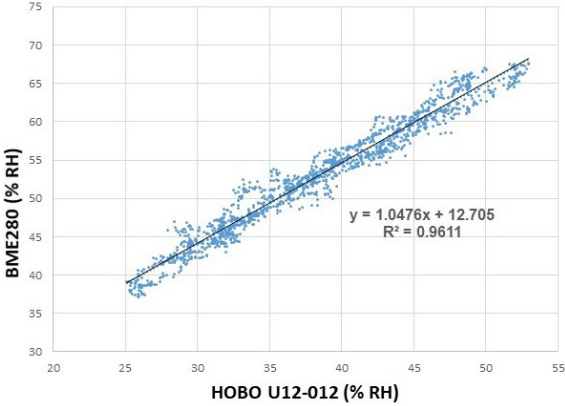


Figura 4. Gráfica de regresión lineal de mínimos cuadrados del LCS y la referencia. Fuente: Elaboración de los autores.

como instrumento de referencia para la calibración. Las principales características del LCS y del instrumento de referencia se muestran en la Tabla 2.

El proceso de calibración se realizó mediante el método de “Referencia calibrada” (Nicholas J. V. y White D. R., 2001). Este método consiste en comparar las mediciones del dispositivo que se está probando (DTU) con las mediciones de un instrumento calibrado, que debe estar certificado, y su calibración debe ser trazable a estándares nacionales e internacionales. Así, ambos instrumentos se colocan en una habitación en igualdad de condiciones y se dejan medir simultáneamente. Una vez finalizado el periodo de medición, que en este caso fue de algo más de cinco días, se recogieron los datos almacenados en la memoria de cada dispositivo y se analizaron en una hoja estadística. 1445 pares de datos muestreados se representaron en relación con el tiempo para ver si se adquirieron correctamente (consulte la Figura 3).

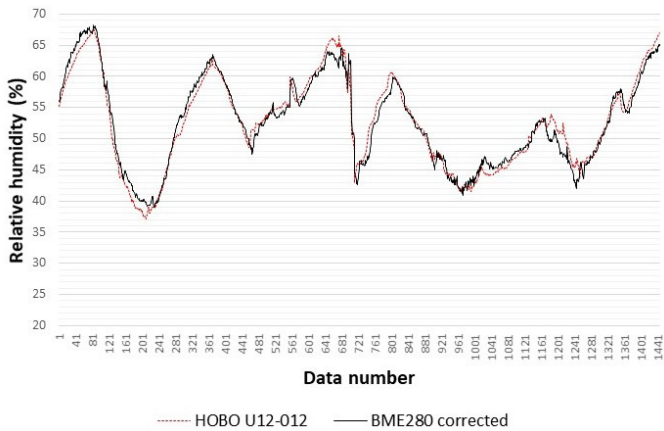


Figura 5. Comparación entre BME280 y HOBO U12-012. Fuente: Elaboración de los autores.

$$y = 1.0476x + 12.705$$

La Fig. 3 muestra que las mediciones de DTU están consistentemente por debajo de las de los instrumentos de referencia, lo que representa una compensación aproximada de -12,7 (% RH). Los datos se ajustaron en un gráfico de dispersión para regresión lineal de mínimos cuadrados. Se obtuvo una ecuación de ajuste utilizando esta regresión lineal que minimizó la sensibilidad (pendiente) y compensó los errores (ver Figura 4).

AJUSTES Y VALIDACIÓN

La ecuación de corrección se obtuvo a partir de la calibración descrita en la sección 2.3.:

Donde y es la humedad relativa (calibrada) en porcentaje y x es la medición de humedad relativa reportada por el sensor BME280. El último término de la ecuación (1) es la compensación de las mediciones del sensor de bajo costo. La ecuación (1) se aplicó a los datos del LCS BME280 para reducir el error relacionado con las mediciones del sensor comercial HOBO U12-012. Los datos corregidos, junto con los datos del sensor de referencia, se pueden ver en el gráfico de la Figura 5. A partir de este gráfico, las mediciones calibradas coinciden con el comportamiento y la magnitud del instrumento de referencia.

Al finalizar las pruebas funcionales, la calibración y la validación, se compartió el código de los sensores para promover el acceso universal al conocimiento y proporcionar retroalimentación continua para mejorar el sistema a través del siguiente enlace: <https://shorturl.at/Nzn1g>

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron 2232 resultados para cada variable medida entre el 22 de septiembre y el 22 de octubre, 2023. Las figuras 6 y 7 presentan los promedios horarios durante el período de monitoreo. Las líneas rojas punteadas representan el límite superior del modelo de confort (CM, en inglés) para la humedad relativa, la temperatura del aire y los límites reglamentarios para contaminantes (O_3 , material particulado, CO_2 , H_2S , y decibelios). La Figura 6a presenta el comportamiento de la temperatura con el CM adaptativo del estándar ASHRAE 55, que satisface al 80% de los usuarios (Quah, 2021). Durante el período de medición no hubo necesidades de calefacción, por lo que no fue necesario representar el límite inferior del CM. Esto fue similar para la humedad relativa, cuyo comportamiento se presenta en la Figura 6b con el límite superior del CM (entre 30% y 50%). El 85% del tiempo de monitoreo presentó necesidades de enfriamiento bajo un CM adaptativo para satisfacer al 80% de los usuarios, y el 74% de los datos se observaron por encima del CM para humedad relativa. La Figura 6c presenta los resultados para el nivel de ruido. La NOM-081-SEMARNAT-1994 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2024) establece límites de ruido de 55 dB.

La Figura 7a no muestra el límite reglamentario de la NOM-020-SSA1-2021 (Secretaría de Salud, 2021a) porque es de 0,09 ppm por hora, y no hubo valores superiores a este durante el período de monitoreo. La línea roja en la Figura 7b representa el límite de la OMS para $MP_{2.5}$. No hubo valores por encima de los límites recomendados por la normativa mexicana (45 y 75 micras para $MP_{2.5}$ y MP_{10} , respectivamente). Un 3,6% del $MP_{2.5}$ se observó por encima del límite reglamentario de la OMS. Es importante tener en cuenta que el $MP_{1.0}$ no tiene límite de exposición reglamentario. El límite reglamentario de 500 ppm para el CO_2 en la Figura 7c se estableció para espacios al aire libre, lo cual es representativo de este estudio porque no existen regulaciones para calificar los espacios interiores. (ASHRAE, 2024).

La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional [OSHA] (2024) afirma que 100 ppm H_2S durante más de 1 hora podría generar irritación; entre 100 ppm y 150 ppm produciría el riesgo de fatiga o parálisis olfativa y aumentaría el riesgo al aumentar las horas de exposición a este gas. En el período de monitoreo, valores superiores a 150 ppm podrían poner en riesgo la salud humana (Figura 7d). El caso de estudio permitió diseñar un sistema de monitoreo que redujo en un

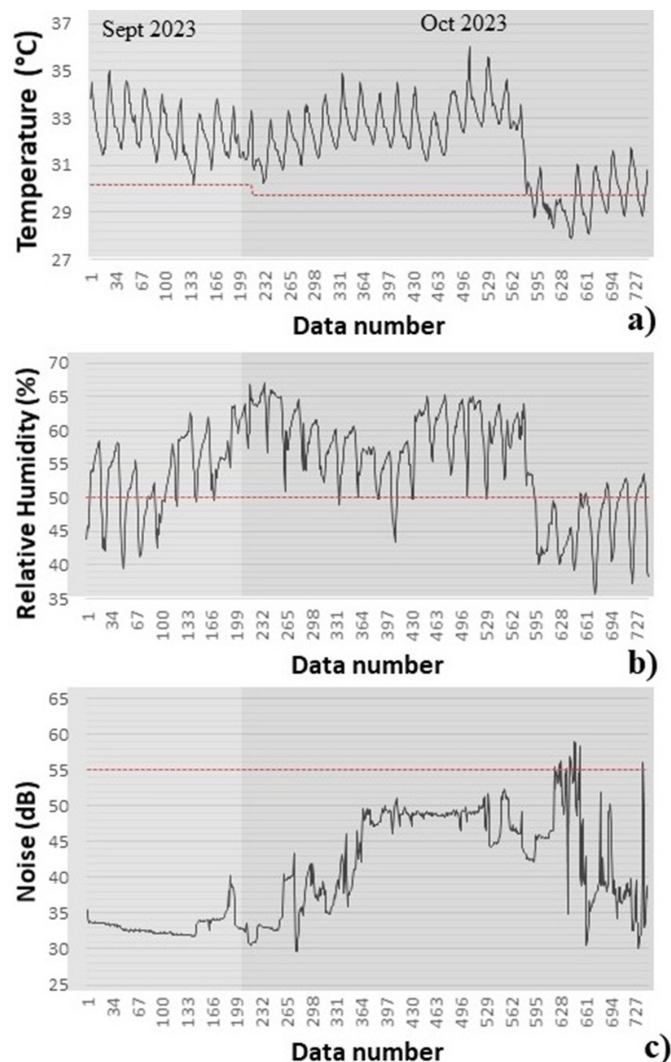


Figura 6. Resultados del período de monitoreo de variables de confort. Fuente: Elaboración de los autores.

85% el costo de los sensores comerciales para medir variables de calidad ambiental y confort. Afroz et al. (2023) enfatizaron la importancia de calibrar y validar sensores de bajo costo. Los autores documentaron la posible influencia de la humedad relativa en los sensores que miden $MP_{2.5}$ cuando la HR está por encima del 75% debido al exceso de agua ambiental. Por otro lado, Cowell et al. (2022) monitorearon material particulado, temperatura y humedad relativa en un entorno residencial utilizando sensores por menos de USD \$126. Estos autores coincidieron en la influencia que podría tener el exceso de humedad en la precisión de los sensores. Mientras tanto, Frederickson et al. (2023) midieron el NO_2 , O_3 , y $MP_{2.5}$ y utilizaron un modelo de regresión lineal para calibrar sensores de bajo costo. En este estudio, la HR estaba por debajo de los límites detectados como dañinos para el LCS. Tang y Pfrang (2023) usaron un método de regresión lineal como método de calibración para sensores de

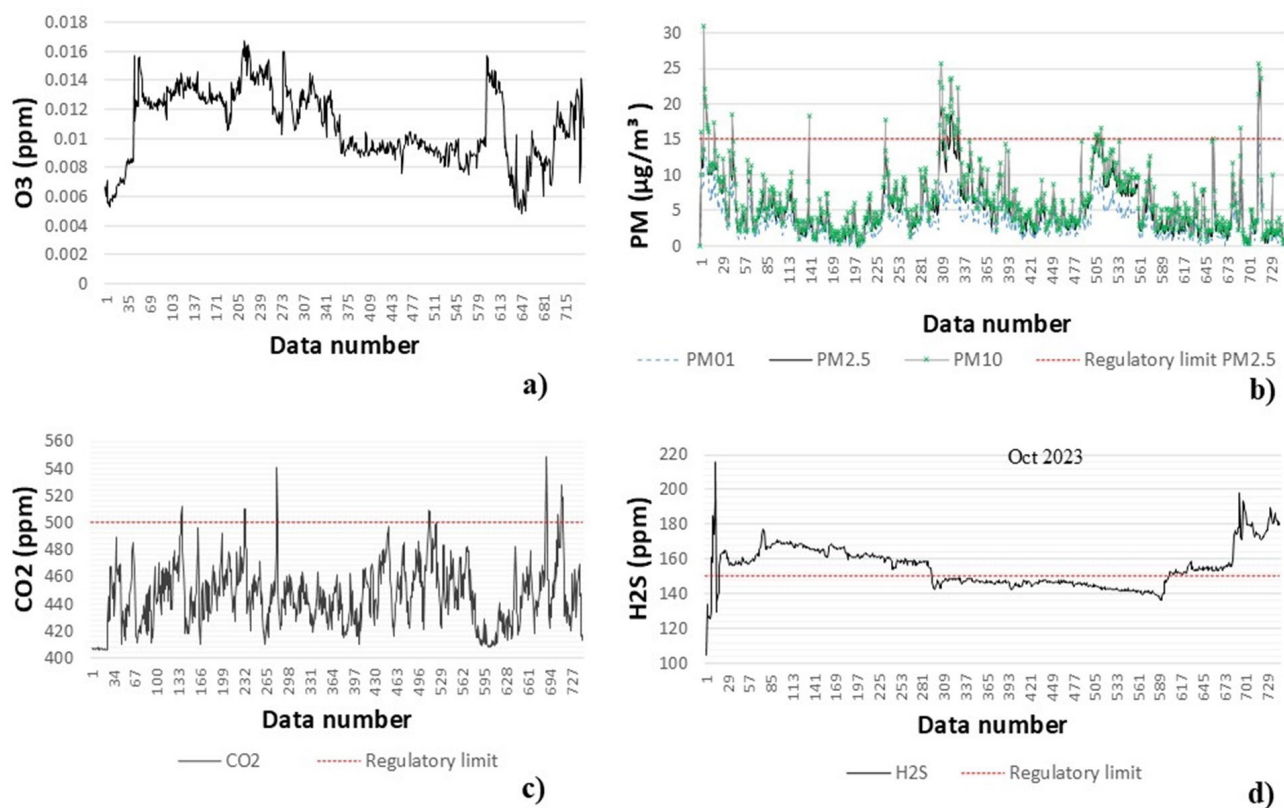


Figura 7. Resultados del periodo de monitoreo de variables IEQ (contaminantes). Fuente: Elaboración de los autores.

bajo costo para medir material particulado suspendido, con una precisión general del 70,7%. Estos autores, en este caso, recomendaron calibraciones periódicas y comparar el LCS con instrumentos de alta precisión siempre que fuera posible, criterios que coincidían con las características de este estudio.

Ortiz et al. (2022) diseñaron un sistema experimental para medir la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire de México. Compararon sus datos con los datos numéricos y encontraron una diferencia máxima de casi medio grado Celsius. Estos hallazgos muestran el interés en generar instrumentación adecuada para abordar el cambio climático en América Latina. Aunque el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire de México genera información en tiempo real a través de estaciones de monitoreo continuo (Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales, 2024), hay localidades en el sur con una sola estación y lagunas en la información de los últimos años. Los resultados representan un desafío a largo plazo para corroborar el funcionamiento óptimo de los sensores en su desempeño y como sistema integral. Con este fin, se debe llevar a cabo periódicamente un proceso de calibración para detectar posibles errores con prontitud.

Como área de oportunidad, extender el período de monitoreo a un año y comparar los resultados con las

bases de datos de las estaciones de monitoreo como referencia es necesario para garantizar el funcionamiento óptimo del LCS. En la siguiente etapa, se propone que los LCS se ubiquen en otros sectores y ubicaciones geográficas para ampliar el rango de influencia y la base de datos disponible. Además, el rendimiento del LCS está limitado por la precisión del instrumento de referencia utilizado durante la calibración. Finalmente, los datos históricos medidos con instrumentación confiable representan una mayor certeza sobre la presencia de contaminantes en el sector residencial en México. Los resultados ponen en perspectiva dos posibles rutas para localidades en América Latina. La primera está dirigida a los grupos de interés, quienes podrían generar estrategias efectivas para mejorar la calidad de vida de los usuarios ante el cambio climático repentino. La segunda se refiere a la educación ambiental necesaria en los países latinoamericanos, con eventos de difusión y extensión respaldados por datos precisos para informar a la población y generar conciencia hacia la adaptación informada al cambio climático.

CONCLUSIONES

Este estudio desarrolló un LCS para medir variables de calidad ambiental en edificios y validar y calibrar los

sensores en un sitio en el sur de México. Los resultados demostraron un ahorro del 85% en comparación con los sistemas de medición comerciales estándar, lo que permitió el acceso universal a la instrumentación y, en consecuencia, al conocimiento sobre la reducción de la contaminación interior de los hogares.

La implementación del LCS propuesto puede ser particularmente beneficiosa para países en vías de desarrollo como México. Las mediciones realizadas durante un mes revelaron que las características térmicas de la localidad de estudio se alinean con las de un clima extremo, destacando la necesidad de enfriamiento, incluso en un mes que no es el más cálido. Esto resalta la importancia de monitorear periódicamente los espacios residenciales para garantizar el cumplimiento de las regulaciones mexicanas, que aún requieren actualizaciones para abordar los contaminantes que carecen de límites regulatorios específicos y representan un riesgo para la salud pública.

Los resultados del mes de medición, entre septiembre y octubre de 2023, indicaron que se superaron los límites reglamentarios para varios contaminantes, lo que refuerza la necesidad de un monitoreo continuo. El LCS desarrollado en este estudio se presenta como una herramienta potencial para abordar los desafíos del cambio climático con un enfoque en la equidad social, al proporcionar datos que pueden guiar estrategias para reducir las emisiones de fuentes contaminantes dentro de los hogares. Este enfoque no solo contribuye a mejorar la IEQ, sino que también promueve la equidad energética en México, asegurando que todas las comunidades tengan acceso a los recursos necesarios para un entorno de vida más saludable. Sin embargo, la precisión del LCS desarrollado puede mejorarse si se dispone de un instrumento de referencia calibrado con un mayor nivel de precisión.

CONTRIBUCIONES DEL AUTOR – CREDIT

Conceptualización, R.G.Q.C., C.E.V.T.; Curación de datos, R.G.Q.C., C.E.V.T.; Análisis Formal, R.G.Q.C., C.E.V.T.; Adquisición de fondos, no aplicable; Investigación, C.E.V.T.; Metodología, C.E.V.T., R.G.Q.C.; Gestión de proyectos, I.S.D., A.B.; Recursos, R.G.Q.C., C.E.V.T., I.S.D., A.B.; Software, R.G.Q.C.; Supervisión, I.S.D., A.B.; Validación, RGQC; Visualización, R.G.Q.C., C.E.V.T.; Redacción-borrador original, C.E.V.T.; Redacción-revisión y edición, R.G.Q.C.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece con gratitud a CONAHCYT por una beca postdoctoral a CVU 181807.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afroz, R., Guo, X., Cheng, C. W., Delorme, A., Duruisseau-Kuntz, R. y Zhao, R. (2023). Investigation of indoor air quality in university residences using low-cost sensors. *Environmental Science: Atmospheres*, 3(2), 347–362. <https://doi.org/10.1039/d2ea00149g>
- ASHRAE. (6 de marzo, 2024). *Indoor Air Quality Guide*. Indoor Air Quality Guide. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/indoor-air-quality-guide>
- Balza, L., Castro Vargas, S., Gómez Parra, N., Jimenez Mori, R. A., Manzano, O., y Serebrisky, T. (2024). *Does Income Growth in Latin America and the Caribbean Drive Disproportionate Energy Consumption?* IDB <https://doi.org/10.18235/0012883>
- Burbank, A. J., Hernandez, M. L., Jefferson, A., Perry, T. T., Phipatanakul, W., Poole, J., y Matsui, E. C. (2023). Environmental justice and allergic disease: A Work Group Report of the AAAAI Environmental Exposure and Respiratory Health Committee and the Diversity, Equity and Inclusion Committee. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 151(3), 656–670. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2022.11.025>
- Cowell, N., Chapman, L., Bloss, W., Srivastava, D., Bartington, S., y Singh, A. (2022). Particulate matter in a lockdown home: evaluation, calibration, results and health risk from an IoT enabled low-cost sensor network for residential air quality monitoring. *Environmental Science: Atmospheres*, 3(1), 65–84. <https://doi.org/10.1039/d2ea00124a>
- Dabanlis, G., Loupa, G., Tsalidis, G. A., Kostenidou, E., y Rapsomanikis, S. (2023). The Interplay between Air Quality and Energy Efficiency in Museums, a Review. *Applied Sciences*, 13(9), 5535. <https://doi.org/10.3390/app13095535>
- Environmental Protection Agency. (2022). *Criteria Air Pollutants*. Tabla NAAQS. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
- Enyoh, C. E., Verla, A. W., Qingyue, W., Ohiagu, F. O., Chowdhury, A. H., Enyoh, E. C., Chowdhury, T., Verla, E. N., y Chinwendu, U. P. (2020). An overview of emerging pollutants in air: Method of analysis and potential public health concern from human environmental exposure. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 28, e00107. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2020.e00107>
- Frederickson, L. B., Russell, H. S., Fessa, D., Khan, J., Schmidt, J. A., Johnson, M. S., y Hertel, O. (2023). Hyperlocal air pollution in an urban environment - measured with low-cost sensors. *Urban Climate*, 52, 101684. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101684>
- García, M., Ramírez, H., Ulloa, H., García, O., Meulenert, A., y Alcalá, J. (2013). Concentración de contaminantes SO₂, NO₂ y correlación con H₂SO₄ y NO₃ durante la temporada de lluvias en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 29(2), 81–88.
- Gangwar, M., Jamal, Y., Usmani, M., Wu, C.-Y., y Jutla, A. S. (2024). Carbon dioxide as an indicator of bioaerosol activity and human health in K-12 school systems: a scoping review of current knowledge. *Environmental Research: Health*, 2(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/2752-5309/ad1c41>
- Ginebreda, A., y Barceló, D. (2022). Data-based interpretation of emerging contaminants occurrence in rivers using a simple advection-reaction model. *Water Emerging Contaminants & Nanoplastics*, 1(3), 12. <https://doi.org/10.20517/wecn.2022.07>
- Jung, C. R., Nishihama, Y., Nakayama, S. F., Tamura, K., Isobe, T., Michikawa, T., Iwai-Shimada, M., Kobayashi, Y., Sekiyama, M., Taniguchi, Y., y Yamazaki, S. (2021). Indoor air quality of 5,000 households and its determinants. Part B: Volatile organic compounds and inorganic gaseous pollutants in the Japan Environment and Children's study. *Environmental Research*, 197, 111135. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111135>

- Kalia, P., y Ansari, M. A. (2020). IOT based air quality and particulate matter concentration monitoring system. *Materials Today: Proceedings*, 32(3), 468–475. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.179>
- Khalil, N. A., y Kamoona, G. M. I. (2022). The Effect of Indoor Air Quality in University Classrooms on the Immunity of Its Occupants. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 17(8), 2453–2461. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.170813>
- Kim, S., y Sohanchyk, G. (2022). Exploring Children's Engagement in Monitoring Indoor Air Quality: Longitudinal Study. *JMIR Formative Research*, 6(1), e32404. <https://doi.org/10.2196/32404>
- Koengkan, M., Poveda, Y. E., y Fuinhas, J. A. (2020). Globalisation as a motor of renewable energy development in Latin America countries. *GeoJournal*, 85(6), 1591–1602. <https://doi.org/10.1007/s10708-019-10042-0>
- Mentese, S., Mirici, N. A., Elbir, T., Palaz, E., Mumcuoğlu, D. T., Cotuker, O., Bakar, C., Oymak, S., y Otkun, M. T. (2020). A long-term multi-parametric monitoring study: Indoor air quality (IAQ) and the sources of the pollutants, prevalence of sick building syndrome (SBS) symptoms, and respiratory health indicators. *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2270–2281. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.07.016>
- Ministry of Environment and Natural Resources. (4 de abril, 2024). *National Air Quality Information System*. Monitoring Network SDS01. <https://sinaica.inecc.gob.mx/>
- National Institute of Public Health. (2022). *Environment and Health*. <https://www.insp.mx/>
- Nicholas J. V., y White D. R. (2001). Calibration. En *Traceable Temperatures* (pp. 159–201). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/0470846151.ch5>
- Nilandita, W., Munfarida, I., Ratodi, M., Ratri Nurmaningsih, D., y Suprayogi, D. (2019). The Indoor Air Quality in Laboratory Buildings. A Case Study in Integrated Laboratory of UIN Sunan Ampel Surabaya. *KnE Social Sciences*. 3(21), 873-882. <https://doi.org/10.18502/kss.v3i21.5018>
- Nugroho, A. P., Okayasu, T., Horimoto, M., Arita, D., Hoshi, T., Kurosaki, H., Yasuba, K., Inoue, E., Hirai, Y., Mitsuoka, M., y Sutiarsio, L. (2016). Development of a Field Environmental Monitoring Node with Over the Air Update Function. *Agricultural Information Research*, 25(3), 86–95. <https://doi.org/10.3173/air.25.86>
- Nurhisanah, S., y Hasyim, H. (2022). Environmental health risk assessment of sulfur dioxide (SO₂) at workers around in combined cycle power plant (CCPP). *Heliyon*, 8(5), e09388. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09388>
- Occupational Safety and Health Administration. (6 de marzo, 2024). *Hydrogen Sulfide*. OSHA. <https://www.osha.gov/hydrogen-sulfide>
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2015). *Indoor air quality in commercial and institutional buildings*. 1–32. <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/3430indoor-air-quality-sm.pdf>
- Ortiz Salvador, E. G., Ricoy Zárate, E. G., Carreto Hernández, L. G., Sotelo Rodríguez, P., Moya Acosta, S. L., y Campos Amezcua, R. (2022). *Numerical and Experimental Study of Cross Ventilation in a Room of a House in the State of Morelos, EasyChair Preprint*, 9209. <https://easychair.org/publications/preprint/slwnP>
- Quah, S. (Ed). (2021). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *International Encyclopedia of Public Health* (Segunda edición, Vol. 2, Número 1, pp. 56-57). [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(79\)90114-2](https://doi.org/10.1016/0140-7007(79)90114-2)
- Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos. (2023). *Observatorio Atmosférico Mérida*. <https://www.ruoa.unam.mx/index.php?page=estaciones&id=8>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (7 de marzo, 2024). *NOM-081-SEMARNAT-1994*. Límites Máximos Permisibles de Emisión de Ruido de Las Fuentes Fijas y Su Método de Medición. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD02/081.pdf>
- Secretaría de Salud. (2019). *NOM-022-SSA1-2019 Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5568395&fecha=20/08/2019#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud. (2021a). *NOM-020-SSA1-2021 Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al ozono*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633956&fecha=28/10/2021#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud. (2021b). *NOM-021-SSA1-2021 Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al monóxido de carbono*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634084&fecha=29/10/2021#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud. (2021c). *NOM-026-SSA1-2021 Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al plomo*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634085&fecha=29/10/2021#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud. (2022a). *NOM-023-SSA1-2021 Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de nitrógeno*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633854&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0
- Secretaría de Salud. (2022b). *NOM-025-SSA1-2014 Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014#gsc.tab=0
- Sistema Meteorológico Nacional. (2020). *Climatic conditions*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>
- Tang, R., y Pfrang, C. (2023). Indoor particulate matter (PM) from cooking in UK students' studio flats and associated intervention strategies: evaluation of cooking methods, PM concentrations and personal exposures using low-cost sensors. *Environmental Science: Atmospheres*, 3(3), 537–551. <https://doi.org/10.1039/d2ea00171c>
- Tran, V. Van, Park, D., y Lee, Y.-C. (2020). Indoor Air Pollution, Related Human Diseases, and Recent Trends in the Control and Improvement of Indoor Air Quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2927. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082927>
- Organización Mundial de la Salud. (2021). *Global Air Quality Guidelines 2021*. 1–16. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1>

EVALUACIÓN DE BARRILES DE LLUVIA Y TECHOS VERDES PARA MITIGAR INUNDACIONES EN CLIMA CÁLIDO SUBHÚMEDO, ESTADO DE COLIMA, MÉXICO

EVALUATION OF RAIN BARRELS AND GREEN ROOFS FOR FLOOD MITIGATION IN A WARM SUB-HUMID CLIMATE - STATE OF COLIMA, MEXICO

AVALIAÇÃO DE BARRIS DE CHUVA E TELHADOS VERDES PARA MITIGAÇÃO DE ENCHENTES EM CLIMA QUENTE SUBÚMIDO, ESTADO DE COLIMA, MÉXICO

Samir Josué Figueroa-Avalos

Ingeniero Civil
 Estudiante de Maestría en Arquitectura Sostenible y Gestión Urbana (MASGU)
 Tecnológico Nacional de México, Villa de Álvarez, México
<https://orcid.org/0000-0001-9023-0050>
g2246004@colima.tecnm.mx (Autor de Correspondencia)

Dora Angélica Correa-Fuentes

Doctora en Arquitectura
 Profesora investigadora del cuerpo académico consolidado Ciudad Sostenible de la Maestría en Arquitectura Sostenible y Gestión Urbana
 Tecnológico Nacional de México, Villa de Álvarez, México
<https://orcid.org/0000-0002-1804-5480>
dora.correa@colima.tecnm.mx

Jesús López-de-la-Cruz

Doctor en Ingeniería del Agua y Medio Ambiente
 Profesor Investigador y Director de la Facultad de Ingeniería Civil
 Universidad de Colima, Coquimatlán, México
<https://orcid.org/0000-0001-8230-6414>
jlopez71@ucol.mx

Jorge Armando Gutiérrez-Valencia

Doctor en Educación
 Coordinador de la Maestría en Arquitectura Sostenible y Gestión Urbana
 Tecnológico Nacional de México, Villa de Álvarez, México
<https://orcid.org/0009-0005-5394-064X>
jorge.gutierrez@colima.tecnm.mx

Ignacio Barajas-Ávalos

Magíster en Arquitectura Profesor,
 Departamento de Ciencias de la Tierra
 Tecnológico Nacional de México, Villa de Álvarez, México
<https://orcid.org/0000-0003-4834-370X>
ignaciobarajas@colima.tecnm.mx



RESUMEN

Las inundaciones en las áreas urbanas se presentan con mayor frecuencia producto del intensivo cambio de uso de suelo y los efectos del cambio climático. Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) buscan replicar el ciclo hidrológico local y con ello, reducir las inundaciones. Se evaluaron dos tipologías: los Barriles de Lluvia (BLL) y los Techos Verdes (TV). El objetivo fue determinar qué técnica alcanza mayor eficiencia en la reducción de volúmenes de escorrentía en la ciudad de Villa de Álvarez, Colima, México. La simulación se realizó, a través del software Storm Water Management Model (SMWW), y los resultados indicaron que los BLL y TV lograron reducir el volumen de la escorrentía un 14.36% y 26.40% respectivamente, bajo la condición más crítica.

Palabras clave

inundaciones, sustentabilidad, cambio climático, hidrología

ABSTRACT

Flooding in urban areas is becoming ever more frequent due to intensive land-use change and the effects of climate change. Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) aim to replicate the local hydrological cycle and, thereby, reduce flooding. Two typologies were evaluated: Rain Barrels (RB) and Green Roofs (GR). The objective is to determine which technique is more efficient in reducing runoff volumes in the city of Villa de Álvarez, Colima, Mexico. The simulation was carried out using the Storm Water Management Model (SWMM) software, and the results indicate that RB and GR reduced runoff volume by 14.36% and 26.40% respectively, under the most critical conditions.

Keywords

floods, sustainability, climate change, hydrology.

RESUMO

As enchentes em áreas urbanas estão ocorrendo com mais frequência como resultado da intensa mudança no uso da terra e dos efeitos das mudanças climáticas. Os Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS) têm como objetivo replicar o ciclo hidrológico local e, assim, reduzir as inundações. Duas tipologias foram avaliadas: barris de chuva (BLL) e telhados verdes (TV). O objetivo foi determinar qual técnica alcança maior eficiência na redução dos volumes de escoamento na cidade de Villa de Álvarez, Colima, México. A simulação foi realizada usando o software Storm Water Management Model (SMWW), e os resultados indicaram que o BLL e o TV foram capazes de reduzir o volume de escoamento em 14,36% e 26,40%, respectivamente, sob a condição mais crítica.

Palavras-chave:

enchentes, sustentabilidade, mudanças climáticas, hidrologia.

INTRODUCCIÓN

Los cambios en el uso del suelo, resultado de la urbanización, representan un proceso antropogénico relevante en las inundaciones; los componentes urbanos como edificios, azoteas, calles y estacionamientos reducen la permeabilidad del suelo (Zúñiga-Estrada et al., 2022); las superficies impermeables en áreas urbanas alteran significativamente el ciclo hidrológico local, por ende, se reduce la infiltración del agua de lluvia y se aumenta el volumen y la velocidad de las escorrentías (Lizárraga-Mendiola et al., 2017); estos factores sobrecargan los sistemas de drenaje, lo que incrementa el riesgo de inundaciones; aunado a lo anterior, como parte de los efectos del cambio climático se espera que los eventos de lluvia sean más frecuentes e intensos (Zuniga-Teran et al., 2020).

Recientemente se impulsó la infraestructura verde, que consiste en implementar soluciones basadas en la naturaleza para obtener beneficios ecosistémicos, especialmente en la regulación hídrica; estas prácticas se conocen como sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en Reino Unido, desarrollos de bajo impacto (LID) o mejores prácticas de gestión (BMP's) en Norteamérica y técnicas alternativas (AT's) en Francia (Fletcher et al., 2015).

Estas prácticas buscan mitigar los picos máximos de escorrentía generados por la impermeabilización del suelo debida a la urbanización, que imita la hidrología natural preexistente. Algunas de estas prácticas son los techos verdes, pozos de infiltración, pavimentos permeables, humedales, cunetas verdes y barriles de lluvia (Liu et al., 2015); estas soluciones promueven la evapotranspiración, la infiltración, la recarga de acuíferos y mejora calidad de las escorrentías, a través de la eliminación de contaminantes (Lizárraga-Mendiola et al., 2017).

Existen numerosas investigaciones sobre el comportamiento de las escorrentías urbanas al implementar diversas técnicas. Guo et al. (2019), desarrollaron un modelo LID en Tsingtao, una de las ciudades esponja piloto en China, donde se implementaron los barriles de lluvia, techos verdes, jardines de lluvia y pavimentos permeables, lográndose reducir la escorrentía entre un 20.7% y un 63.2%. Andrés-Doménech et al. (2018) analizaron el comportamiento hidrológico de techos verdes en Valencia, España; y demostraron su eficacia incluso en climas mediterráneos, donde el coeficiente de escurrimiento se redujo por debajo del 75%; por otro lado, Chapman y Hall (2021), analizaron el comportamiento de la escorrentía en diferentes escenarios en que aplicaron celdas de biorretención, techos verdes y pavimentos permeables, destacándose que la superficie disponible para SUDS efectivos disminuye al aumentar la densidad de viviendas, lo que obliga a adaptar la infraestructura verde, con priorización de techos verdes en viviendas.

La evaluación de estas soluciones requiere simular sus efectos en un modelo hidrológico, un proceso bastante complejo debido a las múltiples variables involucradas. El programa Storm Water Managment Model (SWMM), desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), permite modelar el comportamiento hidrodinámico de las aguas pluviales (Mendoza González et al., 2017); SWMM integra un editor LID que permite modelar tecnologías sustentables, además de estimar la respuesta de la cuenca en términos de volumen de escorrentía, calidad del agua, infiltración, evaporación y carga de contaminantes (Zúñiga-Estrada et al., 2022).

Este estudio destaca a la ciudad de Villa de Álvarez, ubicada en el occidente de México, como un ejemplo de una zona urbana que ha sufrido inundaciones recurrentes durante la temporada de lluvias, entre los meses de junio a octubre. El objetivo de esta investigación es evaluar dos tipologías de los SUDS que comúnmente se aplican en las viviendas, los barriles de lluvia (BLL) y los techos verdes (TV); se utiliza SWMM para simular y comparar el comportamiento hidrológico de ambos modelos y determinar la técnica que ofrece mejores resultados; esta evaluación se basa en variables como el volumen de escorrentía, la escorrentía pico y el coeficiente de escorrentía, para diferentes intensidades de precipitación.

METODOLOGÍA

LOCALIZACIÓN Y CLIMA

Villa de Álvarez, se sitúa en el estado de Colima, México; con una población de 149,723 habitantes, se posiciona como la tercera ciudad más poblada del estado (Figura 1); en consecuencia, la ciudad ha experimentado un crecimiento poblacional notable, superior al promedio nacional, que lo ha llevado a un desarrollo urbano disperso y ha evidenciado la falta de infraestructura adecuada (Ramírez-Rivera et al., 2021).

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la ciudad posee un clima cálido subhúmedo, una temperatura media anual de 25°C y una precipitación media anual estimada en los 900 mm, las lluvias predominan en verano, entre junio y octubre (INEGI, 2016). Villa de Álvarez ha experimentado un aumento en la frecuencia de inundaciones en las últimas dos décadas, principalmente por tormentas tropicales asociadas a huracanes y sistemas convectivos de mesoescala (SCM); ejemplos de estos eventos son los huracanes Jova (2011), Manuel (2013) y Patricia (2015), los que registraron precipitaciones acumuladas de 200 mm en 24 horas; también se presentan inundaciones debido a lluvias intensas de corta duración (Pérez-González et al., 2017), producto de SCM, que resultan complicados de dar seguimiento.

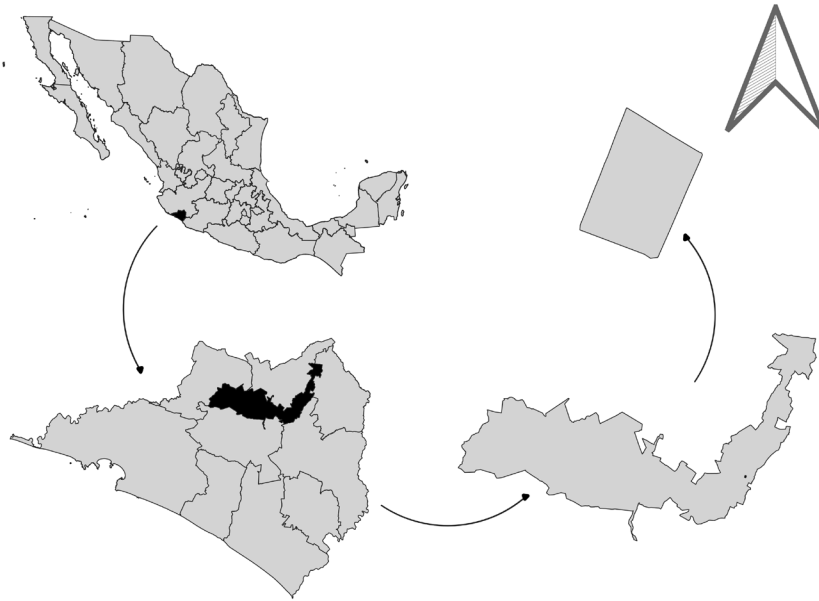


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 2. Delimitación de subcuencas. Elaboración de los autores.

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El crecimiento urbano en Villa de Álvarez se ha extendido hacia el norte, lo que incrementó las superficies impermeables y, como resultado, eventos recurrentes de inundación en las zonas bajas. Las soluciones convencionales basadas en la ampliación del drenaje pluvial no han logrado mitigar el problema; resulta evidente cambiar la perspectiva en el manejo del agua pluvial, en que se adopte infraestructura verde que

armonice el desarrollo urbano con el ciclo hidrológico natural.

La selección de la zona de estudio se basó en la necesidad de implementar técnicas SUDS aguas arriba para gestionar eficientemente el agua en zonas bajas, teniendo en consideración, el área promedio de azoteas y la futura vulnerabilidad a inundaciones.

En la investigación se utilizó QGIS, con datos vectoriales del Marco Geoestadístico Nacional de México (INEGI,

Tabla 1. Requisitos mínimos para la construcción del modelo. Fuente: Ponce de León García (2022).

Parámetros	Definición	Unidades
Área de la cuenca	Superficie total de cada subcuenca	Hectáreas
Longitud de la cuenca	Distancia total de la cuenca	Metros
Ancho de la cuenca	Relación entre el área y la longitud	Metros
Pendiente de la cuenca	Relación porcentual entre las elevaciones y la distancia	Porcentual
%-Imperv	Porcentaje del área impermeable	Porcentual
N-Imperv	Valor de Manning para la fracción impermeable	Adimensional
N-Perv	Valor de Manning para la fracción permeable	Adimensional
Número de curva	Modelo de infiltración del Soil Conservation Service (SCS)	Adimensional

Tabla 2. Características generales de la zona de estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

Subcuenca	Área	Longitud	Ancho	Pendiente	%-Imperv	N-Imperv	N-Perv
1	0.13	140.61	9.25	2.29	68.01	0.014	0
2	0.85	161.72	52.56	2.14	53.99	0.014	0.06
3	0.82	158.73	51.66	2.69	63.11	0.014	0
4	0.78	157.50	49.52	2.16	63.58	0.014	0
5	0.77	156.09	49.33	2.53	63.53	0.014	0
6	0.44	152.89	28.78	1.83	64.46	0.014	0

2023); el área de estudio de 3.80 hectáreas se caracteriza por un uso de suelo predominantemente residencial, que ocupa el 74.15%, lo que refleja una alta densidad de vivienda; las calles adoquinadas representan el 20.93%, y las áreas verdes constituyen el 4.92% restante; la delimitación de las subcuencas se recurrió al uso de rásters de relieve continental con una resolución de 5 m y escala de 1:10,000 (INEGI, 2019).

Con base en la topografía, se logró delimitar 6 subcuencas en el área de estudio (Figura 2), además, se observó que la escorrentía superficial se desplaza de norte a sur por las calles; esta situación se debe a la falta de un sistema de drenaje pluvial en la zona que facilite una conducción adecuada del agua.

Para la construcción del modelo en SWMM, fue necesario identificar las características mínimas que requiere el sistema (Tabla 1).

Los parámetros se determinaron mediante QGIS, sin embargo, el porcentaje del área impermeable se determinó según el uso de suelo de cada subcuenca, y se utilizó su respectivo coeficiente de escurrimiento, obtenido de la tabla 2.4 del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: drenaje pluvial (CONAGUA, 2019, p. 57); los valores de Manning para la fracción impermeable y permeable se obtuvieron de acuerdo con la tabla 5-6 del libro Hidráulica

de canales abiertos (Chow, 1994, p. 108); el número de curva se estimó a partir de datos vectoriales de hidrología superficial y edafología (INEGI, 1981; INEGI, 2007), y, el uso de suelo y vegetación de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2021). Mediante los datos vectoriales, se clasificó el tipo de suelo de acuerdo con sus propiedades físicas y en función de su permeabilidad, para ello, se utilizaron los valores del Cuadro No.11 (Díaz Herrera, 1987, p. 64), y se destaca que pertenece a una clasificación de suelo del tipo B; por último, se calculó el número de curva en relación a la clasificación del suelo y su uso; se tomaron los valores presentes en la tabla 2-2a del libro Hidrología urbana para cuencas pequeñas, TR-55 (Cronshey et al., 1986, pp. 2-5) para un suelo tipo B y un uso de suelo con asentamientos humanos, por lo que el valor designado al número de curva fue de 92.

Las características principales de las subcuencas se muestran en la Tabla 2.

SELECCIÓN DE LLUVIAS DE DISEÑO

La estimación de la precipitación de diseño se realizó, a través de registros históricos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2020), se seleccionó la estación climatológica 6052-E.T.A 254 Comala por su influencia sobre la zona de estudio, de dicha estación, se recopilaron

datos de las precipitaciones máximas mensuales del período de 1975 al año 2017.

Los datos recopilados fueron sometidos a pruebas estadísticas para validar su uso en la investigación, que incluye la detección de valores atípicos, prueba Helmert, t de Student, prueba de Cramer y prueba de independencia de Anderson (Escalante Sandoval y Reyes Chávez, 2002), los resultados satisfactorios de estas pruebas confirman que la serie de precipitaciones máximas en 24 horas es independiente y está libre de tendencias.

Una vez validadas las hipótesis para la aplicación del análisis de frecuencias, se implementa la técnica para construir las curvas de intensidad-duración-período de retorno (I-D-Tr), que permiten estimar la precipitación para duraciones menores a 24 horas; se opta por utilizar el método de Frederick Bell debido que su aplicación se ajusta mejor para condiciones de períodos de retorno entre 2 a 100 años y duraciones entre 5 a 120 minutos; la fórmula de Bell se expresa en la siguiente Ecuación 1 (Campos Aranda, 1998, pp. 4–56).

$$P_t^T = (0.35 \ln T + 0.76)(0.54t^{0.25} - 0.50)P_{60}^2 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

T es el periodo de retorno.

t duración de la tormenta.

P_{60}^2 precipitación de tormenta para un periodo de retorno de 2 años con duración de una hora.

La duración de tormenta, también conocida como tiempo de concentración, se determina al emplear la Ecuación 2 de Kirpich (CONAGUA, 2019, p. 41), manifestándose en una hora el tiempo de concentración en el área de estudio.

$$t_{cs} = 0.0003245 \left(\frac{lt}{\sqrt{S_{ic}}} \right) \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde:

l es la longitud del cauce principal (m).

S_{ic} pendiente media del cauce (adimensional).

La construcción de las curvas I-D-Tr permite obtener hietogramas de diseño de precipitación para períodos de retorno de 2, 5 y 10 años, que asume una duración de tormenta de una hora; las precipitaciones de diseño correspondientes a estos períodos fueron de 47.90 mm, 63.23 mm y 74.82 mm, respectivamente, la Figura 3 presenta los hietogramas utilizados en SWMM para la construcción del modelo.

ESTIMACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

La humedad del suelo es importante para procesos como la infiltración y la evaporación, para representar

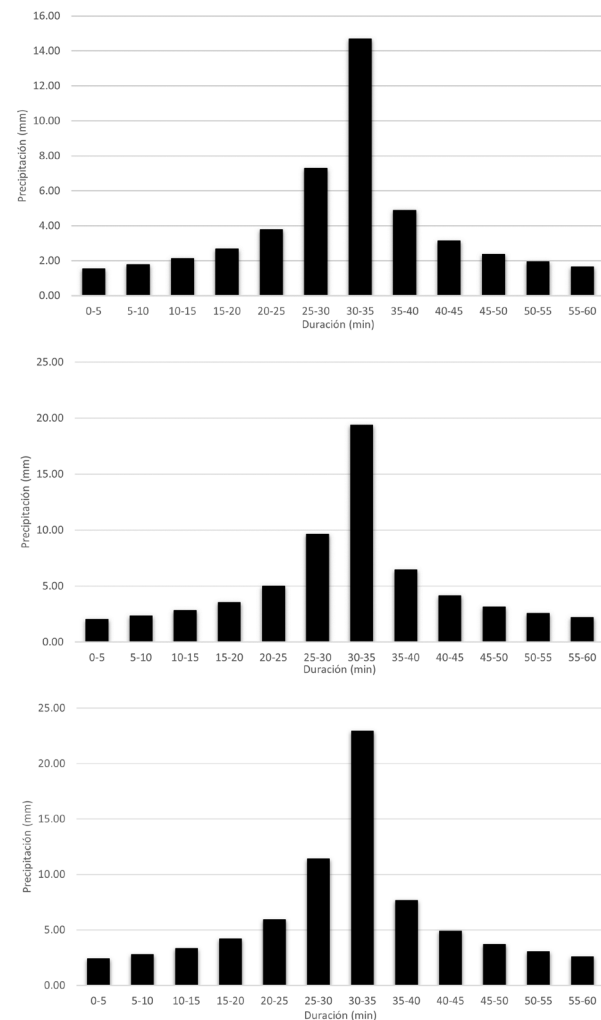


Figura 3. Hietogramas para diferentes periodos de retorno: a) 2 años, b) 5 años y c) 10 años. Fuente: Elaboración de los autores.

de manera precisa la humedad del suelo durante el período de simulación, especialmente al inicio del evento de lluvia, el modelo hidrológico requiere datos de evapotranspiración (Andrés-Doménech et al., 2018).

Debido a que las estaciones climatológicas no registran los datos necesarios, se calcula la evapotranspiración mensual potencial, se utiliza la fórmula de Thornwaite (Ecuación 3), esta fórmula se basa principalmente en la temperatura media, y se ajusta según el número de horas de luz solar en un sitio específico, la evapotranspiración se calcula para el mismo período de años que la precipitación.

$$PE_m = 16N_m \left(\frac{10\overline{T_m}}{I} \right)^a \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

PE_m evapotranspiración potencial (mm/mes).

N_m factor de ajuste mensual relacionado a las horas de luz solar (sin unidades).

$\overline{T_m}$ Temperatura mensual promedio (°C).

a Constante (Ecuación 4).

I Índice térmico anual (Ecuación 5).

$$a = 6.7 \times 10^{-7} I^3 - 7.7 \times 10^{-5} I^2 + 1.8 \times 10^{-2} I + 0.49$$

(Ecuación 4)

$$I = \sum_m^i = \sum_m \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1.5}$$

(Ecuación 5)

La evapotranspiración potencial se estimó en milímetros por mes, para obtener el valor diario, fue necesario dividirlo entre el número de días del mes debido que la simulación de la lluvia es a partir de un solo evento de precipitación; además, se selecciona el valor correspondiente a septiembre, el mes con mayor precipitación en la región (Tabla 3).

Tabla 3. Evapotranspiración potencial por día. Fuente: Elaboración de los autores.

Mes	PEm (mm/día)	Factor corrección	PEm Corregida (mm/día)
Enero	2.55	0.95	2.43
Febrero	2.74	0.90	2.47
Marzo	3.00	1.03	3.09
Abril	3.52	1.05	3.70
Mayo	4.14	1.13	4.67
Junio	4.40	1.11	4.87
Julio	4.15	1.14	4.72
Agosto	4.07	1.11	4.50
Septiembre	3.84	1.02	3.92
Octubre	3.79	1.00	3.79
Noviembre	3.37	0.93	3.14
Diciembre	2.88	0.94	2.72

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

La simulación del modelo consta de tres escenarios: A, el estado actual de la zona sin intervenciones; B, implementación BLL; y C, implementación TV; la capacidad de los BLL es de 2500 litros para cada vivienda, ésta se determina con base en productos comerciales. Por otro lado, las azoteas, al ser principales receptoras del agua de lluvia en la investigación, tienen una superficie promedio de 80m². Además, se considera que los TV cubrieran el total de la azotea, la Tabla 4 presenta el diseño de los TV utilizados en SWMM, basados en los parámetros de Chapman y Hall (2021).

La zona de estudio al carecer de un sistema de drenaje pluvial, se modelaron las calles (7m de anchura y 15cm de altura) como canales rectangulares de superficie libre en

Tabla 4. Parámetros usados en la simulación SWMM. Fuente: Chapman y Hall (2021).

Tipología SUDS	Parámetro	Valores usados en el modelo
TV	Altura de la berma (mm)	20
	Fracción del volumen de vegetación	0.05
	Rugosidad de la superficie (Manning n)	0.24
	Pendiente %	0
	Capa del suelo	
	Espesor (mm)	80
	Porosidad (Fracción de volumen)	0.464
	Capacidad de campo (Fracción de volumen)	0.20
	Punto de marchitez (Fracción de volumen)	0.10
	Conductividad (permeabilidad – mm/hr)	119.40
	Pendiente de la conductividad	45.05
	Carga de succión (mm)	49.80
BLL	Material para el drenaje	
	Espesor (mm)	25
	Fracción de vacíos	0.50
	Rugosidad (Manning n)	0.30
	Altura del barril (mm)	1320



Figura 4. Construcción del modelo en SWMM. Fuente: Elaboración de los autores.

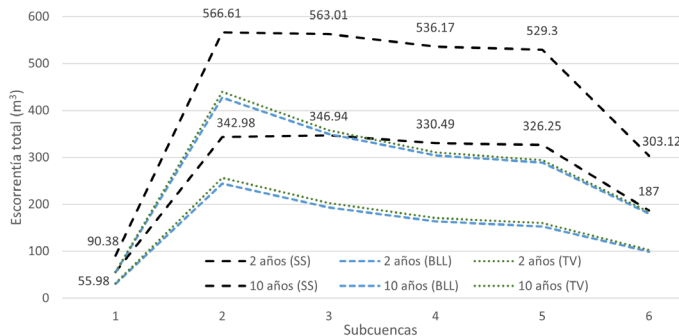


Figura 5. Escoorrentía de acuerdo con valores máximos y mínimos.
 Fuente: Elaboración de los autores.

SWMM para simular la evacuación del agua. Las salidas de cada subcuenca se establecieron en nodos ubicados al final de éstas, que simulan que la escoorrentía generada desciende hasta su punto más bajo y se conecta con la calle que une las subcuenas (Figura 4).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El escenario A, sin SUDS (SS), se simuló bajo tres condiciones de lluvias (2, 5 y 10 años) con duración de una hora, lo que permitió evaluar el comportamiento hidrológico; la subcuenca 2 presentó los valores más altos de acuerdo con los volúmenes de escurrimiento, con una precipitación de 47.90 mm, generó 342.98 m³ de escoorrentía y un flujo máximo de 308.23 lps; con 63.23 mm de precipitación, estos valores aumentaron a 469.46 m³ y 436.61 lps, respectivamente; finalmente, con 74.82 mm de lluvia, se alcanzaron 566.61 m³ de escoorrentía y 536.09 lps de flujo máximo; de acuerdo con los resultados, se evidenció una relación directa entre el aumento de la intensidad de precipitación y la escoorrentía.

La Figura 5 muestra los resultados de la simulación al considerar la aplicación de SUDS para eventos de precipitación con períodos de retorno de 2 y 10 años, representaron las intensidades mínimas y máximas, respectivamente. En general, tanto los BLL como los TV muestran resultados satisfactorios en la retención de agua para las tres condiciones de precipitación; la subcuenca 2, presenta los mayores volúmenes de escoorrentía para una lluvia de 10 años y, experimenta una reducción significativa de 139.15 m³ con los BLL y de 126.94 m³ con los TV; no obstante, la subcuenca 5, logra la mayor reducción absoluta, al alcanzar 240.75 m³ con BLL y 235.35 m³ con TV.

Los BLL como los TV siguen un comportamiento similar para una precipitación de 2 años, aunque los BLL gestionan ligeramente mejor la escoorrentía pluvial que

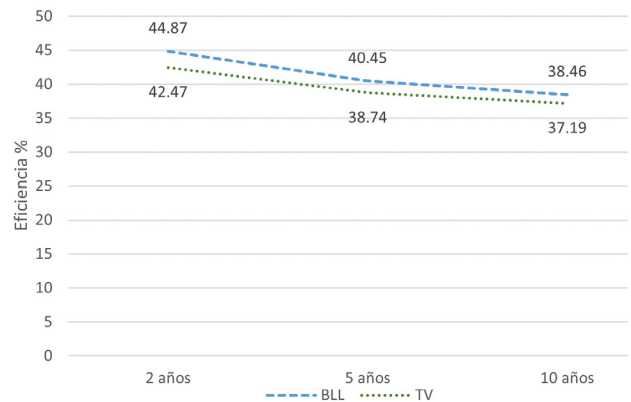


Figura 6. Relación de eficiencia general en la reducción de volúmenes de escurrimiento para diferentes períodos de retorno. Fuente: Elaboración de los autores.

los TV, la diferencia entre ambos no es significativa según el análisis descriptivo. Los porcentajes de eficiencia en el volumen para la subcuenca 2 con una lluvia de 2 años son del 28.86% para los BLL y del 25.30% para los TV, a pesar de su alta eficiencia en tormentas de 2 años, los BLL presentan desbordamientos incluso en eventos de esta magnitud, sin embargo, incluso con desbordamientos, su desempeño es superior que los TV en precipitaciones de mayor intensidad. En la misma subcuenca, con una precipitación de 10 años, la eficiencia de los BLL alcanza el 24.56%, mientras que los TV alcanzan el 22.40%.

La Figura 6 evidencia la eficiencia de ambas tecnologías de manera general y demuestra que su eficacia depende de la magnitud de la precipitación; los BLL muestran un mejor desempeño en cualquier condición de precipitación; no obstante, disminuye su eficiencia al aumentar la intensidad de la lluvia debido a su capacidad de almacenamiento limitada (2500 l). Los desbordamientos que ocurren al superar esta capacidad aumentan la escoorrentía superficial; por otro lado, los TV presentan un desempeño inferior a los BLL en todas las condiciones de precipitación evaluadas. En la zona de estudio, ambas técnicas son funcionales para los períodos de retorno analizados; sin embargo, ambos mantienen una disminución en la eficiencia con precipitaciones de mayor intensidad.

El escurrimiento pico, refiere al flujo máximo que escurre por una cuenca durante un evento de lluvia, las técnicas lograron reducir los escurrimientos pico (Figura 7); se observa una diferencia notable en la reducción de la escoorrentía pico entre los TV y los BLL, a diferencia de la reducción de volúmenes de escurrimiento, donde los BLL mostraban un mejor desempeño, en la reducción de la escoorrentía pico, los TV superan a los BLL en términos de eficacia; la subcuenca 2 presenta un menor rendimiento en la reducción de la escoorrentía pico debido a la menor cantidad de técnicas implementadas, en contraste, la subcuenca 5 logra una mayor reducción gracias a su

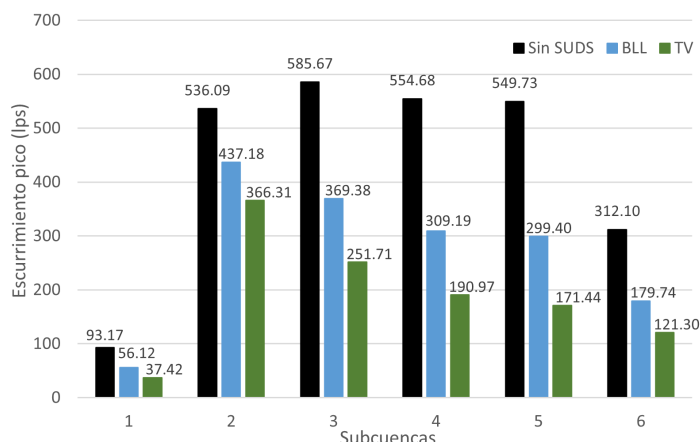


Figura 7. Esguimiento pico para un período de retorno de 10 años.
Fuente: Elaboración de los autores.

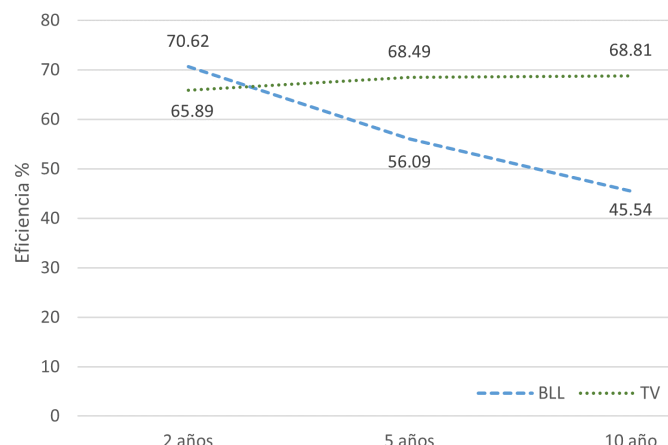


Figura 8. Comparación de la efectividad de BLL y TV en la reducción de la escorrentía pico para diferentes períodos de retorno. Fuente: Elaboración de los autores.

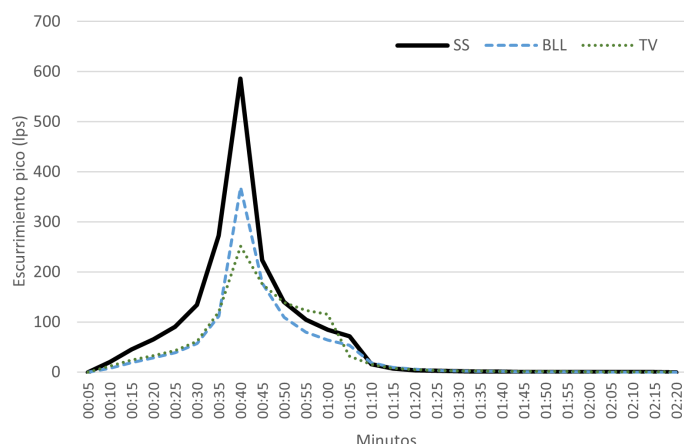


Figura 9. Hidrograma de la subcuencia 3 para un período de retorno de 10 años. Fuente: Elaboración de los autores.

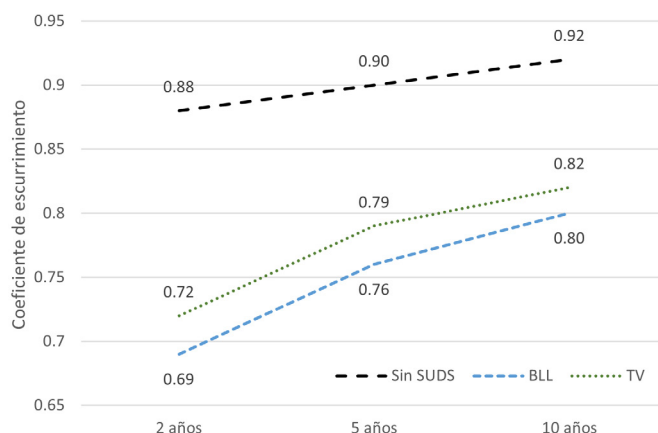


Figura 10. Comparación del coeficiente de esguimiento medio en las subcuencas aplicando BLL y TV. Fuente: Elaboración de los autores.

mayor densidad de viviendas, lo que permite una mayor aplicación de técnicas de captación.

Se evaluó el rendimiento general de ambas técnicas bajo diferentes condiciones de precipitación; la Figura 8 muestra que los BLL destacan en su eficiencia para lluvias de 2 años, pero su rendimiento disminuye en lluvias de mayor intensidad; por otro lado, los TV muestran un mejor desempeño en condiciones de precipitaciones más intensas. En términos generales, los TV superan a los BLL en la reducción del caudal pico, en su mayoría, en eventos de mayor intensidad, los BLL alcanzan su máxima eficiencia (70.62%) en lluvias con período de retorno de 2 años, mientras que los TV demuestran una eficiencia notablemente superior (60.81%) en lluvias con período de retorno de 10 años.

En la subcuencia 3, el esguimiento pico se alcanza a los 40 minutos de iniciada la precipitación, la implementación de BLL reduce este pico en un 36.93%, mientras que los TV logran una reducción aún mayor del 57.02% (Figura 9), las técnicas presentan rendimientos satisfactorios en función de reducir el caudal pico; sin embargo, existe una diferencia significativa entre ambas técnicas; los BLL logran una reducción significativa del caudal pico, al mostrar un comportamiento satisfactorio: sin embargo, los TV superan ampliamente esta eficiencia, al atenuar el caudal pico en más del 50% en comparación con el escenario sin intervención.

Se observa que el tiempo de concentración en el escenario sin intervención presenta un ascenso y descenso pronunciado; aunque los BLL reducen el caudal

Tabla 5. Significancia estadística de las diferencias entre escenarios. Fuente: Elaboración de los autores.

Año	Volumen AvsB	Volumen AvsC	Volumen CvsB	Caudal AvsB	Caudal AvsC	Caudal CvsB	Coefficiente AvsB	Coefficiente AvsC	Coefficiente CvsB
2 años	0.0049	0.004	0.008	0.0051	0.0059	0.0090	0.0002	0.0006	0.00003
5 años	0.0046	0.004	0.010	0.0057	0.0056	0.0059	0.0002	0.0006	0.00010
10 años	0.0044	0.037	0.014	0.023	0.0053	0.0047	0.0004	0.0007	0.00030

pico, exhiben un comportamiento similar, aunque a menor escala; en contraste, los TV disminuyen el caudal pico y aplanan la curva del hidrograma, definiéndolos como la técnica más efectiva.

Se evaluó el coeficiente de escorrentía que evidencia una notable reducción en todos los casos; en la Figura 10, se presenta como el coeficiente de escorrentía en el escenario A aumenta de manera constante con el incremento de precipitación, no obstante, ambas técnicas logran reducirlo considerablemente, siendo los BLL los más efectivos en este aspecto; a pesar de mayor reducción observada con los BLL, los TV presentan un comportamiento más estable frente a lluvias más intensas.

Se analizó si la reducción observada en las tres variables era estadísticamente significativa; aunque el análisis descriptivo muestra una disminución en términos absolutos, es fundamental determinar si esta reducción es estadísticamente significativa para confirmar la efectividad de las intervenciones respecto a cada escenario; se realizaron pruebas t para muestras pareadas, donde un valor de $P < 0.05$ indica diferencias significativas entre los escenarios. Los resultados obtenidos muestran reducciones estadísticamente significativas en las variables analizadas (Tabla 5).

CONCLUSIONES

La simulación con SWMM permite observar la respuesta de las subcuencas ante diferentes condiciones de lluvia y su comportamiento al implementar técnicas sostenibles. Los BLL logran reducciones significativas en el volumen de escurrimiento, al destacar con un mejor desempeño en eventos de precipitación de mayor intensidad, a diferencia de los TV, que muestran su mejor comportamiento en tormentas menos intensas.

Ambas técnicas reducen el volumen, el caudal pico y el coeficiente de escurrimiento; sin embargo, los TV demuestran un rendimiento superior (68.81%), que supera los BLL (45.54%) en la gestión de

escurrimientos pico promedio para lluvias de 10 años; incluso el hidrograma evidencia que los TV consiguen mayor aplanamiento de la curva que los BLL.

Los resultados permiten demostrar la efectividad de estas soluciones sostenibles para gestionar las escorrentías en el área de estudio; al intentar mimetizar las condiciones hidrológicas naturales, es posible recuperar el ciclo hidrológico local y mitigar los impactos de los escurrimientos urbanos para tormentas de diferentes intensidades; es fundamental implementar soluciones basadas en la naturaleza para gestionar la escorrentía, especialmente para reducir el caudal pico y minimizar el riesgo de inundaciones.

En esta investigación se evaluó la aplicación de las técnicas para un 90% de las viviendas, un porcentaje posiblemente poco realista; la principal limitación del estudio es la falta de calibración del modelo debido a la complejidad de determinar todos los parámetros necesarios; se sugiere que futuras investigaciones se centren en la calibración y evaluación para diferentes porcentajes de aplicación en viviendas.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, S.J.F.A.; Curación de datos, S.J.F.A.; Análisis formal, D.A.C.F., J.L.C., J.A.G.V. y I.B.A.; Adquisición de financiación D.A.C.F., J.L.C., J.A.G.V. y I.B.A.; Investigación, S.J.F.A.; Metodología, S.J.F.A.; Administración de proyecto, D.A.C.F.; Recursos; Software. S.J.F.A.; Supervisión, D.A.C.F., J.L.C., J.A.G.V. y I.B.A.; Validación, D.A.C.F., J.L.C., J.A.G.V. y I.B.A.; Visualización, D.A.C.F., J.L.C., J.A.G.V. y I.B.A.; Escritura – borrador original, S.J.F.A.; Escritura – revisión y edición, D.A.C.F., J.L.C., J.A.G.V. y I.B.A.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias, Tecnologías e Innovación

(CONAHCYT) por esta investigación que se deriva del proyecto “Diseño y evaluación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) para mitigar inundaciones en la ciudad de Villa de Álvarez, Colima”. Agradecimiento al Tecnológico Nacional de México (TECNM) Campus Colima y a la Maestría en Arquitectura Sostenible y Gestión Urbana (MASGU).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrés-Doménech, I., Perales-Momparler, S., Morales-Torres, A., y Escuder-Bueno, I. (2018). Hydrological Performance of Green Roofs at Building and City Scales under Mediterranean Conditions. *Sustainability*, 10(9), 3105. <https://doi.org/10.3390/su10093105>

Campos Aranda, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Chapman, C., y Hall, J. W. (2021). The Influence of Built Form and Area on the Performance of Sustainable Drainage Systems (SuDS). *Future Cities and Environment*, 7(1). <https://doi.org/10.5334/fce.112>

Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill Interamericana S.A.

CONABIO. (8 de diciembre de 2021). Portal de Geoinformación 2024. Uso Del Suelo y Vegetación, Escala 1:250000, Serie VII (Continuo Nacional). http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250s7gw

CONAGUA. (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Drenaje Pluvial Urbano*. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

CONAGUA. (2020). Información estadística climatológica. Información de Estaciones Climatológicas. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

Cronshey, R. G., Roberts, R. T., y Miller, N. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*, TR-55. U. S. Department of Agriculture (USDA).

Díaz Herrera, P. (1987). Instructivo de hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de la zona federal. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Administración del Agua, & Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Río. CONAGUA.

Escalante Sandoval, C. A., y Reyes Chávez, L. (2002). Técnicas estadísticas en hidrología. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J. L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., y Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>

Guo, X., Du, P., Zhao, D., y Li, M. (2019). Modelling low impact development in watersheds using the storm water management model. *Urban Water Journal*, 16(2), 146–155. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1637440>

INEGI. (1981). Mapas. Conjunto de Datos Vectoriales de La Carta de Aguas Superficiales. Escala 1:250 000. Serie I. Colima. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825683030>

INEGI. (2007). Mapas. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional Colima. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825235147>

INEGI. (2016). Conociendo Colima. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/conociendo/702825218621.pdf

INEGI. (2019). Mapas. Modelo Digital de Elevación Tipo Superficie Con 5m de Resolución Derivado de Datos de Sensores Remotos Satelitales y Aerotransportados. E13B34f3. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463778547>

INEGI. (2023). Mapas. Marco Geoestadístico, diciembre 2023. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=794551067314>

Liu, Y., Bralts, V. F., y Engel, B. A. (2015). Evaluating the effectiveness of management practices on hydrology and water quality at watershed scale with a rainfall-runoff model. *Science of The Total Environment*, 511, 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.077>

Lizárraga-Mendiola, L., Vázquez-Rodríguez, G. A., Lucho-Constantino, C. A., Bigurra-Alzati, C. A., Beltrán-Hernández, R. I., Ortiz-Hernández, J. E., y López-León, L. D. (2017). Hydrological design of two low-impact development techniques in a semi-arid climate zone of central Mexico. *Water*, 9(8), 561. <https://doi.org/10.3390/w9080561>

Mendoza González, E., Aldana Alonso, S., y Castolo Ramírez, C. (2017). Modelación hidrológica e hidráulica del manejo de las aguas pluviales urbanas en la parte alta de la subcuenca del río San Juan de Dios, Guadalajara, Jalisco. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (2), 83–104. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i2.22>

Pérez-González, M. L., Capra Pedol, L., Dávila-Hernández, N., Borselli, L., Solís-Valdés, S., y Ortiz-Rodríguez, A. J. (2017). Spatio-temporal land-use changes in the Colima-Villa de Álvarez metropolitan area, and their relationship to floodings. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34(2), 78–90. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.2.435>

Ponce de León García, C. E. (2022). Evaluación del desempeño de sistemas de drenaje pluvial convencional incorporando sistemas urbanos de drenaje sostenible, en la zona metropolitana de San Luis Potosí [Tesis Maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36479.48807>

Ramírez-Rivera, M. P., Moreno-Peña, J. R., Arceo-Díaz, S., y Chung-Alonso, P. (2021). Dispersión urbana en Villa de Álvarez en los últimos cuarenta años. *Revista de Difusión Científica, Ingeniería y Tecnologías*, 15(3), 82–87. <http://difu100cia.uaz.edu.mx/index.php/difuciencia/article/view/206/151>

Zúñiga-Estrada, M. A., Lizárraga-Mendiola, L., Bigurra-Alzati, C. A., Aldana-Alonso, S. E., Ramírez-Núñez, J. S., y Vázquez-Rodríguez, G. A. (2022). Preliminary Model-Based Evaluation of Water Conservation Strategies in a Semi-Arid Urban Zone. *Land*, 11(1), 101. <https://doi.org/10.3390/land11010101>

Zuniga-Teran, A. A., Staddon, C., de Vito, L., Gerlak, A. K., Ward, S., Schoeman, Y., Hart, A., y Booth, G. (2020). Challenges of mainstreaming green infrastructure in built environment professions. *Journal of Environmental Planning and Management*, 63(4), 710–732. <https://doi.org/10.1080/09640568.2019.1605890>

PRÁCTICAS DEL HABITAR HACIA LA ADAPTACIÓN Y RESILIENCIA EN UN ENTORNO ANFIBIO EN COLOMBIA

HABITATION PRACTICES FOR ADAPTATION AND RESILIENCE IN AN AMPHIBIOUS ENVIRONMENT IN COLOMBIA

PRÁTICAS DE HABITAÇÃO PARA ADAPTAÇÃO E RESILIÊNCIA EM UM AMBIENTE ANFÍBIO NA COLÔMBIA

Angélica Chica-Segovia

Doctora en Arte y Arquitectura
Profesora asociada, Escuela de Arquitectura y Urbanismo, Facultad de Artes
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-3172-1543>
achicas@unal.edu.co



RESUMEN

La Gran Depresión del Caribe colombiano ubicada en la macrocuenca Magdalena-Cauca, enfrenta una degradación ecosistémica significativa, debido a actividades antropogénicas que han impactado negativamente el hábitat y la calidad de vida de sus habitantes. Este artículo presenta el avance del proyecto Yuma: diversidad cultural infinita, centrado en la identificación de indicadores de adaptación y resiliencia de las comunidades frente a los retos contemporáneos relacionados con el agua de sus humedales, que enfatiza el valor de los saberes y prácticas locales. A través de una metodología cualitativa etnográfica, se exploran las tres subregiones: La Mojana, la Depresión Momposina y la Zapatosa, en que se busca delinear estrategias multiescales para intervenciones que respeten el habitar tradicional y fomenten la autogestión y la gobernanza. Los resultados preliminares destacan la necesidad de políticas públicas que reconozcan las prácticas locales y fortalezcan la capacidad adaptativa de las comunidades, que aseguren su resiliencia ante los desafíos ambientales actuales.

Palabras clave

aguas superficiales, arquitectura vernácula, cultura del Caribe, adaptación al cambio climático.

ABSTRACT

The Colombian Caribbean Great Depression, located in the Magdalena-Cauca macro-basin, faces significant ecosystem degradation due to anthropogenic activities that have adversely affected its inhabitants' habitat and quality of life. This article presents the progress of the Yuma project - infinite cultural diversity, which focuses on identifying adaptation and resilience indicators for the communities to face contemporary challenges related to the water of their wetlands, emphasizing the value of local knowledge and practices. Three sub-regions are explored through a qualitative ethnographic methodology: La Mojana, the Momposina Depression, and La Zapatosa, which seeks to outline multi-scale strategies for interventions that respect traditional habitation and foster self-management and governance. Preliminary results highlight the need for public policies that acknowledge local practices and strengthen the adaptive capacity of communities to ensure their resilience when facing current environmental challenges.

Keywords

surface water, vernacular architecture, Caribbean culture, climate change adaptation.

RESUMO

A Grande Depressão do Caribe colombiano, localizada na macrobacia de Magdalena-Cauca, enfrenta uma degradação significativa do ecossistema devido a atividades antropogênicas que afetaram negativamente o hábitat e a qualidade de vida de seus habitantes. Este artigo apresenta o progresso do projeto Yuma: diversidade cultural infinita, focado na identificação de indicadores de adaptação e resiliência das comunidades diante dos desafios contemporâneos relacionados à água de suas zonas úmidas, o que enfatiza o valor do conhecimento e das práticas locais. Por meio de uma metodologia etnográfica qualitativa, as três sub-regiões foram exploradas: La Mojana, La Depresión Momposina e La Zapatosa. O objetivo era delinear estratégias multiescares para intervenções que respeitassem a habitação tradicional e promovessem a autogestão e a governança. Os resultados preliminares destacam a necessidade de políticas públicas que reconheçam as práticas locais e fortaleçam a capacidade de adaptação das comunidades para garantir sua resiliência diante dos atuais desafios ambientais.

Palavras-chave:

águas de superfície, arquitetura vernacular, cultura caribenha, adaptação às mudanças climáticas.

INTRODUCCIÓN

La Gran Depresión del Caribe-GDC ubicada al norte de Colombia en la macrocuenca Magdalena-Cauca, está conformada por La Mojana, la Depresión Momposina y la Ciénaga de la Zapatosa, pertenecientes a los departamentos de Córdoba, Sucre, Bolívar, Magdalena y Cesar. Es un complejo de humedales regulador de los ríos Magdalena, Cauca, San Jorge y Cesar, con una temperatura promedio que oscila entre los 24 y 37°C, pluviosidad de 17 a 137mm y humedad del 82 al 100%. Las dinámicas de creciente y estiaje de sus cuerpos de agua suponen cuatro condiciones hidrológicas: aguas bajas, subiendo, altas y bajando; en función de los que se organiza el ecosistema.

Los humedales ribereños y sus pulsos hídricos son ecosistemas fundamentales, amortiguadores de inundaciones al decantar y acumular sedimentos de los ríos afluentes (Observatorio de conflictos ambientales Universidad Nacional de Colombia [OCA] e Instituto de Estudios Ambientales [IDEA], 2017), lo que favorece el aprovechamiento agropecuario y piscícola, generándose hábitats para un gran número de seres vivos, con un alto número de servicios ambientales (RAMSAR, 2018). Sin embargo esto ha llevado a la sobreexplotación y degradación, haciéndolos vulnerables y poniéndose en riesgo las comunidades (Torremorell et al., 2021).

Estos han sido la estructura de soporte para las comunidades anfibias y aledañas que los habitan interdependientemente, proveyéndoles gran parte de lo necesario y requiriendo su protección. Históricamente ha habido una adaptación a este ecosistema, como es el caso de las obras hidráulicas de los indígenas zenúes (Olmos-Severiche et al., 2022) (Figura 1), en interacción con las dinámicas del agua. Desde la colonización española en el siglo XVI algunas actividades a lo largo de la macrocuenca y el cambio climático, han modificado las prácticas productivas y sus modos de habitar, poniendo en riesgo el denominado socio-ecosistema (Calderón-Contreras, 2021).

Aunque los humedales son resilientes y poseen la capacidad de autorrepararse, la interacción humana afecta esta posibilidad (Folke, 2003, como se citó en Medina et al., 2014), en que se deteriora el hábitat a veces de forma irreversible, siendo urgente acciones recíprocas que permitan restaurar el equilibrio socio-ecosistémico (Torres-Carral, 2021).

Se han evidenciado conflictos y obstáculos que afectan su conservación, tales como: transformaciones hidrológicas, debilidades en la gestión socio-ecológica, escaso conocimiento y valoración por parte de la sociedad, esfuerzos insuficientes en conservación y aprovechamiento sostenible, baja intervención con enfoque de resiliencia y adaptación, limitadas capacidades técnicas de gestión y planificación territorial (Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia. Departamento



Figura 1. Canales zenúes en las Flores, Sucre. Fuente: Elaboración de los autores.

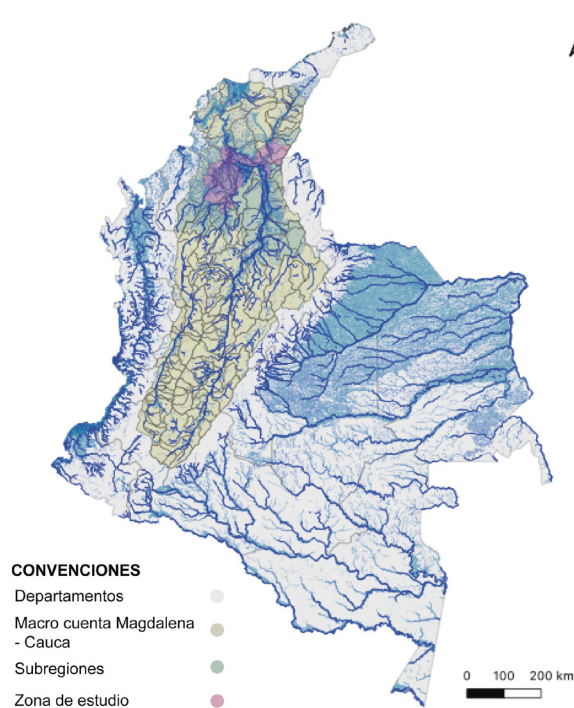


Figura 2. Macrocuenca Magdalena-Cauca. Fuente: Elaboración de María Camila Ramos Zapata

Nacional de Planeación [CONPES], 2022; Vargas et al., 2023). Esto hace necesarias soluciones desde la gestión integral del territorio a partir del conocimiento, conservación y uso sostenible del capital natural y cultural, para evitar alcanzar el punto de no retorno.

Este tema ha cobrado relevancia debido a las emergencias hidrológicas y climáticas que afectan la

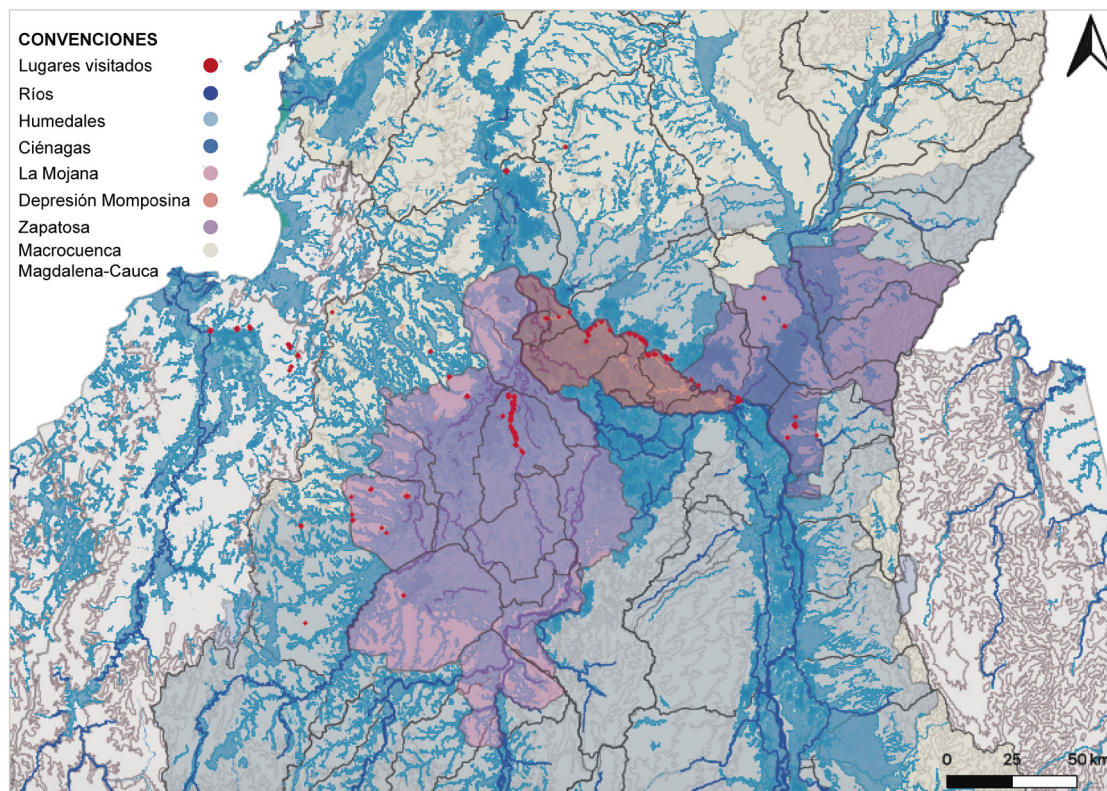


Figura 3. Recorrido realizado en la GDC. Fuente: Elaboración de María Camila Ramos Zapata.

estabilidad de la población (Rivera-Cediel, 2024). Existen numerosos estudios y normativas relacionadas como (de Nieto y Falchetti, 1981; Aguilera-Díaz, 2004; Aguilera-Díaz, 2011; Corporación OSSO, 2013; Vargas et al., 2023; Organización Panamericana de la Salud [OPS] y Organización Mundial de la Salud [OMS], 2023; Torres Solórzano, 2023), pero su enfoque aún es centralista (Billon et al., 2020) selectivo o fragmentado, en una región compleja. A veces no se comprenden las implicaciones de los ciclos del agua o los factores que impiden afrontar los retos relacionados con intereses económicos y el conflicto armado (Diz Diz, 2021).

También se han dado soluciones puntuales que se adaptan a tipos de infraestructura y vivienda (Palencia Mendoza, 2019; García-Reyes Röthlisberger y Fajardo, 2019; Mosquera-Torres y Calderón-Franco, 2022), que evidencia la necesidad de mayores esfuerzos multiscales, que integren dinámicas naturales, y saberes de las comunidades, como actores principales en el tratamiento de estos ecosistemas (Smardon, 2006).

El proyecto de investigación tiene como objetivo fomentar acciones que reequilibren las relaciones socioecosistémicas, que fortalezcan la capacidad de respuesta al cambio (Nguyen et al., 2022) y mejoren la calidad de vida y movilidad social de las comunidades. Busca promover una atención integral de la ecorregión y su macrocuena, que contrarresta la centralidad en la

gestión del territorio y su condición ecosistémica (Jaimes Pereira y Zerbone Alves de Albuquerque, 2022). El enfoque del eje presentado en el artículo, son las prácticas del habitar y la arquitectura, se documentaron evidencias de adaptación y resiliencia (Coscia y Voghera, 2022) ante las actuales condiciones. Esto permitió generar insumos preliminares para sustentar intervenciones adaptadas localmente, coproducidas y situadas, en el marco de la autogestión y la gobernanza comunitaria, orientadas a la formulación de políticas públicas efectivas a nivel nacional, regional y local en la gestión del territorio.

METODOLOGÍA

Se inició con una indagación bibliográfica, con recorridos en campo de documentación y caracterización socioecosistémica en las tres zonas La Mojana, la Depresión Momposina y La Zapatos (Figura 2 y Figura 3). Se seleccionaron casos representativos por muestreo intencional, se aplicaron entrevistas semiestructuradas, historias de vida y observación participante.

Se analizó la información mediante fichas de caracterización socioecosistémica (Figura 4), bajo las categorías de ecosistema, modos de habitar, arquitectura, conflictos y amenazas, indicadores de adaptación y resiliencia.



Figura 4. Instrumento de caracterización. Fuente: Elaboración de los autores.

RESULTADOS

PRÁCTICAS DEL HABITAR

La significativa biodiversidad de estos ecosistemas aportada por los pulsos del agua en los ríos, caños, lagunas, ciénagas, zapales y bosques (Camacho, 2015); ha constituido históricamente el hábitat de comunidades asentadas en sus riberas, forzándola a adaptarse a las dinámicas hidrológicas, con un calendario en función de ello que usan para suplir sus necesidades (Figura 5). La arquitectura y la forma de ocupar el territorio reflejan esas dinámicas; las prácticas constructivas y las productivas como la pesca, la agricultura y la caza responden al clima, a los cuerpos de agua y a los períodos del año marcados por la creciente desde enero hasta octubre con una pesca abundante. Luego llega el estiaje que fertiliza la tierra para la siembra; aunque la pesca disminuye, es el momento en el que los peces desovan preparándose para la siguiente temporada. Además, se aprovechan los pastos frescos del estiaje para la trashumancia ganadera desde las sabanas, estableciendo una relación estrecha entre las zonas altas y los humedales.

Cada período supone una disponibilidad de recursos para la seguridad alimentaria, la construcción y el comercio de excedentes; lo que ha generado históricamente una

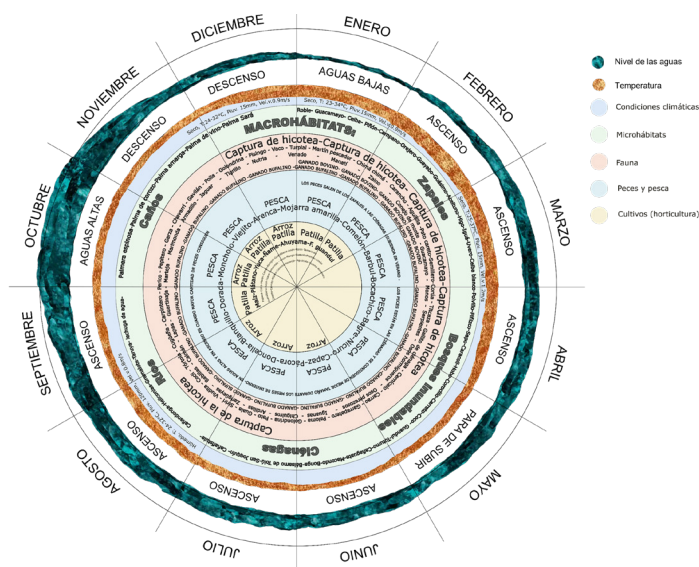


Figura 5. Calendario ecológico de la GDC. Fuente: Elaboración de los autores.

relación muy estrecha con las poblaciones ribereñas y alrededor de éstas. En la figura 6 se muestran los dos momentos en cada uno de los microhábitats.

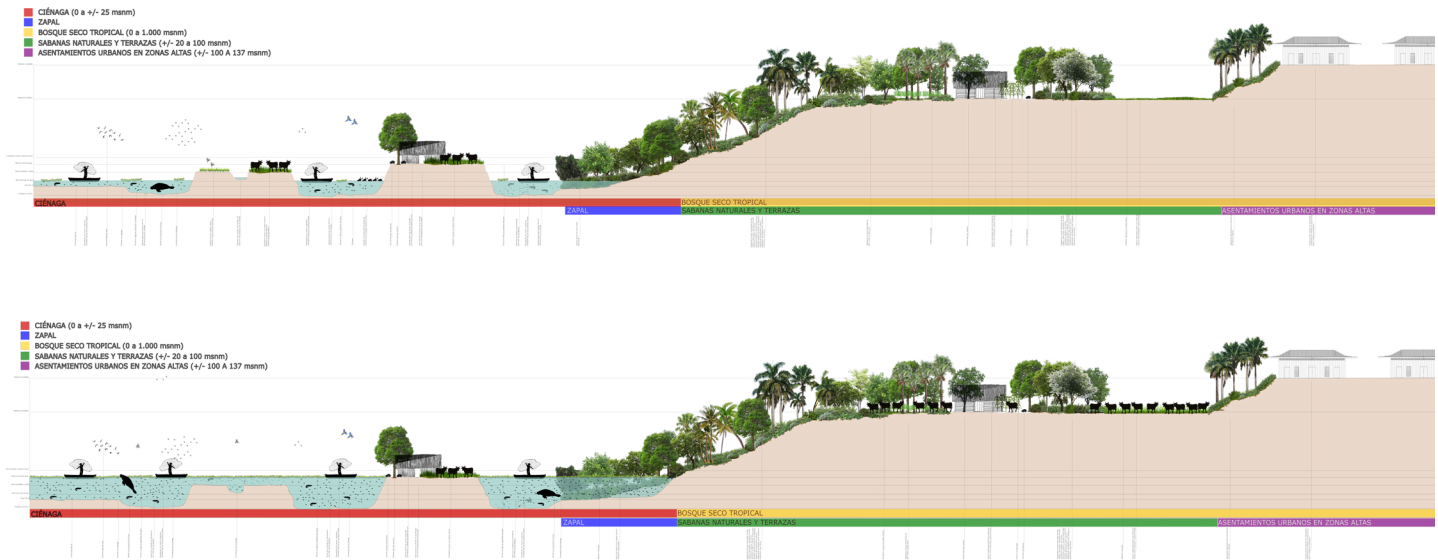


Figura 6. Modos de habitar en el transecto sabana natural, bosque seco tropical, zapal, ciénaga; en aguas altas y bajas. Fuente: Elaboración de los autores.

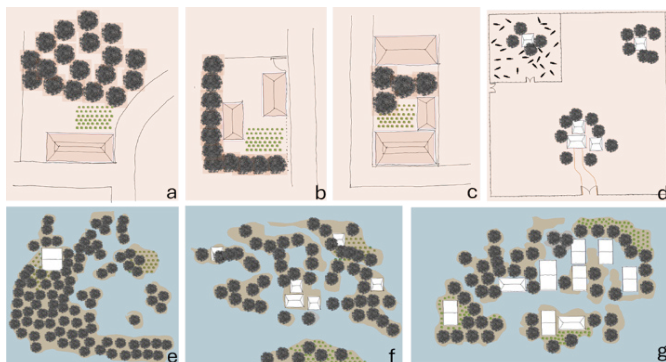


Figura 7. Tipos de implantación: a, b y c urbana; d. rural productiva; e, f y g en la ciénaga. Fuente: Elaboración de los autores.

HÁBITAT Y ARQUITECTURA

Los tipos arquitectónicos y de implantación tradicionales se mantienen, con construcciones de un volumen único que se amplía, a través de nuevos volúmenes generalmente no adosados (Figura 7,a-g) y en las propiedades productivas la construcción agrupada se sitúa rodeada de infraestructura para las actividades complementarias como ganadería y horticultura (d).

En la mayoría de los casos son de un piso y excepcionalmente de dos o más, especialmente en las zonas urbanas en edificios que muestran la riqueza de otros tiempos como en Sucre, San Marcos, El Banco, entre otros. La edificación va siempre acompañada de vegetación de bajo, medio y alto porte, para dar sombra y en algunos casos ofrecer alimento, complementado frecuentemente por cultivos de pancoger (Camacho Segura y Robledo Escobar, 2020), incluso en las zonas urbanas (Figura 8).



Figura 8. Implantación en predios productivos (arriba), urbanos (al centro) y en las ciénagas (abajo). Fuente: Elaboración de los autores.

Cada ecosistema supone el uso de materiales disponibles en el medio y una respuesta bioclimática adecuada, adaptada a los ciclos del agua, con predominancia de construcciones en mampostería, entramado de madera y bahareque embutido en las zonas secas rurales o urbanas, en entramado en palma de corozo y a veces madera en las zonas inundables. Cada una cuenta con

cimentación de vara en tierra, salvo la de mampostería que se eleva sobre ciclópeos. Así mismo sobresalen las cubiertas en zinc que reemplazan las de palma amarga y de vino, modificándose así el confort de las viviendas, lo que se suple con vegetación alrededor (Figura 9, Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14 y Figura 15).

CARACTERIZACIÓN DEL HÁBITAT Y LA ARQUITECTURA TRADICIONAL EN LA DEPRESIÓN MOMPOSINA					
TIPOLOGÍA		CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS			
		CERRAMIENTOS		CUBIERTAS Y ENTREPISOS	
REGISTRO	TIPO	SISTEMA	MATERIALES	SISTEMA	MATERIALES
a. Urbana					
	Terrestre- A nivel del suelo	Bahareque con envarado vertical	Madera	Par, hilera y solera	Madera
			Nepa de corozo		Palma amarga y de vino
					Madera
					Teja de zinc
		Bahareque embutido	Madera	Par, hilera y solera	Madera
			Nepa de corozo + barro		Palma amarga y de vino
					Madera
					Teja de zinc
		Entramado	Madera	Par, hilera y solera	Madera
					Palma amarga y de vino
					Madera
					Teja de zinc
		Mampostería simple	Ladrillo	Par, hilera y solera	Madera
					Teja plana
					Madera
					Teja de barro
					Madera
					Teja de zinc
b. Rural					
	Terrestre-A nivel del suelo	Bahareque con envarado vertical	Madera	Par, hilera y solera	Madera
			Nepa de corozo		Palma amarga y de vino
					Madera
					Teja de zinc
		Bahareque embutido	Madera	Par, hilera y solera	Madera
			Nepa de corozo		Palma amarga y de vino
					Madera
					Teja de zinc
		Entramado	Madera	Par, hilera y solera	Madera
					Palma amarga y de vino
					Madera
					Teja de zinc

Figura 9. Caracterización técnica de la arquitectura en las tres zonas. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 10. Casa tradicional urbana en mampostería. El Banco. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 11. Casas urbanas en mampostería, Sucre. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 12. Casa tradicional urbana entramado de madera, San Marcos. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 13. Casa tradicional urbana entramado en nepa de corozo, Santiago Apostol. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 14. Casa tradicional rural bahareque embutido, La Zapatosa. Fuente: Elaboración de los autores



Figura 15. Casa tradicional en la ciénaga en nepa de corozo, San Marcos. Fuente: Elaboración de los autores

CONFLICTOS Y AMENAZAS

El equilibrio socioecosistémico de la macrocuenca y del complejo de humedales de la GDM, se ha alterado por la modificación de los ciclos hídricos, debido a las obras de infraestructura aguas arriba como represas, diques, carreteras, entre otros, haciéndolo insostenible (Greco y Larsen, 2014). El cambio climático modifica los ciclos y su duración, junto con la contaminación (Meza-Martínez et al., 2020) y sedimentación del agua por actividades mineras

(Urango-Cárdenas et al., 2024), el uso de agroquímicos (Camacho, 2017) y el monocultivo, que ponen en riesgo a las comunidades (Marrugo-Negrete et al., 2024). También se observa la desecación de la tierra con fines productivos y extractivos, el abandono de prácticas en ritmo con el agua y la sustitución de la arquitectura tradicional en zonas inundables, lo que genera impactos en el territorio y en las comunidades, así como emergencias ambientales y humanitarias, especialmente en los ciclos climáticos plurianuales (Figura 16 y Figura 17).

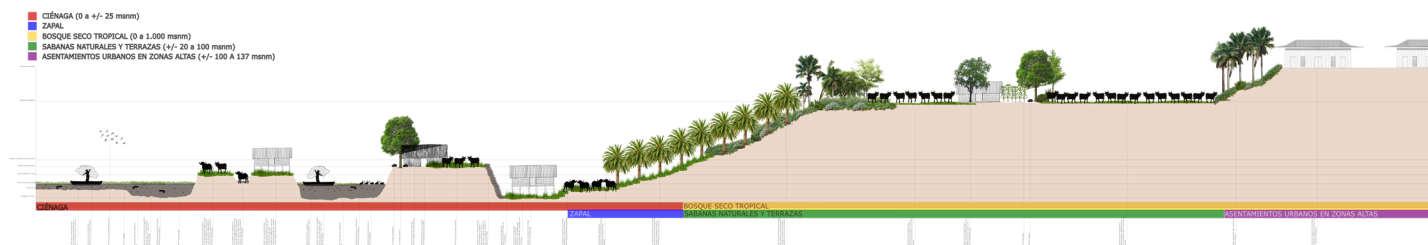


Figura 16. Identificación de los conflictos del hábitat. Fuente: Elaboración propia de los autores.

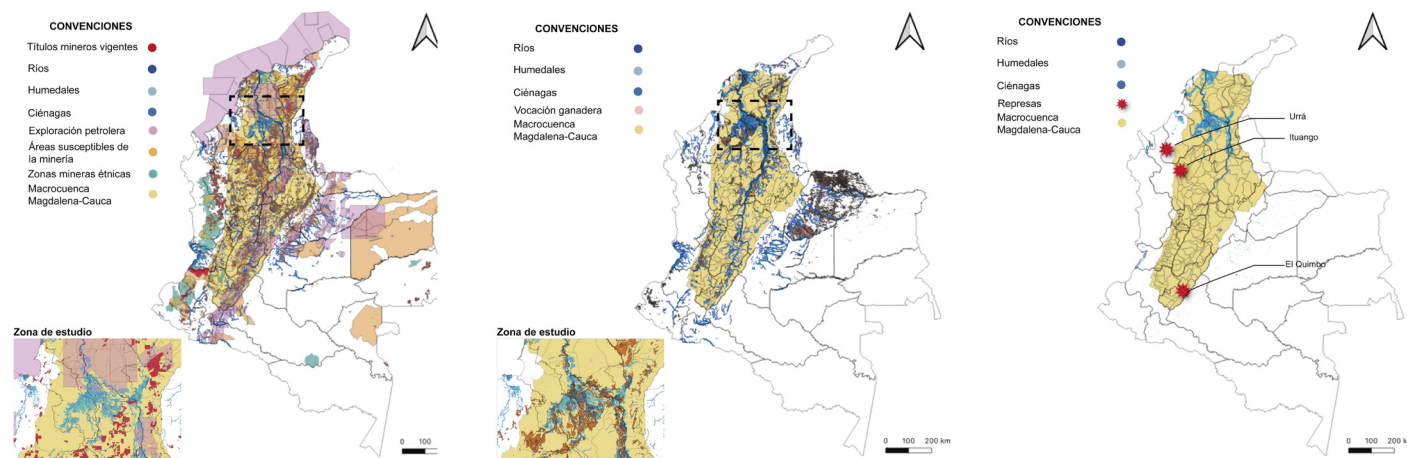


Figura 17. Conflictos regionales: minería, ganadería y represas. Fuente: Elaboración María Camila ramos Zapata



Figura 18. Carretera fragmentando la ciénaga. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 19. Casas para habitantes afectados por inundaciones. Fuente: Elaboración de los autores.

A ello, se suman intervenciones que han alentado esta forma de vida y gestión del territorio, lo que ocasiona desarrollos en contra de la naturaleza de la región; que aportan propuestas que intensifican los conflictos por acción o por omisión como las de la Figura 18 y Figura 19.

INDICADORES DE ADAPTACIÓN Y RESILIENCIA

Se encontraron iniciativas resilientes y de adaptación a las condiciones actuales que apelan a la sabiduría ecológica (Liao et al., 2016), que fomentan la asociatividad, la

sensibilización ecosistémica a todas las generaciones, el reconocimiento de lo local y la salvaguarda de lo propio (Figura 20). Esto se manifiesta en mantener los ritmos en función de los pulsos del agua, la arquitectura tradicional y los conocimientos asociados a la gastronomía, la horticultura, la pesca y la producción de objetos. También se impulsa la reforestación, la recuperación del ecosistema y protección de la fauna local, como base para su seguridad alimentaria y el desarrollo de nuevas fuentes de trabajo y economía, basados en el comercio, el turismo y los servicios ambientales. Aunque son pocas iniciativas frente a las amplias necesidades de una región compleja,

la caracterización muestra los relictos y pervivencia de saberes y prácticas en los modos de habitar que pueden ser potenciados al reconocer la importancia de la región y de estos socioecosistemas para el país y el mundo.

LINEAMIENTOS MULTIESCALARES

El análisis de la información obtenida, permitió identificar el potencial para comprender y reaprender la forma de relacionarse con los ritmos del agua y los retos a afrontar en esta región particular, que proponen lineamientos multiescalares que orienten la política pública en su gestión (Tabla 1), teniendo en cuenta el rol fundamental que posee la planificación comunitaria y paisajística en el control de los impactos antropogénicos.

Por las características de los retos, se evidencia la urgencia de la intervención a nivel nacional en la macrocuenca, regional en la GDC y local en cada una de sus tres subregiones, lo que implica profundizar en su caracterización. A la vez se encontraron elementos en el contexto local que pueden aportar soluciones, a través de la recuperación de las prácticas del habitar y la arquitectura tradicional adaptada al restablecimiento del equilibrio en la relación socioecosistémica, Esto muestra ser la base para un proceso comunitario que, desde el conocimiento que pervive, garantice soluciones apropiadas y equitativas planteadas desde las necesidades y capacidades locales. Con ello se consolidan insumos para el análisis, la planeación y la definición de políticas y proyectos enfocados a la región, que respete las particularidades locales, contribuyendo a impulsar su conservación y apoyando los procesos de adaptación necesarios ante los crecientes impactos del



Figura 20. Iniciativas de adaptación, de izquierda a derecha recuperación ambiental y de modos de habitar en Antequera, recuperación del conocimiento hidráulico Zenú en Purísima e iniciativa ecoturística en La Rinconada. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 1. Síntesis del análisis DOFA y CAME. Fuente: Elaboración de los autores.

DEBILIDADES	NACIONAL	REGIONAL	LOCAL
		CORREGIR	
Municipios pequeños. Deficientes esfuerzos de conservación y aprovechamiento sostenible. Dependencia administrativa, económica y de gestión dispersa y ausente. Baja gestión socio-ecológica. Limitado enfoque de resiliencia y adaptación. Poca accesibilidad y elevado costo de transporte. Baja disponibilidad de servicios e infraestructura. Elevados índices de pobreza y desigualdad. Baja calidad de vida y movilidad social, migración y menosprecio a las prácticas culturales tradicionales. Limitadas capacidades técnicas para la gestión y planificación territorial. Estudios e intervenciones fragmentados y de poco alcance. Bajo reconocimiento y valoración del socioecosistema.	Actualizar el marco político administrativo en función de las necesidades propias, que descentralice y respete las dinámicas locales. Inclusión de la región en el marco nacional, que garantice la prevalencia de las necesidades socioecosistémicas. Enfocar esfuerzos en el desarrollo de la ecorregión, la superación de los conflictos y el incremento de la presencia del estado.	Gestión integral del territorio a partir del conocimiento, conservación y uso sostenible del capital natural y cultural regional, con enfoque de resiliencia y adaptación. Mejorar infraestructura, oferta de servicios, educación, salud, cultura, transporte, vías y medios de comunicación. Incentivar el estudio y reconocimiento interdisciplinario y multiescalar de la región, desde escenarios participativos, de acompañamiento, asistencia técnica y académica.	

DEBILIDADES	NACIONAL	REGIONAL	LOCAL
CORREGIR			
Bajo apoyo a las comunidades organizadas y bajo nivel de asociación.	Priorizar políticas de fortalecimiento a la asociatividad.	Empoderar comunidades, fortalecer la asociatividad y el cooperativismo como formas de empoderamiento, participación, gobernanza y autogestión.	
Desconocimiento de las características ecosistémicas asociadas al agua.	Sensibilizar a funcionarios públicos y nuevos habitantes, sobre las condiciones particulares locales en torno al agua, el rol ambiental, las posibles soluciones adaptadas desde la región y no al contrario.		
Contaminación de fuentes externas.	Endurecer las políticas y normativa ambiental y económica de prevención y corrección.		
OPORTUNIDADES		EXPLOTAR	
Pervivencia del conocimiento sobre la adaptación al agua.	Priorizar los saberes locales antes que intervenciones foráneas en la formulación de política pública y proyectos.	Identificar, reconocer y poner en valor los conocimientos y saberes que perviven, que fomenten su aprecio.	
Saberes tradicionales equilibrados con la naturaleza.			
Biodiversidad que favorece seguridad alimentaria.		Fomentar el conocimiento, las prácticas sostenibles y de conservación del ecosistema, que garantizan la defensa y contribución a su protección.	
Reserva de agua dulce.			
Ecosistema con potencial de restauración.			
Potencial ecoturístico y cultural.		Consolidar puntos y rutas de turismo cultural y ecoturístico, en relación con los hitos locales, que impulsaa las comunidades locales a hacerse cargo de ello.	
Potencial cultural y de identidad inexplorado, poco estudiado y valorado.			
Potencial agrícola y piscícola.	Incentivar el desarrollo agroindustrial sostenible para la seguridad alimentaria, el buen vivir y la movilidad social, con integración al mercado de productos regionales producidos localmente.		
El hábitat y la arquitectura tradicional responden adecuadamente a los retos del cambio climático.	Promover el aprecio y valor de las prácticas locales, así como su aceptación normativa.		
FORTALEZAS		MANTENER	
Los ciclos de inundación generan seguridad alimentaria riqueza y biodiversidad.	Sensibilizar frente a las características propias de la región e intervenciones situadas y coherentes.	Garantizar la salvaguarda y protección del conocimiento sobre el manejo ecosistémico de la región.	
		Incentivar prácticas agrícolas y de pesca eficientes pero sostenibles, no extractivistas y controladas.	
Gran diversidad cultural.		Promover la región y su reconocimiento, especialmente en su carácter ecológico, que amplían la oferta de servicios turísticos, complementario a los ya reconocidos.	
Pervivencia de conocimientos relacionados con los modos de habitar y arquitecturas tradicionales.		Sensibilizar sobre el valor que tienen estos conocimientos y fomentar su aprendizaje como insumo para la intervención regional y global con situaciones similares.	
		Apoyar los desarrollos locales y regionales culturales y turísticos.	
Comunidades locales, comprometidas con la conservación.		Incentivar la conformación de colectivos interesados en el reconocimiento, la salvaguarda y promoción de lo propio, con acompañamiento y asistencia técnica.	
AMENAZAS		AFRONTAR	
Políticas centralizadas de poco alcance en el territorio.	Garantizar la descentralización y equidad en el manejo de los recursos con respecto a la región.	Consolidar esfuerzos regionales que cooperen en la gestión e inyección de recursos.	
Cambio climático.		Estrategias de desarrollo sostenible en todos los campos. Políticas y planes de reforestación y de recuperación del suelo, de gestión integral de recursos hídricos, de adaptación agropecuaria, de restauración ecológica en áreas degradadas.	
Ritmos de inundación anuales y plurianuales.		Fomentar el reconocimiento y aprendizaje del funcionamiento del ecosistema identificando sus particularidades, como insumo para intervenciones que reconozcan las dinámicas propias.	
Desarrollo alejado de las dinámicas naturales del agua.			
Desigualdad regional de acceso a los recursos con extractivismo importante.		Endurecer políticas y normativa ambiental y económica de prevención y corrección, que fomentanla apropiación para la defensa y conservación de su riqueza ecosistémica.	
Políticas ambientales deficientes que permiten transformaciones importantes en el territorio (contención o desviación del agua, sabanización, deforestación y desecación).			
Conflictos ambientales locales y con otros sectores a través del río (minería, represas, ganadería y cultivos intensivos, deforestación).			
Conflicto armado, narcotráfico, minería ilegal.			
Fomento de modos de habitar y arquitectura foráneos sin adecuada respuesta al entorno	Reconocer, documentar, poner en valor y promover su protección.		

cambio climático en relación con la dinámica hidráulica de la región.

Lo mencionado previamente son nodos de intervención que pueden contribuir a sensibilizar a la población local y foránea, acerca de la urgente necesidad de respetar los ciclos del agua y adaptarse a ellos, lo que implica un enfoque diferente en la gestión del territorio en función del agua y no en contra de ella, lo que revela la importancia de un trabajo multiescalar.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La indagación bibliográfica reveló una considerable cantidad de estudios y normativas sobre la cuenca y la GDC, que muestran la relación entre los conflictos a nivel de la cuenca y los impactos en el complejo de humedales, sin embargo, las problemáticas son ingentes y se ahondan, dado el desconocimiento sobre los fenómenos locales, que refleja en una carencia de instrumentos para una gestión del territorio tan centralizada. No es posible resolver las problemáticas sólo desde el contexto central o local, sin establecer canales de comunicación y participación en los diferentes niveles de gestión; así, las intervenciones planteadas deben ser coherentes con las necesidades regionales. Esta línea del proyecto mostró la importancia de reconocer y recuperar las prácticas del habitar y adaptarlas a las nuevas condiciones ambientales y sociales, que tomen como referente los saberes ligados a la arquitectura, el ecosistema y el urbanismo local.

Este proyecto complementa esfuerzos previos al caracterizar preliminarmente algunos indicadores de adaptación y resiliencia de las comunidades. Esta información es fundamental para formular soluciones a los retos socioambientales de la región. La caracterización servirá como insumo para la siguiente etapa, donde se han acordado nodos de restauración socioecosistémica con las comunidades, que promuevan el empoderamiento y el arraigo, fortaleciéndose las capacidades locales a partir de saberes autóctonos, sin intervenciones invasivas y que fomenten la participación en políticas públicas.

Valorar los modos de habitar permite mantener, conservar, reaprender las relaciones con el agua, resiliencia y adaptación a los retos contemporáneos, lo que deja abierta la necesidad de continuar el proceso de reconocimiento en otras zonas de la región, además de activar nuevos puntos de trabajo en recuperación, conservación y salvaguarda.

CONCLUSIONES

Las tres subregiones de la GDC son vitales para la ecología y sustentabilidad humana; a pesar de sus diferencias culturales y ecosistémicas, padecen problemáticas similares que amenazan la supervivencia lo que ocasiona impactos negativos que llevan al socioecosistema a un

punto de no retorno, como ya se evidencia en algunos sectores.

La calidad de vida y movilidad social de sus comunidades están en riesgo, lo que exige adaptación y resiliencia, comprender y reaprender la forma de relacionarse con el agua y sus ritmos en esta región.

La recuperación de los modos de habitar y su adaptación a las nuevas condiciones, mediante saberes ligados a la arquitectura y el urbanismo locales, requiere un trabajo conjunto entre las partes para fortalecer a las comunidades, desde sus propios saberes.

Concebir una gestión con enfoque socioecosistémico, puede contrarrestar las presiones externas que afectan actualmente la región, que promueven una autogestión más eficiente del territorio, como alternativa viable y necesaria, integrar esfuerzos e incrementar la representatividad ante el país y el mundo dada su relevancia socioeconómica y ambiental.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, A.C.S.; Curación de datos, A.C.S.; Análisis formal, A.C.S.; Adquisición de financiación A.C.S.; Investigación, A.C.S. y E.G.A.; Metodología, A.C.S.; Administración de proyecto, A.C.S.; Recursos, V.I.E.F.A.; Supervisión, A.C.S.; Validación, A.C.S.; Visualización, A.C.S. y M.C.R.Z.; Escritura – borrador original, A.C.S.; Escritura – revisión y edición, A.C.S.

AGRADECIMIENTOS

A las comunidades de la ciénaga El Pozuelo-Bolívar, la Fundación Manatí-Antequera, Apropapur-Purísima, Antonio Herazo-Sincelejo, a Edith González Afanador por la construcción del componente ambiental de la investigación y a María Camila Ramos Zapata por el dibujo de los mapas y a la Vicedecanatura de Investigación y Extensión de la Facultad de Artes por la financiación del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera Díaz, MM (Ed.). (2004). *Documento de trabajo sobre Economía Regional. La Mojana: riqueza natural y potencial económico* (48). Banco de la República. Centro de Estudios Económicos Regionales (CEER) - Cartagena. <https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/DTSER-48.pdf>

Aguilera-Díaz, MM (Ed.). (2011). *La economía de las ciénagas del Caribe colombiano*. Colección de Economía Regional Banco de la República. https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/lbr_economia_cienagas.pdf

- Billon, P. L., Roa-García, M. C., y López-Granada, A. R. (2020). Territorial peace and gold mining in Colombia: local peacebuilding, bottom-up development and the defence of territories. *Conflict Security And Development*, 20(3), 303-333. <https://doi.org/10.1080/14678802.2020.1741937>
- Camacho, J. (2015). Paisaje y patrimonio en La Mojana, Caribe colombiano. *Geografía Ensino & Pesquisa*, 19, 90-100. <https://doi.org/10.5902/2236499419378>
- Camacho Segura, J. (2017). Acumulación tóxica y despojo agroalimentario en La Mojana, Caribe colombiano. *Revista Colombiana De Antropología*, 53(1), 123-150. <https://doi.org/10.22380/2539472X.5>
- Camacho Segura, J., y Robledo Escobar, N. (2020). Indivisos, esquema colectivo y prácticas de propiedad campesina en Colombia. *Antípoda. Revista De Antropología Y Arqueología*, 1(40), 29-51. <https://doi.org/10.7440/antipoda40.2020.02>
- Calderón-Contreras, R. (Coord.). (2021). Los sistemas socioecológicos y su resiliencia: casos de estudio. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa, Ciudad de México. Gedisa Editorial. https://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/67867/LosSSEysuResiliencia_CasosdeEstudio.pdf
- Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia. Departamento Nacional de Planeación [CONPES]. (2022). La Mojana: territorio resiliente, sostenible, productivo y competitivo. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4084.pdf>
- Corporación OSSO. (2013). Patrones en la configuración de riesgos y condiciones de vulnerabilidad asociados con la ruptura de diques en Colombia. <https://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2013/en/bgdocs/OSSO,%202012c.pdf>
- Coscia, C., y Voghera, A. (2022). Resilience in action: The bottom up! architecture festival in Turin (Italy). *Journal Of Safety Science and Resilience*, 4(2), 174-187. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2022.10.005>
- de Nieto, C. P., y Falchetti, A. M. (1981). El legendario Zenú. *Boletín Museo del Oro*, (12), 20-33. <https://publicaciones.banrepcultural.org/index.php/bmo/article/view/7310>
- Diz Diz, R. A. (2021). La Mojana Bolivarenses, lucha agraria y actores armados 1980-1995. *Revista Alaúla*, 4, 114-121. Recuperado a partir de <https://revistas.unicartagena.edu.co/index.php/revistaalaula/article/view/3480>
- García-Reyes Röthlisberger, M., y Fajardo, S. A. (2019). Saberes compartidos del hábitat: una arquitectura para el paisaje rural. *Revista Unidades Dearq*, 1(24), 34-47. <https://doi.org/10.18389/dearq24.2019.03>
- Greco, S. E., y Larsen, E. W. (2014). Ecological design of multifunctional open channels for flood control and conservation planning. *Landscape And Urban Planning*, 131, 14-26. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.07.002>
- Jaimes Pereira, A. y Zerbone Alves de Albuquerque, M. (2022). 5. Las prácticas socioambientales y la constitución del territorio en la región de la Depresión Momposina, Colombia en A. González Serna y C. E. Fernández Gómez. *Desafíos bajo el dominio del capital. Efectos en el trabajo, la Riqueza y la producción*. Universidad Pontificia Bolivariana. <http://doi.org/10.18566/978-628-500-064-5>
- Liao, K-H., Le, T. A., y Van Nguyen, K. (2016). Urban design principles for flood resilience: Learning from the ecological wisdom of living with floods in the Vietnamese Mekong Delta. *Landscape and Urban Planning*, 155, 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.01.014>
- Marrugo-Negrete, J., Paternina-Urbe, R., Enamorado-Montes, G., Herrera-Arang, J., Rosso-Pinto, M., Ospino-Contreras, J., y Pinedo-Hernández, J. (2024). Groundwater quality assessment in the La Mojana region of northern Colombia: implications for consumption, irrigation, and human health risks, *Applied Water Science*, 14, 96. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02156-9>
- Medina, CP, Zubillaga, M. de las M., y Taboada, M. Á. (2014). *Suelos, producción agropecuaria y cambio climático: avances en la Argentina*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. https://www.researchgate.net/profile/Ricardo-Vicari-2/publication/268804903_Resiliencia_de_humedales_frente_al_cambio_climatico/links/56661d8a08ae15e74634c621/Resiliencia-de-humedales-frente-al-cambio-climatico.pdf
- Meza-Martínez, M., De La Ossa-Velázquez, J., Hernández-Gómez, J., y Marrugo-Negrete, J. (2020). Mercurio total en hígados de *Trachemys callirostris* (Gray, 1856) (Testudines: Emydidae) en tres zonas de la Mojana, Sucre-Colombia. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 23(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n1.2020.1239>
- Mosquera-Torres, G., y Calderón-Franco, A. M. (Eds.). (2022). *Vivienda y cultura. Modos de habitar y construir la vivienda en el espacio urbano y rural en Colombia*. Universidad del valle.
- Nguyen, N. T., Friess, D. A., Todd, P. A., Mazon, T., Lovelock, C. E., Lowe, R., Gilmour, J., Chou, L. M., Bhatia, N., Jaafar, Z., Tun, K., Yaakub, S. M., y Huang, D. (2022). Maximising resilience to sea-level rise in urban coastal ecosystems through systematic conservation planning. *Landscape And Urban Planning*, 221, 104374. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104374>
- Observatorio de conflictos ambientales Universidad Nacional de Colombia [OCA] e Instituto de Estudios Ambientales [IDEA]. (2017). *Infraestructura navegabilidad y puertos-Cormagdalena-Navelena-Magdalena medio y bajo. Análisis ecosistémicos*. https://oca.unal.edu.co/investigacion/docs/Navegabilidad_rio_Magdalena/ProyNavegab%20ImpEcosist.pdf
- Olmos-Severiche, C., González-Agudelo, E. M., Vélez-Macías, F. de J. y Aguirre-Ramírez, N.J. (2022). Los canales Zenúes en Colombia: un desaparecido en el territorio y un desconocido en el bolsillo. *Intropica*, 17(1), 132-145: <https://doi.org/10.21676/23897864.4052>
- Organización Panamericana de la Salud [OPS] y Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2023). *Emergencia en La Mojana 2021-2023. Crónicas y lecciones aprendidas*. OPS. https://www.paho.org/sites/default/files/emergencia_en_la_mojana_0.pdf
- Palencia Mendoza, M. A. (2019). *Mojana: diseño de viviendas palafíticas para la reducción y mejoramiento del déficit y las condiciones habitacionales en zonas inundables de la comunidad de Orejero - Sucre* [Tesis pregrado, Universidad del Norte].

<https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/10405#page=1>

RAMSAR. (2018). Perspectiva mundial sobre los humedales. Convención RAMSAR. https://www.ramsar.org/sites/default/files/flipbooks/ramsar_gwo_spanish_web.pdf

Rivera-Cediel, H. C. (2024). Cuerpos de agua: un derecho salvaje para el antropoceno a partir de las ciénagas de La Mojana [Tesis Doctorado, Universidad de los Andes]. <https://doi.org/10.57784/1992/74198>

Smardon, R. C. (2006). Heritage values and functions of wetlands in Southern Mexico. *Landscape And Urban Planning*, 74(3-4), 296-312. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.09.009>

Torres Solórzano, V. (2023). Gobernar las inundaciones: las intervenciones del Estado y las acciones de la población en La Mojana de Ayapel entre 2010 y 2022 [Tesis Magíster, Universidad de Antioquia]. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/36066/1/Torres%20Vanessa_2023_GobernarLasInundaciones.pdf

Torres Carral, G. A. (2021). Acerca del concepto de socioecosistema: Un análisis eco-social. *Textual*, (77), 89–114. <https://doi.org/10.5154/r.textual.2021.77.03>

Torremorell, A., Hegoburu, C., Brandimarte, A. L., Rodrigues, E. H. C., Pompêo, M., Da Silva, S. C., Moschini-Carlos, V., Caputo, L., Fierro, P., Mojica, J. I., Matta, Á. L. P., Donato, J. C., Jiménez-Pardo, P., Molinero, J., Ríos-Touma, B., Goyenola, G., Iglesias, C., López-Rodríguez, A., Meerhoff, M., Pacheco, J. P., Teixeira de Mello, F., Rodríguez-Olarte, D., Barrios Gómez, M., Vicente Montoya, J., López-Doval, J.C. y Navarro, E. (2021). Current and future threats for ecological quality management of South American freshwater ecosystems. *Inland Waters*, 11(2), 125-140. <https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1608115>

Urango-Cárdenas, I., Enamorado-Montes, G., Burgos-Nuñez, S., Marrugo-Madrid, S., Paternina-Urbe, R., Marrugo-Negrete, J., y Díez, S. (2024). Unravelling arsenic bioavailability in floodplain soils impacted by mining activities. *The Science of the Total Environment*, 947, 174193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174193>

Vargas, H., Bermúdez, E., Ibatá, L., Vargas, A. M., y Díaz, C. (2023). La Mojana 2030: un país posible. *Propuestas para ordenarla alrededor del agua*. Planeación & Desarrollo. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/PublishingImages/Planeacion-y-desarrollo/2023/octubre/pdf/la-mojana-2030-un-pais-posible.pdf>

BIOCOMPUESTO DE FIBRA DE BANANEIRA, CÁSCARA DE AMENDOIM DE MANABÍ (ECUADOR) Y POLIESTIRENO EXPANDIDO RECICLADO

BIOCOMPOSITE OF BANANA FIBER, PEANUT SHELLS FROM MANABÍ (ECUADOR), AND RECYCLED EXPANDED POLYSTYRENE

BIOCOMPOSTO DE FIBRA DE BANANEIRA, CASCAS DE AMENDOIM DE MANABÍ (ECUADOR) E POLIESTIRENO EXPANDIDO RECICLADO

Eddie Efrén Echeverría-Maggi

Master's degree in Geomatics
 Professor, Faculty of Engineering, Industry and Construction
 University Laica Vicente Rocafuerte, Guayaquil, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0002-4634-5675>
eecheverriam@ulvr.edu.ec

Vicente Flores-Alés

Doctor in Chemistry
 Professor, Architectural Construction II Department , Higher Technical School of Building Engineering
 University of Seville, Seville, Spain
<https://orcid.org/0000-0003-4329-0020>
vflores@us.es (corresponding author)

Juan Jesus Martin-del-Rio

Doctor in Chemistry
 Professor, Architectural Construction II Department , Higher Technical School of Building Engineering
 University of Seville, Seville, Spain
<https://orcid.org/0000-0003-1935-5437>
jjdelrio@us.es



ABSTRACT

This research involves the development of a thermoplastic polymer biocomposite in a matrix of recycled expanded polystyrene reinforced with banana pseudostem fiber and crushed peanut shells. Six models were produced with different doses, of which the one that obtained the best result was the last one, with a content of 63% EPS, 25% banana fiber (40 mm), and 12% crushed peanut shells (1 to 3 mm). In the bending test, it achieved an MOR of 12 N/mm² and an MOE of 55 N/mm²; the compressive strength was 8.60 N/mm²; moisture absorption was 10%; and in the thermal conductivity test, it had a value of 0.095 W/mK, which means it has an adequate insulating capacity. The values obtained comply with the Ecuadorian standard INEN 3110 for particleboards. This work shows the capacity of the materials used to produce different light, resistant, insulating components that can be used in buildings.

Keywords

recycling, natural fibers, panel, expanded polystyrene

RESUMEN

Esta investigación consiste en el desarrollo de un biocompuesto polimérico termoplástico en una matriz que se obtiene de la disolución del poliestireno expandido (EPS) reciclado, reforzado con fibra del pseudotallo de plátano y cáscara de cacahuete. Se elaboraron 6 modelos con los materiales, de los cuales el que obtuvo el mejor resultado fue la última dosificación, con un contenido del 63% de EPS diluido, 25% de fibra de plátano en tiras (40 mm) y 12% de cáscara de cacahuete triturado (1 a 3 mm). En la prueba de flexión alcanzó un MOR de 12 N/mm² y un MOE de 55 N/mm²; la resistencia a la compresión fue de 8,60 N/mm²; 10% de absorción de humedad; y en el ensayo de conductividad térmica tuvo un valor de 0,095 W/mK que le otorga la propiedad de material aislante. Los valores alcanzados cumplen con las normas ecuatorianas INEN 3110 para tableros de partículas. Este trabajo evidencia la capacidad de los materiales utilizados para la manufactura de diversos componentes ligeros, resistentes y aislantes que se pueden emplear en las edificaciones.

Palabras clave

reciclado, fibras naturales, panel, poliestireno expandido

RESUMO

Esta pesquisa envolve o desenvolvimento de um biocompósito de polímero termoplástico em uma matriz de poliestireno expandido reciclado reforçado com fibra de pseudocaule de bananeira e cascas de amendoim trituradas. Foram produzidos seis modelos com diferentes doses, dos quais o que obteve o melhor resultado foi o último, com um teor de 63% de EPS, 25% de fibra de banana (40 mm) e 12% de casca de amendoim triturada (1 a 3 mm). No teste de flexão, alcançou um MOR de 12 N/mm² e um MOE de 55 N/mm²; a resistência à compressão foi de 8,60 N/mm²; a absorção de umidade foi de 10%; e no teste de condutividade térmica, apresentou um valor de 0,095 W/mK, o que significa que tem uma capacidade de isolamento adequada. Os valores obtidos estão em conformidade com a norma equatoriana INEN 3110 para painéis de partículas. Este trabalho mostra a capacidade de materiais utilizados para produzir diferentes componentes leves, resistentes e isolantes que podem ser empregados em edificações.

Palavras-chave:

reciclagem, fibras naturais, painel, poliestireno expandido

INTRODUCCIÓN

El plátano es uno de los cultivos más representativos del mundo, que cubre un área de 5.557.060 ha en 2020. El mayor productor es India (31.504.000 t), y el mayor exportador es Ecuador (7.039.839 t) (FAOSTAT, n. d.). Las industrias pueden utilizar una cantidad significativa de fibra extraída del pseudotallo para diversas aplicaciones (Balda et al., 2021). Los investigadores han realizado varios estudios sobre los usos de estas fibras, como en el refuerzo de mortero (Akinyemi y Dai, 2020); en las industrias farmacéutica y alimentaria (Kumar et al., 2022); en el tratamiento de aguas residuales, donde actúan como absorbentes de contaminantes ambientales como metales pesados, colorantes y pesticidas, entre otros (Ahmad y danés, 2018); como refuerzos en materiales compuestos, incluyendo resina epoxi, éster vinílico, poliéster, polipropileno y polietileno (Ogunsilo & Oladeji, 2016). La estructura de la fibra de plátano (FP) consiste en 60-65% de celulosa, 19% de hemicelulosa, 5% de lignina, 2,5% de pectina y un contenido de humedad del 10%. Tiene un ángulo microfibrilar de 11°, un diámetro de fibra de 173 μm y una densidad de 1350 g/cm^3 . Su alto contenido de celulosa le confiere una alta resistencia mecánica; el módulo de elasticidad oscila entre 27 y 32 GPa, y la resistencia a la tracción tiene un rango de 529 a 914 N/mm², y el porcentaje de elongación del plátano cultivado es del 21,26%. Estos valores son más altos que los de las fibras de bambú, coco y sisal (Balda et al., 2021; Senthilkumar et al., 2018; Jayaprabha et al., 2011; Chattaviriya et al., 2022; Addis et al., 2023). La fibra de pseudotallo de plátano es adecuada para reforzar compuestos poliméricos para reemplazar fibras sintéticas debido a su excelente resistencia mecánica (Kalangi et al., 2022).

Las investigaciones han demostrado que la incorporación de fibras naturales mejora las propiedades mecánicas, así como el aislamiento térmico y acústico. Los estudios demuestran que la fibra de plátano tiene un coeficiente de reducción de ruido de 0,55-0,89 a frecuencias de 250 a 6300 Hz (Chattaviriya et al., 2022; Mendes y de Araújo Nunes, 2022). En compuestos híbridos, tiene una conductividad térmica de 0,003 W/m·K (Saravanan et al., 2020), mientras que, en compuestos poliméricos, logra una resistencia a la tracción de 21-93 N/mm², resistencia a la flexión de 48-55 N/mm², y resistencia al impacto de 7-18 J (Emmanuel Durai Raj et al., 2023; Kalangi et al., 2022).

La fibra del plátano puede tratarse con químicos para mejorar su desempeño mecánico, como en el trabajo de T. A. Nguyen y T. H. Nguyen, quienes desarrollaron un compuesto de fibra de plátano de 30 mm de largo tratada con hidróxido de sodio (NaOH) al 10%, 15%, 20% y 25% en masa, logrando un alto rendimiento con una proporción de 80% de resina epoxi y 20% de fibra de pseudotallo de banano (Nguyen y Nguyen, 2021). El tratamiento de las fibras mejora la transferencia de carga y retrasa la propagación de grietas después de una falla por cizallamiento (Chenrayan et al., 2023).

Sin embargo, es esencial controlar la longitud, orientación y volumen de las fibras. Cantidades excesivas pueden crear

huecos en la matriz, debilitando la unión interfacial y reduciendo la resistencia (Prem Chand et al., 2021; Addis et al., 2024; WONGSA et al., 2020; Korniejenco et al., 2016). Los compuestos "sándwich" también se han desarrollado a mano, utilizando capas superpuestas de fibra y polímero (Ramprasath et al., 2020).

Las cáscaras de cacahuete consisten en 45% de celulosa, 32,8% de lignina, 23-30% de hemicelulosa y 4,9% de proteína, con un contenido de humedad de 8-10% (Binici y Aksogan, 2017a; Gatani et al., 2010; Zaba e Ismail, 2018). Actualmente, existe una investigación basada en el uso de ceniza de cáscara de cacahuete y sus derivados en componentes de construcción como reemplazo del cemento en hormigones y morteros, utilizando principalmente ceniza de su cáscara molida obtenida a temperaturas que oscilan entre 400°C y 800°C, siendo la temperatura ideal 500°C (Gatani et al., 2010; Abd-Elrahman et al., 2023). Se ha utilizado como estabilizador para materiales de tierra y tiene aplicaciones como agregado fino en bloques de concreto y mampostería (Sathiparán et al., 2023). Los fabricantes también han utilizado cáscaras de cacahuete como componente en la producción de materiales de aislamiento térmico y acústico (Binici & Aksogan, 2017b).

Las cáscaras de cacahuete también se han utilizado en la fabricación de tableros de partículas utilizando urea-formaldehído como aglutinante, con tamaños de partícula que oscilan entre 0,5 y 3 mm (Guler et al., 2008; Akindapo et al., 2015). Prabhakar et al. investigaron las propiedades de un compuesto epoxi reforzado con polvo de cáscara de cacahuete, utilizando fibras tratadas con NaOH a concentraciones de 2, 5 y 7% p/v, y tres dosis de cáscara de 5, 10 y 15 en peso% (Prabhakar et al., 2015). S. Ramu et al. trabajaron con un compuesto híbrido en matriz epoxi con cáscara de cacahuete y cáscara de arroz, tratado con NaOH (1-2 horas) para mejorar sus propiedades mecánicas (Ramu et al., 2023). Girimurugan et al. (2022) realizaron un estudio experimental sobre las propiedades compresivas de un compuesto híbrido de polietileno de alta densidad, nanoalúmina y cáscara de cacahuete, en una proporción de 95: 2,5: 2,5 respectivamente, que es la proporción que dio los valores más altos de resistencia mecánica (Girimurugan et al., 2022). Sada et al. (2013) utilizaron cáscaras de cacahuete como sustituto del agregado fino (arena) con un tamaño no mayor a 4,76 mm; a medida que aumenta la cantidad de cáscara de cacahuete, disminuye la trabajabilidad y disminuye la densidad (Sada et al., 2013).

El poliestireno expandido (EPS, en inglés) es un material inerte, no biodegradable, que no contiene clorofluorocarbonos (CFC), por lo que no puede contaminar vectores ambientales, pero puede causar problemas si no se recicla. Una tonelada de poliestireno desechado equivale a 200 m³ y ocupa mucho espacio, compuesto por un 98% de aire y un 2% de poliestireno. Para reciclar este producto se utilizan técnicas térmicas y químicas. Las opciones químicas implican el uso de solventes. Otros procesos, como la contracción por aire caliente y la compresión térmica por

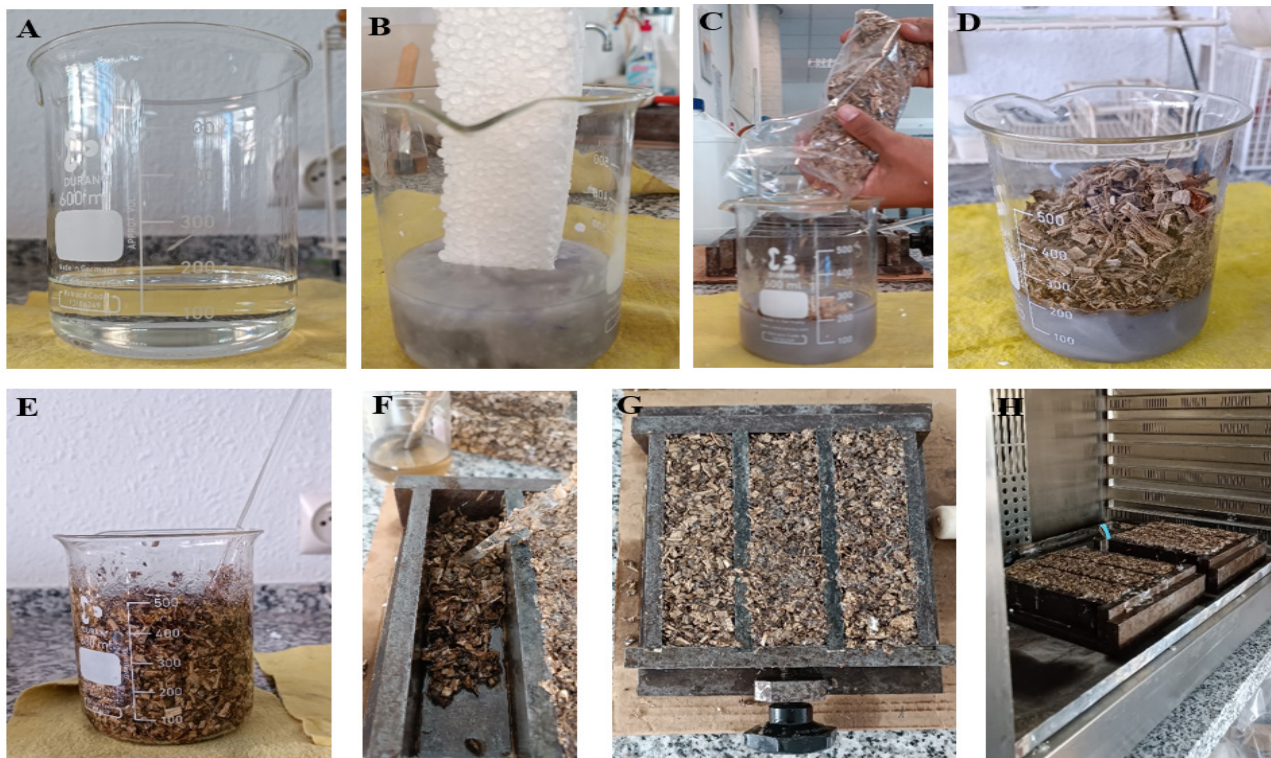


Figura 1. Procedimiento de prototipado. (a) disolvente universal; (b) solución de poliestireno expandido (EPS); (c) y (d) una mezcla de los agregados naturales con el aglutinante; (e) mezcla de los componentes; (f) colocación en el molde; (g) compactación en el molde y reposo durante 48 horas; (h) secado en el horno. Fuente: Elaborado por los autores

fricción (Martínez & Laines, 2013), pueden incorporar materiales adicionales, como harina de madera (Poletto et al., 2011). El reciclaje de plástico es una alternativa para evitar la contaminación ambiental y la emisión de gases tóxicos por incineración y consiste en su recolección, almacenamiento y reprocesamiento para obtener nuevos productos (Segura, Noguez y Espín, 2007).

El objetivo general de la investigación es desarrollar un material, utilizando cáscaras de plátano y cáscaras de cacahuate a partir de desechos agrícolas, que pueda usarse para hacer un panel arquitectónico. Este panel debe ser lo suficientemente duradero y tener propiedades aislantes. Se espera que este proceso ayude a reducir la huella de carbono asociada con la construcción y fabricación del material. El uso combinado de los dos residuos vegetales y la recuperación del EPS son los elementos centrales de esta investigación.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Se recolectaron fibras de plátano y cáscaras de cacahuate de residuos agrícolas en la zona rural de Carrasco, ubicada en Manabí (Ecuador). Las fibras se seleccionaron después de la cosecha, se secaron al sol durante siete días y luego se transportaron a los laboratorios de la Universidad Laica Vicente Rocafuerte en Guayaquil.

También se recogió poliestireno expandido de envases de electrodomésticos.

Las fibras se sometieron a un tratamiento químico en una solución de NaOH para limpiar y mejorar su rendimiento físico y mecánico. Luego, se secaron al sol durante siete días y en un horno durante 48 horas a una temperatura de 100°C. Una vez secas, las fibras de plátano se cortaron en tiras de 40 mm por 2 mm y 20 mm por 2 mm. El EPS se diluyó en disolvente, dando como resultado una sustancia viscosa blanquecina-grisácea. Las fibras se mezclaron con el conglomerado (EPS diluido) durante 15 minutos, luego se colocaron en moldes metálicos previamente lubricados con un desmoldeante, acompañados de 50 golpes de percusión, para eliminar burbujas de aire y mejorar su acoplamiento. La sustancia permaneció en el molde durante siete días; luego, se retiró y se dejó secar al ambiente por 14 días adicionales (Figura 1).

Para preparar las muestras, se utilizó el modelo de muestra descrito en la *Norma UNE-EN 196-1: 2018*, diseñada inicialmente para pruebas de cemento, únicamente para establecer las dimensiones de las muestras de 40 mm x 40 mm y 160 mm. Se establecieron seis tipos diferentes de dosificaciones de sus componentes, y se prepararon tres prototipos para cada dosificación para calcular el valor promedio (Tabla 1, Figura 2). La trabajabilidad del lote final se verificó probando la consistencia del mortero fresco en una mesa vibratoria.

Tabla 1. Composición del prototipo. Fuente: Elaborado por los autores

Muestra promedio	FP (g)	CPS	(g) EPS	(g) Solvente (ml)	Fibras
1 (I, II, III)	0	54	60	150	CPS_5 milímetros
2 (IV, V, VI)	54	0	60	150	BF_40 x 2 mm
3 (VII, VIII, IX)	20	34	70	180	BF_40 x 2 mm CPS_1 a 3 mm
4 (X, XI, XII)	20	40	60	150	BF_40 x 2 mm CPS_1 a 3 mm
5 (XIII, XIV, XV)	20	40	60	150	BF_20 x 2 mm CPS_1 a 3 mm
6 (XVI, XVII, XVIII)	40	20	100	250	BF_40 x 2 mm CPS_1 a 3 mm

Los modelos se sometieron a un proceso de caracterización que incluyó pruebas físicas y mecánicas, y el análisis se realizó siguiendo las especificaciones de tableros de partículas descritas en la norma europea UNE-EN 312:2010 (AENOR, 2024) y la norma ecuatoriana INEN 3110 (Aguillón et al., 2024). En las propiedades físicas se determinó la densidad en base a la norma UNE-EN 323: 1994 (Benítez et al., 2013), la absorción de humedad según la norma UNE-EN 317: 1994 (Murthy, 2013), y la transmitancia térmica basada en la Norma ISO 8302:1991. En las pruebas mecánicas se evaluó la resistencia a la flexión determinando el módulo de ruptura (MOR, en inglés) y el módulo de elasticidad (MOE, en inglés), siguiendo las pautas de la UNE-EN 310: 1994. Finalmente, se evaluó la resistencia a la compresión de acuerdo con la UNE 56535:1977. Las pruebas mecánicas se realizaron en una máquina de prueba universal Shimadzu UH-F500kNX.

Se han considerado los parámetros estadísticos básicos para las diferentes propiedades estudiadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

DENSIDAD

Fibras de plátano y cáscaras de cacahuate; como la mayoría de la biomasa lignocelulósica (Karuppuachamy et al., 2024), tienen una densidad baja (Akcali et al., 2006). Esta propiedad intrínseca se transfiere al nuevo material compuesto y sus derivados. La incorporación de las fibras en el material compuesto puede generar porosidad adicional en la matriz y ser seguida por una disminución de la densidad, como Belkadi et al. estudiaron (Belkadi et al., 2018). Para determinar la densidad de los modelos prismáticos, a partir de la relación física entre masa y volumen, se obtuvo un valor promedio de 0,53 kg/m³ con una composición de 60% de EPS y 40% de agregados naturales (Tabla 2). El modelo I, hecho solo con cáscaras de cacahuate trituradas, que representaba



Figura 2. Muestras de 40 x 40 x 160 mm utilizadas para pruebas físicas y mecánicas (los números son la designación asignada a las muestras). Fuente: Elaborado por los autores

Tabla 2. Densidad de los prototipos. Fuente: Elaborado por los autores

Promedio de la muestra	Densidad (kg / m ³)	Desviación estándar
1	0,49	0,3321
2	0,52	0,6996
3	0,50	0,2356
4	0,55	0,9555
5	0,50	0,4545
6	0,64	0,1822

el 47% de su volumen, tenía la densidad más baja. Por otro lado, el híbrido modelo VI, que consta de 37% de fibras naturales y 63% de EPS, tuvo la densidad más alta. La incorporación de las fibras en el material compuesto puede generar porosidad adicional en la matriz, seguida de una disminución de la densidad. Las cáscaras de cacahuate son menos densas que las fibras de plátano.

ABSORCIÓN

La prueba de humedad se llevó a cabo siguiendo la Norma UNE-EN 317: 1994. Las muestras con menos poliestireno expandido y más fibras naturales absorbieron un mayor porcentaje de humedad (Tabla 3). El uso de EPS reduce significativamente la absorción de agua; sin embargo, cuando se usan como fibras naturales, se deben tener en cuenta los parámetros morfológicos en términos de su capacidad para absorber agua (Kesikidou y Stefanidou, 2019). La muestra VI logró el porcentaje de absorción más bajo de todas las muestras, con un valor del 10%, siguiendo la norma ecuatoriana INEN 3110 para tableros aglomerados en ambientes húmedos, que establece un valor máximo del 12%. La dosis más alta de EPS atrapa las fibras en el interior y las protege de agentes externos.

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La prueba de conductividad térmica sigue la norma ISO 8302:1991 utilizando el método de la placa caliente, que mide la conductividad térmica en el rango de 0,002 a 2500 W/m·K. Las pruebas se pueden llevar a cabo en un rango de temperatura de 10°C a 40°C, con una diferencia de 15° entre las placas. Se prepararon muestras que medían 200 x 200 x 30 mm para esta prueba. Todas las muestras mostraron baja conductividad térmica, demostrando el potencial aislante del material. Un mayor contenido de fibra dio como resultado una tasa de transferencia de calor más baja (Tabla 4). Los huecos de aire dentro de la matriz mejoran las propiedades de aislamiento, pero pueden reducir la resistencia mecánica del material.

Se observa una clara relación entre densidad y coeficiente de conductividad térmica, confirmando la influencia de la dosificación y tipología de cáscara / fibra en esta propiedad. Otra investigación confirma que las fibras vegetales y la adición de polímeros redujeron la conductividad térmica. (Mo et al., 2017; Zouaoui et al., 2021).

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

La prueba de flexión se realizó siguiendo la norma UNE-EN 310:1994. Esta prueba permite determinar el módulo de ruptura (MOR, en inglés), que es la tensión máxima que puede soportar la muestra antes de fracturarse, evaluando así las propiedades plásticas de los compuestos. También se determinó el módulo de elasticidad (MOE, en inglés), que es la fuerza promedio que puede soportar la muestra sin romperse y volver a su estado original, expresando la propiedad elástica del material (Tabla 5). Es importante tener en cuenta que los tratamientos de fibra y matriz tienden a mejorar el comportamiento mecánico de los compuestos de matriz cementosa (Laverde et al., 2022).

El valor de resistencia a la flexión más alto obtenido fue de 12 N/mm². Este resultado cumple con la norma ecuatoriana INEN 3110 para tableros aglomerados, que establece un valor mínimo de resistencia de 9 N/mm²; el valor MOE

Tabla 3. Absorción de humedad. Fuente: Elaborado por los autores

Promedio de la muestra	Absorción (%)	Desviación estándar
1	16	0.9631
2	20	0.2655
3	25	0.7851
4	21	0.0236
5	19	0.5999
6	10	0.1222

Tabla 4. Conductividad térmica. Fuente: Elaborado por los autores.

Promedio de la muestra	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m * K.)	Desviación estándar
1	0.49	0.062	0.2555
2	0.52	0.065	0.3694
3	0.50	0.083	0.9563
4	0.55	0.081	0.5844
5	0.50	0.085	0.2411
6	0.64	0.093	0.4922

Tabla 5. Resistencia a la flexión. Fuente: Elaborado por los autores.

Promedio de la muestra	MOR (N/mm ²)	Desviación estándar	MOE (N/mm ²)	Desviación estándar
1	4.20	0.9631	41.00	0.9102
2	5.10	1.0265	73.00	0.0658
3	4.26	0.9452	21.00	0.3599
4	4.60	1.1532	34.00	0.8425
5	4.85	0.9620	66.50	0.2261
6	12.00	1.2002	55.00	0.3102

Tabla 6. Resistencia a la compresión. Fuente: Elaborado por los autores.

Promedio de la muestra	Resistencia a la compresión (N/mm ²)	Desviación estándar
1	4.99	0.8864
2	5.00	0.9541
3	4.12	0.7500
4	4.44	0.8674
5	3.97	0.8551
6	8.60	0.8999

alcanzó 55 N/mm², demostrando su propiedad elástica antes de la deformación.

El MOR es la propiedad que ha mostrado la variación más significativa en los resultados.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Siguiendo la norma UNE 56535:1977, la prueba de compresión obtuvo la mayor resistencia a la compresión de 8,60 N/mm² con la dosis 6. Esta muestra contiene un mayor porcentaje de fibra de plátano (25%). El mayor porcentaje de fibra de plátano y el tamaño reducido de la cáscara de cacahuete probablemente influyeron en la mayor resistencia axial (Tabla 6).

Los resultados obtenidos proporcionan valores suficientes para el rendimiento esperado de un material de este tipo (Attia et al., 2022). Algunas investigaciones confirman que el pretratamiento alcalino mejora el rendimiento mecánico de la fibra en la prueba de compresión (Lamichhane et al., 2024a), mejorando las propiedades mecánicas del mortero con fibras de plátano cortas y delgadas: una alternativa sostenible a las fibras sintéticas (Ali et al., 2022; Lamichhane et al., 2024b).

La combinación de los dos tipos de residuos vegetales permite combinar el efecto granular de la cáscara de cacahuete con el efecto fibroso del residuo de plátano, reforzando así la influencia mutua en el comportamiento mecánico de los prototipos.

CONCLUSIONES

El producto desarrollado en este trabajo se diferencia de otros productos creados en investigaciones anteriores al utilizar un proceso completamente autónomo que evita el uso de resinas y equipos o herramientas sofisticados. Esta innovación permite a las comunidades implementar el proceso de producción localmente. Los resultados de las pruebas cumplen con los estándares y demuestran el potencial del material.

Las muestras elaboradas con fibras de plátano y cáscaras de cacahuete, aglomeradas con una solución de EPS, lograron una consistencia adecuada para las pruebas. Se adaptaron fácilmente a la forma del molde, lo que indica que el compuesto final podría adoptar diferentes formas. Las fibras naturales se pretrataron en una solución de NaOH para eliminar impurezas y aumentar la resistencia mecánica del producto final.

El porcentaje de absorción de agua oscila entre el 10 y el 25%. Los modelos con más fibras naturales y menos aglutinante tienen un alto porcentaje de absorción de agua. El modelo 6 tiene el porcentaje más bajo de absorción de agua. El contenido termoplástico en el compuesto puede proteger y aislar las fibras naturales de

la humedad, contribuyendo a la durabilidad del material. La conductividad térmica osciló entre 0,062 y 0,093 W/m·K. El mayor número de fibras naturales incorporadas en la matriz disminuye la conducción de calor. El modelo 6 alcanza un valor de conductividad de 0,093 W/m·K en comparación con las otras muestras. Este valor alcanzado se encuentra dentro del rango de materiales con propiedades aislantes. Es importante destacar la influencia de las fibras en esta propiedad.

La muestra 6 dio los mejores resultados de todas las muestras, logrando en la prueba de flexión un MOR de 12 N/mm², que determina la resistencia al esfuerzo de flexión antes de la fractura, el grado de plasticidad y un MOE de 55 N/mm², que determina la capacidad elástica del material antes de la deformación. La resistencia a la compresión fue de 8,60 N/mm². La resistencia a la flexión supera este valor, posiblemente debido a un efecto de desagregación durante la prueba, la longitud de las fibras y la reducción del tamaño de partícula de la cáscara de cacahuete. El aumento del contenido de polímero dio como resultado una tasa de absorción de agua del 10%, mejorando así la encapsulación y protección de las fibras.

Las fibras exhiben una unión interfacial robusta con el polímero (EPS disuelto), pero se observaron burbujas de aire dentro de las muestras. La presencia de burbujas de aire se redujo incorporando la cáscara de cacahuete en tamaños de partícula más pequeños, mejorando así la cohesión molecular en la matriz. Se recomienda aplicar una carga constante durante el proceso de secado. Además, la aplicación de calor contribuye a la consolidación del material, aunque este no era uno de los objetivos de la investigación.

Los resultados de las pruebas demuestran la efectividad de los componentes utilizados, incluidos los desechos de EPS, que se disolvieron para formar el conglomerado de matriz reforzado con fibras de cáscara de plátano y cacahuete. Los valores obtenidos cumplen con la norma ecuatoriana INEN 3110, basada en la norma UNE EN 312, para tableros aglomerados. Esto nos permite considerar que se pueden producir componentes de construcción livianos y duraderos con propiedades aislantes.

CONTRIBUCIONES DEL AUTOR – CREDIT

Conceptualización, E. E. M., V. F. A., J. J. M. D. R.; Curación de datos, E. E. M.; Análisis Formal, E. E. M., V. F. A., J. J. M. D. R.; Adquisición de Fondos; Investigación, E. E. M., V. F. A., J. J. M. D. R.; Metodología, V. F. A., J. J. M. D. R.; Gestión de Proyectos, V. F. A., J. J. M. D. R.; Recursos, E. E. M., V. F. A., J. J. M. D. R.; Software, E. E. M.; Supervisión, V. F. A., J. J. M. D. R.; Validación, V. F. A., J. J. M. D. R.; Visualización; Redacción-borrador original, E. E. M.; Redacción-revisión y edición, E. E. M., V. F. A., JJMDR.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a CITIUS de la Universidad de Sevilla por el uso de sus laboratorios para los análisis de caracterización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abd-Elrahman, M. H., Saad Agwa, I., Mostafa, S. A., & Youssf, O. (2023). Effect of utilizing peanut husk ash on the properties of ultra-high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 384, 131398. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131398>

Addis, L. B., Sendekie, Z. B., Habtu, N. G., Schubert, D. W., Roether, J. A., & Boccaccini, A. R. (2023). Characterization of False Banana Fiber as a Potential Reinforcement Material for Geopolymer Composites in B.H. Woldegiorgis, K. Mequanint, M.Z. Getie, E.G. Mulat, A. Alemayehu Assegie, (Eds), *Advancement of Science and Technology* . Green Energy and Technology (pp.49–63). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33610-2_3

Addis, L. B., Sendekie, Z. B., Habtu, N. G., Schubert, D. W., Roether, J. A., & Boccaccini, A. R. (2024). False banana fiber reinforced geopolymer composite – A novel sustainable material. *Ceramics International*, 50(13-Part b), 24442–24450. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2024.04.177>

AENOR. (2024). *UNE-EN 312:2010 | Normas AENOR*. Tableros de Partículas. Especificaciones. <https://tienda.aenor.com/norma-une-en-312-2010-n0046341>

Aguillón, B., Cabrera, D., Lazo, M., Adrián, E., Carrasco, M., Medina-Perilla, J., Vera-Villalobos, J., & Rigail-Cedeño, A. (2024). Sorbitol glycidyl ether Epoxy/Brewer's spent grain biocomposite for fiberboard applications. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100705. <https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2024.100705>

Ahmad, T., & Danish, M. (2018). Prospects of banana waste utilization in wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 206, 330–348. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2017.10.061>

Akcali, I. D., Ince, A., & Guzel, E. (2006). Selected Physical Properties of Peanuts. *International Journal of Food Properties*, 9(1), 25–37. <https://doi.org/10.1080/10942910500471636>

Akindapo, J. O., Binni, U. A., & Sanusi, O. M. (2015). Development of Roofing Sheet Material Using Groundnut Shell Particles and Epoxy Resin as Composite Material. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 4(6), 165–173. [https://www.ajer.org/papers/v4\(06\)/T04601650173.pdf](https://www.ajer.org/papers/v4(06)/T04601650173.pdf)

Akinyemi, B. A., & Dai, C. (2020). Development of banana fibers and wood bottom ash modified cement mortars. *Construction and Building Materials*, 241, 118041. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118041>

Ali, B., Azab, M., Ahmed, H., Kurda, R., El Ouni, M. H., & Elhag, A. B. (2022). Investigation of physical, strength, and

ductility characteristics of concrete reinforced with banana (Musaceae) stem fiber. *Journal of Building Engineering*, 61, 105024. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105024>

Attia, M. M., Al Sayed, A. A. K.-A., Tayeh, B. A., & Shawky, S. M. M. (2022). Banana agriculture waste as eco-friendly material in fibre-reinforced concrete: An experimental study. *Advances in Concrete Construction*, 14(5), 355–368. <https://doi.org/10.12989/acc.2022.14.5.355>

Balda, S., Sharma, A., Capalash, N., & Sharma, Prince. (2021). Banana fibre: a natural and sustainable bioresource for eco-friendly applications. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23, 1389–1401. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02041-y>

Belkadi, A. A., Aggoun, S., Amouri, C., Geuttala, A., & Houari, H. (2018). Effect of vegetable and synthetic fibers on mechanical performance and durability of Metakaolin-based mortars. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 32(15), 1670–1686. <https://doi.org/10.1080/01694243.2018.1442647>

Benítez, A. N., Monzón, M. D., Angulo, I., Ortega, Z., Hernández, P. M., & Marrero, M. D. (2013). Treatment of banana fiber for use in the reinforcement of polymeric matrices. *Measurement*, 46(3), 1065–1073. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2012.11.021>

Binici, H., & Aksogan, O. (2017a). Insulation material production from onion skin and peanut shell fibres, fly ash, pumice, perlite, barite, cement and gypsum. *Materials Today Communications*, 10, 14–24. <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2016.09.004>

Binici, H., & Aksogan, O. (2017b). Insulation material production from onion skin and peanut shell fibres, fly ash, pumice, perlite, barite, cement and gypsum. *Materials Today Communications*, 10, 14–24. <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2016.09.004>

Chattaviriya, P., Supawantanakul, D., Sangsirimongkolying, R., & Sua-lam, G. (2022). Banana Fibers as a Sustainable Acoustic Absorbing Materials: A Review. *Trends In Sciences*, 19(11), 4498. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.4498>

Chenrayan, V., Gebremariam, G., Shahapurkar, K., Mani, K., Fouad, Y., Kalam, M. A., Mubarak, N. M., Soudagar, M. E. M., & Abusahmin, B. S. (2023). Experimental and numerical assessment of the flexural response of banana fiber sandwich epoxy composite. *Scientific Reports*, 13(1), 18156. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45460-1>

FAOSTAT. (n.d.). *FAOSTAT*. Retrieved March 1, 2023, from <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>

Gatani, M., Argüello, R., & Sesín, S. (2010). Materiales compuestos de cáscaras de maní y cemento. Influencia de diferentes tratamientos químicos sobre las propiedades mecánicas. *Materiales de Construcción*, 60(298), 137–147. <https://doi.org/10.3989/MC.2010.46908>

Girimurugan, R., Shilaja, C., Pradeep, G. M., Maheskumar, P., & Augustin Santhiyagu, I. (2022). An experimental study on compressive properties of high-density polyethylene-nano alumina-groundnut shell hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 68(6), 2226–2232. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.08.437>

Guler, C., Copur, Y., & Tascioglu, C. (2008). The manufacture of particleboards using mixture of peanut hull (*Arachis hypogaea*

L.) and European Black pine (*Pinus nigra* Arnold) wood chips. *Bioresource Technology*, 99(8), 2893–2897. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2007.06.013>

Immanuel Durai Raj, J., Arun Vasantha Geethan, K., John Rajan, A., & Vijay Ananth, S. (2023). Characterization of epoxy resin-based banana fiber reinforced composite with waste CD powder filler. *Materials Today: Proceedings*, 90(1), 19–23. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.04.152>

ISO 8302:1991 - Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Guarded hot plate apparatus. (n.d.). Retrieved June 8, 2024, from <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/01/54/15422.html?browse=tc>

Jayaprabha, J. S., Brahmakumar, M. & Manilal, V. B. (2011). Banana Pseudostem Characterization and Its Fiber Property Evaluation on Physical and Bioextraction. *Journal of Natural Fibers*, 8(3), 149–160. <https://doi.org/10.1080/15440478.2011.601614>

Kalangi, C., Antony Prabu, D., Sujin Jose, A., & Jani, S. P. (2022). Experimental characterization of banana fiber reinforced polyester composites. *Materials Today: Proceedings*, 60(3), 2236–2239. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.03.232>

Karuppuchamy, A., Ramya, K., y Silva, R. (2024). Novel banana core stem fiber from agricultural biomass for lightweight textile applications. *Industrial Crops and Products*, 209, 117985. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117985>

Kesikidou, F., & Stefanidou, M. (2019). Natural fiber-reinforced mortars. *Journal of Building Engineering*, 25, 100786. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100786>

Korniejenko, K., Frączek, E., Pytlak, E., & Adamski, M. (2016). Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers. *Procedia Engineering*, 151, 388–393. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.07.395>

Kumar, P. S., Pushpavalli, S., Keran, D. A., Shuprajhaa, T., Sivananth, C., Renganathan, R., Kandallu Jayaraman, J., Balakrishnan, P., & Uma, S. (2022). Deciphering functional characteristics and in-vitro bioactive properties of banana central core stem powder. *Food Chemistry*, 397, 133828. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.133828>

Lamichhane, N., Lamichhane, A., & Gyawali, T. R. (2024). Enhancing mechanical properties of mortar with short and thin banana fibers: A sustainable alternative to synthetic fibers. *Heliyon*, 10(10), e30652. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2024.E30652>

Laverde, V., Marin, A., Benjumea, J. M., & Rincón Ortiz, M. (2022). Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review. *Construction and Building Materials*, 340, 127729. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127729>

Martínez, C., & Laines, J. (2013). POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) Y SU PROBLEMÁTICA AMBIENTAL. Kuxulcab, Revista de Divulgación, 19(36), 63-. <https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a19n36.339>

Mendes, C. O. B., & de Araújo Nunes, M. A. (2022). Acoustic performance of the banana pseudostem fiber.

Applied Acoustics, 191, 108657. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2022.108657>

Mo, K. H., Bong, C. S., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., & Yap, S. P. (2017). Thermal conductivity, compressive and residual strength evaluation of polymer fibre-reinforced high volume palm oil fuel ash blended mortar. *Construction and Building Materials*, 130, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.005>

Preethi, P., & Murthy, B. G. (2013). Propriétés physiques et chimiques des fibres de banane extraites de cultivars commerciaux de bananes cultivés dans l'État du Tamilnadu, *Agrotechnologie*. <https://doi.org/10.4172/2168-9881.S11-008>

Nguyen, T. A., & Nguyen, T. H. (2021). Banana Fiber-Reinforced Epoxy Composites: Mechanical Properties and Fire Retardancy. *International Journal of Chemical Engineering*, 2021(1), 1973644. <https://doi.org/10.1155/2021/1973644>

Ogunsile, B. O., & Oladeji, T. G. (2016). Utilization of banana stalk fiber as reinforcement in low-density polyethylene composite, *Revista Materia*, 21(4), 953–963. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160004.0088>

Poletto, M., Dettenborn, J., Zeni, M., & Zattera, A. J. (2011). Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour. *Waste Management*, 31(4), 779–784. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2010.10.027>

Prabhakar, M. N., Shah, A. U. R., Rao, K. C., & Song, J. Il. (2015). Mechanical and thermal properties of epoxy composites reinforced with waste peanut shell powder as a bio-filler. *Fibers and Polymers*, 16, 1119–1124. <https://doi.org/10.1007/s12221-015-1119-1>

Prem Chand, R., Ravitej, Y. P., Chandrasekhar, K. M., Adarsha, H., Shivamani Kanta, J. V., Veerachari, M., Ravi Kumar, R., & Abhinandan. (2021). Characterization of banana and E glass fiber reinforced hybrid epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*, 46(18), 9119–9125. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.05.402>

Ramprasath, B., Murugesan, R., Banerjee, A., Anand, A., & Shashank. (2020). A Comparative Study of Sandwich and Hybrid Sandwich Composites using Jute and Kevlar Fibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 912(5), 052031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/912/5/052031>

Ramu, S., Senthilkumar, N., & Deepanraj, B. (2023). Experimental investigation on alkali-treated (NaOH) groundnut shell (*Arachis hypogaea* L.) and rick husk (*Oryza sativa*) particle epoxy hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.03.171>

Sada, B. H., Amartey, Y. D., & Bakoc, S. (2013). An Investigation into the use of groundnut as fine aggregate replacement. *Nigerian Journal of Technology*, 32(1), 54–60. <https://www.ajol.info/index.php/njt/article/view/87225>

Saravanan, A. K., Rajendra Prasad, A., Muruganandam, D., Saravanan, G., Vivekanandan, S., & Sudhakar, M. (2020). Study on natural fiber composites of jute, pineapple and banana compositions percentage of weight basis for thermal resistance and thermal conductivity. *Materials Today: Proceedings*, 37(2), 147–151. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.04.662>

Sathiparan, N., Anburuvel, A., & Selvam, V. V. (2023). Utilization of agro-waste groundnut shell and its derivatives in sustainable construction and building materials – A review. *Journal of Building Engineering*, 66, 105866. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.105866>

Segura, D., Noguez, R., & Espín, G. (2007). Contaminación ambiental y bacterias productoras de plásticos biodegradables. *Biotecnología*, 14, 361-371. https://www.researchgate.net/profile/Raul-Noguez/publication/242144167_Contaminacion_ambiental_y_bacterias_productoras_de_plasticos_biodegradables/links/565cc57f08aefe619b253fd3/Contaminacion-ambiental-y-bacterias-productoras-de-plasticos-biodegradables.pdf

Senthilkumar, K., Siva, I., Rajini, N., Winowlin Jappes, J. T., & Siengchin, S. (2018). Mechanical characteristics of tri-layer eco-friendly polymer composites for interior parts of aerospace application. *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, 35–53. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102131-6.00003-7>

UNE 56535:1977. (2017, Retrieved June 8, 2024,). *Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de la resistencia a la compresión axial.*, from <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0006021>

UNE-EN 196-1:2018. (2018, Retrieved June 8, 2024). Métodos de ensayo de cementos. *Parte 1: Determinación de resistencias.* <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060675>

UNE-EN 310:1994 (2019, Retrieved June 8, 2024). *Tableros derivados de la madera. Determinación del modulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión. (Versión oficial EN 310:1993).* <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0008516>

UNE-EN 317: 1994. (1994, Retrieved June 8, 2024). Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la hinchazón en espesor después de inmersión en agua. (Versión oficial EN 317:1993). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0008533>

UNE-EN 323: 1994. (1994, Retrieved June 8, 2024). Tableros derivados de la madera. Determinación de la densidad. (Versión oficial EN 323:1993). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0008540>

Wongsa, A., Kunthawatwong, R., Naenudon, S., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2020). Natural fiber-reinforced high calcium fly ash geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 241, 118143. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118143>

Zaaba, N. F., & Ismail, H. (2018). A Review on Peanut Shell Powder Reinforced Polymer Composites. 58(4), 349–365. <https://doi.org/10.1080/03602559.2018.1471720>

Zouaoui, Y., Benmahiddine, F., Yahia, A., & Belarbi, R. (2021). Hygrothermal and Mechanical Behaviors of Fiber Mortar: Comparative Study between Palm and Hemp Fibers. *Energies*, 14(21), 7110. <https://doi.org/10.3390/en14217110>

INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE PROTECCIONES SOLARES EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN CLIMAS ÁRIDOS TEMPLADOS FRÍOS, MENDOZA, ARGENTINA

Recibido 27/09/2024
 Aceptado 13/12/2024

INFLUENCE OF SOLAR SHADING DESIGN PARAMETERS ON ENERGY EFFICIENCY IN COLD ARID TEMPERATE CLIMATES, MENDOZA, ARGENTINA

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DESIGN DAS PROTEÇÕES SOLARES NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM CLIMAS ÁRIDOS FRIOS E TEMPERADOS, MENDOZA, ARGENTINA

Alicia Betman

Arquitecta
 Becaria Doctoral del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-6765-8323>
abetman@mendoza-conicet.gob.ar (Autor de Correspondencia)

Julieta Balter

Doctora en Arquitectura
 Investigador Asistente del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-7785-8465>
jbalter@mendoza-conicet.gob.ar

Stella Maris Donato

Doctora en Ciencias Matemáticas
 Profesional Asistente del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0009-0003-2435-1358>
sdonato@mendoza-conicet.gob.ar

Carolina Ganem

Doctora en Arquitectura
 Investigadora Independiente del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-1431-1219>
cganem@mendoza-conicet.gob.ar



RESUMEN

El sector de la construcción tiene un impacto significativo en el consumo energético global y en las emisiones de carbono. A pesar de los avances tecnológicos y de materiales, el rendimiento energético de los edificios depende principalmente de las decisiones de diseño arquitectónico. Este estudio evalúa cómo las configuraciones de sistemas de protección solar afectan los consumos energéticos de calefacción, refrigeración e iluminación en un box de estudio ubicado en un clima árido templado frío. Los resultados muestran que la proporción ventana-pared (WWR) y la orientación absoluta son factores determinantes en el consumo energético. Se observó un incremento del 16% en el consumo de refrigeración y del 13% en iluminación con el aumento progresivo del WWR. Además, la demanda de calefacción aumentó en torno al 18% según la orientación. Estos hallazgos destacan la importancia de ajustar las variables de diseño para optimizar la eficiencia energética de los edificios.

Palabras clave

protecciones solares, simulación paramétrica, eficiencia energética, clima árido templado frío

ABSTRACT

The construction sector has a significant impact on global energy consumption and carbon emissions. Despite technological and material advances, the energy performance of buildings primarily depends on architectural design decisions. This study evaluates how solar protection system configurations affect energy consumption for heating, cooling, and lighting in a study box in an arid, temperate, cold climate. The results show that the window-to-wall ratio (WWR) and absolute orientation are key factors in energy consumption. A 16% increase in cooling consumption and a 13% increase in lighting were observed with the progressive increase of the WWR. Additionally, depending on the orientation, heating demand increased by approximately 18%. These findings highlight the importance of adjusting design variables to optimize the energy efficiency of buildings.

Keywords

solar shading, parametric simulation, energy efficiency, cold temperate arid climate

RESUMO

O setor de construção exerce um impacto significativo no consumo global de energia e nas emissões de carbono. Apesar dos avanços em tecnologia e materiais, o desempenho energético dos edifícios depende principalmente das decisões de projeto arquitetônico. Este estudo avalia como as configurações de sistemas de proteção solar afetam os consumos de energia de aquecimento, resfriamento e iluminação em um box de estudo localizado em um clima árido temperado frio. Os resultados mostram que a proporção janela-parede (WWR) e a orientação absoluta são fatores determinantes no consumo energético. Um aumento de 16% no consumo de resfriamento e de 13% em iluminação foi observado com o aumento progressivo da WWR. Além disso, a demanda de aquecimento aumentou em cerca de 18%, dependendo da orientação. Essas descobertas destacam a importância de ajustar as variáveis de projeto para otimizar a eficiência energética dos edifícios.

Palavras-chave:

proteção solar, simulação paramétrica, eficiência energética, clima árido temperado e frio

INTRODUCCIÓN

El ámbito de la edificación es uno de los mayores responsables del consumo energético y las emisiones de carbono, lo que agrava la crisis ambiental global. Este impacto se intensifica debido al crecimiento poblacional proyectado, que alcanzará un 68% para el año 2050, según la International Energy Agency [IEA] (2021). Este aumento genera una mayor demanda de recursos energéticos, que ejercen presión sobre las infraestructuras existentes (IPCC, 2023). Las edificaciones con envolventes térmicamente ineficientes incrementan el consumo energético necesario para alcanzar condiciones de confort térmico, lo que contribuye al aumento de emisiones globales y a la dependencia de recursos no renovables. Un aspecto crítico es el desempeño térmico de las aberturas, que influyen en las ganancias y pérdidas de calor. Las ventanas, además de cumplir funciones estéticas y permitir ventilación e iluminación, son sistemas constructivos clave para el control de la radiación solar. La entrada de radiación solar puede reducir el consumo energético asociado con calefacción en climas fríos y mejorar el confort térmico y visual de los ocupantes (Ghosh y Neogi, 2018). No obstante, un diseño inadecuado puede generar deslumbramiento, aumento de la demanda de refrigeración o mayor dependencia de iluminación artificial. Esto destaca la importancia de diseñar ventanas y sistemas de protección solar optimizados, adaptados a las condiciones climáticas de cada región (Kaasalainen et al., 2020; Kirimtat et al., 2016). En este contexto, las protecciones solares y las tecnologías avanzadas de control de radiación son fundamentales para gestionar eficientemente el flujo de energía solar.

Dentro de la arquitectura sostenible, las estrategias pasivas para el diseño de envolventes son clave para mejorar el rendimiento energético de las construcciones. Estas estrategias, que consideran parámetros como ventanas y protecciones solares, buscan identificar configuraciones óptimas mediante simulaciones energéticas y estudios observacionales (Bustamante & Encinas 2012). Las herramientas de simulación permiten evaluar sistemáticamente el impacto de distintos parámetros en el comportamiento térmico de las edificaciones, lo que proporciona información crítica para decisiones desde las etapas iniciales del diseño arquitectónico. El análisis de correlación, una metodología estadística sólida, es útil para comprender cómo los parámetros de diseño influyen en el consumo energético de los edificios. A diferencia del análisis de sensibilidad, que evalúa la respuesta ante cambios, la correlación permite cuantificar la intensidad y dirección de las relaciones entre variables sin implicar causalidad (Zou et al., 2003). Este enfoque facilita la identificación de patrones entre variables como el porcentaje de área acristalada (WWR) y la orientación de las ventanas, que proporcionan información valiosa para estrategias de diseño bioclimático (Alanís-Navarro et al., 2017). Estas metodologías son herramientas

fundamentales al evaluar cómo interactúan los factores en la eficiencia energética.

Aunque diversos estudios han explorado el diseño de ventanas y protecciones solares mediante simulaciones computacionales, el uso del análisis de correlación para identificar relaciones complejas entre parámetros de diseño y consumo energético sigue siendo limitado. Investigaciones como las de Koç y Maçka Kalfa (2021), Dabbagh y Krarti. (2022), Khidmat et al. (2021), Mangkuto, et al. (2021) y Nazari et al. (2023) han aportado perspectivas valiosas, pero no profundizan en la identificación de relaciones entre múltiples variables. Betman et al. (2023) realizaron un análisis sobre cómo ciertos parámetros geométricos afectan las demandas energéticas y obtuvieron primeras aproximaciones alentadoras. En este artículo se abordarán metodologías adicionales que exploran un enfoque específico de correlación profundizando el trabajo en esta área de vacancia, enfocándose principalmente en la ciudad de Mendoza, ubicada en el centro oeste de la República Argentina.

El análisis de correlación puede contribuir significativamente a optimizar parámetros de diseño como el WWR y las protecciones solares. Permite un entendimiento profundo de cómo estos elementos impactan los requerimientos energéticos, al facilitar el desarrollo de estrategias adaptadas a las condiciones climáticas locales. Además, fortalece la capacidad de las edificaciones para enfrentar los desafíos ambientales, como el cambio climático y la escasez de recursos renovables.

El Área Metropolitana de Mendoza (32° 40' Latitud Sur, 68° 51' Longitud Oeste) y categorizada como BWk (templado árido frío) según la clasificación de Köppen, presenta una temperatura media anual de 17°C. Sus veranos son calurosos y secos, con temperaturas de hasta 39°C, y los inviernos fríos, con mínimas de -6°C. Las variaciones térmicas diarias, que oscilan entre 10°C y 20°C, y una radiación solar anual elevada resaltan la necesidad de un análisis climático detallado para diseñar edificaciones que respondan a las particularidades climáticas y sociales de la región.

Las proyecciones climáticas futuras sugieren un aumento de las temperaturas medias, especialmente en verano, lo que resalta la urgencia de implementar medidas de mitigación y adaptación, como estrategias de sombreado pasivo y tecnologías de enfriamiento para reducir la dependencia de sistemas mecánicos (Dirección Nacional de Escenarios y Planeamiento Energético, 2019; Servicio Meteorológico Nacional, 2023; IPCC, 2023).

A partir de lo expuesto, este trabajo explora la relación entre los parámetros de diseño edilicio y los factores que influyen en el comportamiento energético en climas áridos templados fríos, como el de Mendoza. A través

de un análisis de correlación, que busca identificar y cuantificar cómo los parámetros de diseño de ventanas y protecciones solares impactan en los requerimientos de energía para refrigeración, calefacción e iluminación, con el objetivo de optimizar su rendimiento.

METODOLOGÍA

DEFINICIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN Y PARÁMETROS DE ESTUDIO

Se propone el trabajo con un espacio interior cuyas dimensiones corresponden a las unidades de vivienda del plan de desarrollo para Mendoza del Instituto Provincial de la Vivienda, tipología ampliamente reproducida en los últimos 10 años. La misma consiste en un dúplex, desarrollado en dos plantas. El ambiente seleccionado para este estudio corresponde al dormitorio. En consecuencia, el box queda conformado en un área de 3.00 m por 3.00 m con una altura de 2.70 m.

En la Tabla 1 se especifican las características termo-físicas de los materiales típicos utilizados en la construcción en la región. Durante el modelado energético dinámico en el software EnergyPlus, el patrón de construcción se asocia con estos materiales y se conecta a una única zona térmica. La misma está delimitada por uno de los muros en contacto con el exterior que incluye una ventana. El resto de la envolvente térmica horizontal y vertical se considera adiabática. Este planteo permite el análisis de espacios interiores en edificios de altura. En la Tabla 1 se caracterizan los materiales de los muros, piso y techo. La

ventana es de abrir y tiene un marco de aluminio. El vidrio es simple de 3mm. $U = 5,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

En este estudio, se trabaja con dispositivos de control solar en forma de parasoles compuestos por lamas verticales y horizontales. Los parámetros evaluados se definen a continuación:

- Relación ventana-pared (WWR, por sus siglas en inglés, Window-to-Wall Ratio): Representa el porcentaje de área acristalada respecto al área total de la fachada. Para este análisis, se consideró un rango de WWR entre el 30% y el 90%, con intervalos del 10%. No se incluyeron valores menores al 30%, ya que limitarían la evaluación del impacto de las variables relacionadas con la iluminación.
- Orientación: Se analizaron orientaciones que reciben radiación solar directa, incluyendo tres ángulos principales: 0° para el norte, 90° para el este, y -90° para el oeste. También se consideraron dos posiciones intermedias: $+45^\circ$ (noreste) y -45° (noroeste).
- Disposición de las lamas: El sistema de protección solar incluye lamas modulares separadas equidistantemente. Se plantearon dos configuraciones: lamas dispuestas de forma horizontal (valor 0 en el software) y vertical (valor 1 en el software).
- Ángulo de inclinación de las lamas: Se evaluaron tres configuraciones: posición horizontal (0°), inclinación intermedia (15°) e inclinación pronunciada (30°). El valor de 0° actúa como barrera básica contra la radiación solar. La inclinación de 15° ofrece un equilibrio entre eficiencia solar y estética. Finalmente, la inclinación de 30° proporciona mayor sombreado, mejorándose la protección solar sin afectar la funcionalidad ni el diseño visual.

Tabla 1. Características termo-físicas del modelo de estudio. Fuente: Elaboración de los Autores.

MATERIALES MÁSCOS							MATERIALES NO MÁSCOS
Construcción	Capas	Rugosidad	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor Específico	Resistencia térmica
			(m)	(W/m°C)	(Kg/m3)	(J/kg °C)	(m2-K/W)
Muro exterior	Revoque	Rugoso	0.025	1.16	1800	1000	
	Ladrillo	Medio Rugoso	0.2	0.81	1600	835	
	Revoque	Rugoso	0.025	1.16	1800	1000	
	Yeso	Suave	0.02	0.4	800	840	
Piso	Contrapiso	Rugoso	0.12	0.78	1600	780	
	Carpeta	Rugoso	0.12	0.78	1600	780	
Cubierta	Membrana						0.55
	Carpeta	Rugoso	0.12	0.78	1600	780	
	Lana mineral	Medio Rugoso	0.05	0.031	50	750	
	Machimbre	Medio Rugoso	0.25	0.11	600	1380	

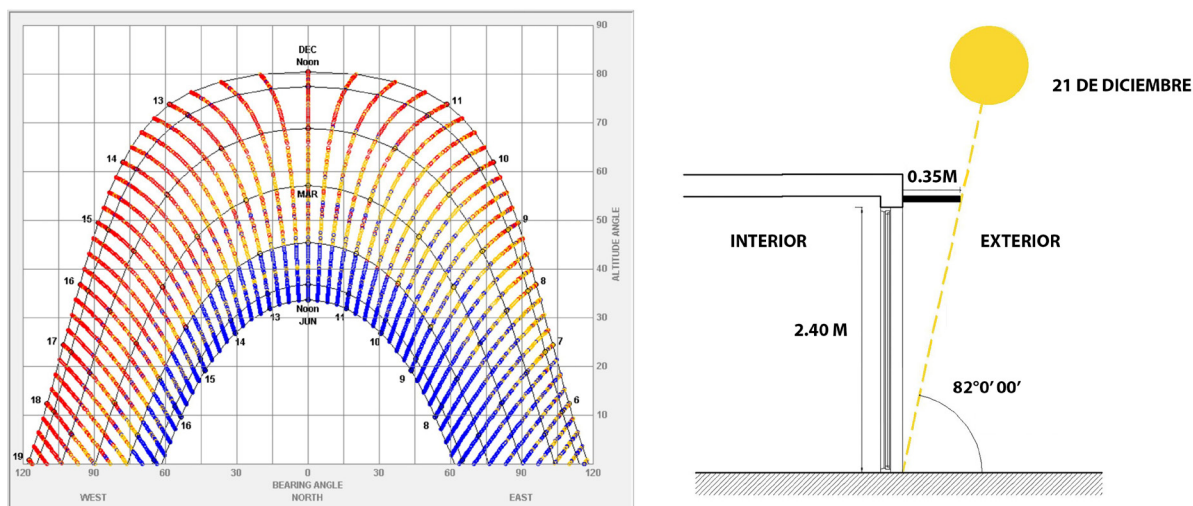


Figura 1. (a) Ángulos solares para la localidad de Mendoza a través del software Climate Consultant, (b) Cálculo del ángulo solar. Fuente: Elaboración de los Autores.



Figura 2. Condiciones variables del modelo. Fuente: Elaboración de los Autores.

Tabla 2. Condiciones fijas del modelo estudiado. Fuente: Elaboración de los Autores.

Condición fija	Parámetro	Descripción	Valores	Comentarios
	Termostato Invierno	Temperatura establecida según Estándar ASHRAE 55	21°C	Ropa típica de invierno (0.9 clo) en actividad sedentaria
	Termostato Verano	Temperatura establecida según Estándar ASHRAE 55	26°C	Ropa típica de verano (0.5 clo) en actividad sedentaria
	Demanda de Iluminación	Setpoint de iluminación en un punto central a 0.80 m del piso	500 lx	Esquema de uso diurno (8:00 - 23:00 h) con 4 W/m ² ; sin considerar ganancias internas
	Tasa de Infiltración	Renovación del aire por hora	1 renovación por hora	Constante

- Profundidad de las lamas: Se utilizó el gráfico de sombreado del software Climate Consultant (Figura 1). Se seleccionó el ángulo solar correspondiente a las 12:00 hora solar del 21 de diciembre año, para conocer la máxima altura solar y, por ende, el mínimo requerimiento de profundidad de la protección. Para la localidad de Mendoza el valor de este ángulo corresponde a 82°. En consecuencia, se realizó el cálculo correspondiente, teniendo en consideración la situación más desfavorable, representada por una abertura con un WWR del 90 %. El resultado arrojó una profundidad inicial de 0.35 m, la que se incrementó en rangos de 0.10 m, que alcanzó un máximo de 0.55 m, siguiendo criterios tanto estéticos como funcionales.
- Espaciado entre lamas: Los valores de espaciado fueron proporcionales a los de la profundidad, para mantener criterios estéticos y funcionales.
- Distancia de la protección solar respecto al acristalamiento: Se evaluaron tres escenarios: (1) el dispositivo junto al vidrio (distancia 0.00 m), (2) una distancia intermedia de 0.10 m, y (3) una distancia máxima de 0.20 m.

En la Figura 2 se presenta un esquema gráfico de las variables de entrada empleadas en el análisis paramétrico, lo que permitió evaluar las distintas configuraciones de diseño.

Para la creación del modelo, se empleó el software de diseño paramétrico Grasshopper en conjunto con el visualizador Rhinoceros 3D, se utilizó una licencia educativa de tres meses. En cuanto al análisis energético, se integraron los complementos Ladybug y Honeybee, los que permiten la importación de datos climáticos a partir de archivos Energy Plus Weather Data (EPW) y posibilitan la ejecución de cálculos mediante motores reconocidos

como EnergyPlus, Daysim y Radiance. Adicionalmente, se utilizó la interfaz gráfica de OpenStudio, que conecta el modelo tridimensional con la biblioteca de herramientas de simulación, que asigna las propiedades necesarias al modelo 3D para llevar a cabo las simulaciones. Al Configurar los termostatos y los setpoints, se buscó determinar las demandas energéticas correspondientes a refrigeración, calefacción e iluminación. Todas expresadas en (kWh/m²/año).

La Tabla 2 presenta las condiciones fijas utilizada para la simulación energética del modelo. Estas condiciones incluyen los termostatos de invierno y verano, así como consideraciones sobre la demanda de iluminación y la tasa de infiltración de aire.

ESTUDIO DE CORRELACIÓN

Este estudio busca identificar y cuantificar las relaciones entre diferentes variables de entrada y sus impactos en las salidas del sistema. Para automatizar la iteración del análisis -es decir, la repetición del proceso, y registrar todos los valores de las posibles combinaciones, se utilizó el complemento TTTtoolbox. Este complemento permitió evaluar todas las combinaciones posibles, con un total de 5670, y analizar la incidencia de cada variable mediante un análisis de correlación. Este análisis se realizó con el software R y posteriormente se procesó en Microsoft Excel.

El análisis de correlación se llevó a cabo para los ejes de parasoles horizontales y verticales. Se evaluó la adecuación de la medida de correlación seleccionada mediante la comprobación de la distribución de las variables cuantitativas en cada eje, para verificar si se ajustaban a una distribución normal multivariada.

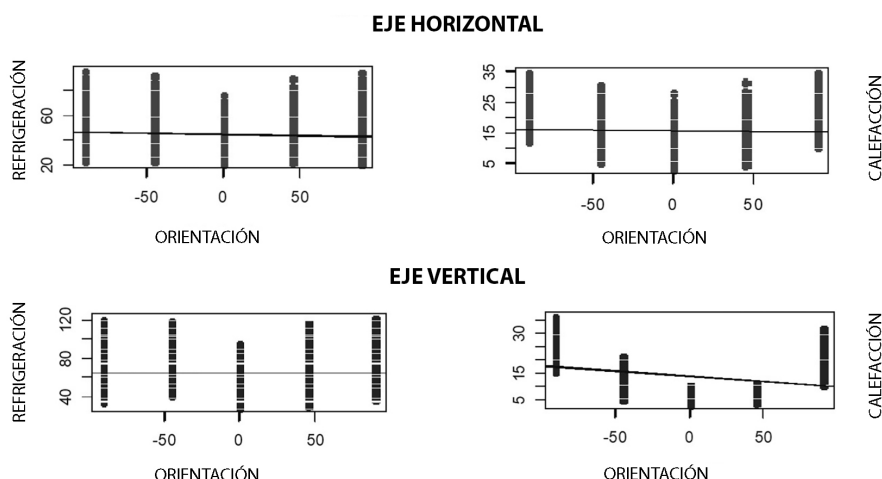


Figura 3. Valores de correlación del parámetro orientación. Fuente: Elaboración de los Autores.

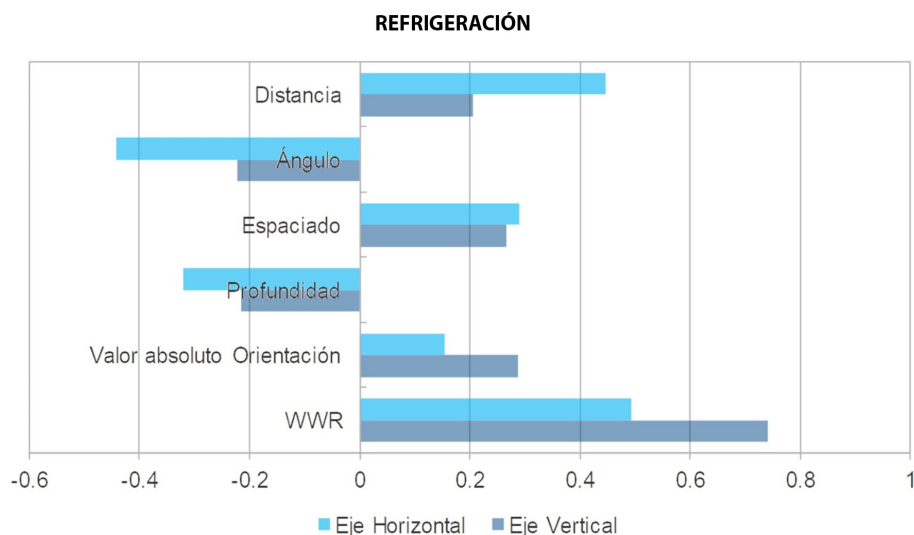


Figura 4. Estudio de correlación de refrigeración. Fuente: Elaboración de los Autores

Para evaluar la compatibilidad con esta distribución, se realizaron las pruebas de Mardia (1970), Henze y Zirkler (1990) y Doornik y Hansen (2008). Los resultados de estas pruebas indican que las variables estudiadas no siguen una distribución normal conjunta, sugiriendo que las suposiciones necesarias para aplicar pruebas paramétricas basadas en la normalidad no se cumplen. Esta falta de normalidad cuestiona la validez de pruebas como la t de Student o el análisis de varianza (ANOVA), que requieren datos normalmente distribuidos. Por lo tanto, se optó por utilizar el coeficiente de correlación de Spearman (1961). para evaluar las relaciones entre las variables de interés (refrigeración, calefacción e iluminación) y los parámetros definidos en el estudio (WWR, orientación, profundidad, espaciado, ángulo y distancia). Este coeficiente no depende de supuestos sobre la distribución de los datos y es adecuado para datos no normalmente distribuidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, es importante destacar que, durante el proceso de análisis de los parámetros de estudio se observó una situación particular con la orientación. Se evidenció un patrón significativo en los requerimientos en calefacción y refrigeración: tanto los valores extremadamente altos como los extremadamente bajos de la orientación (es decir, en las orientaciones Este y Oeste) resultan en un incremento en los requerimientos energéticos del edificio. Este fenómeno se manifiesta, a través de correlaciones débiles que resalta la importancia de considerar el valor absoluto de la orientación al estudiar su impacto en la demanda energética. Esto se puede observar en la Figura 3.

Al enfocarse en el valor absoluto de la orientación, se observa un aumento notable en la magnitud de los

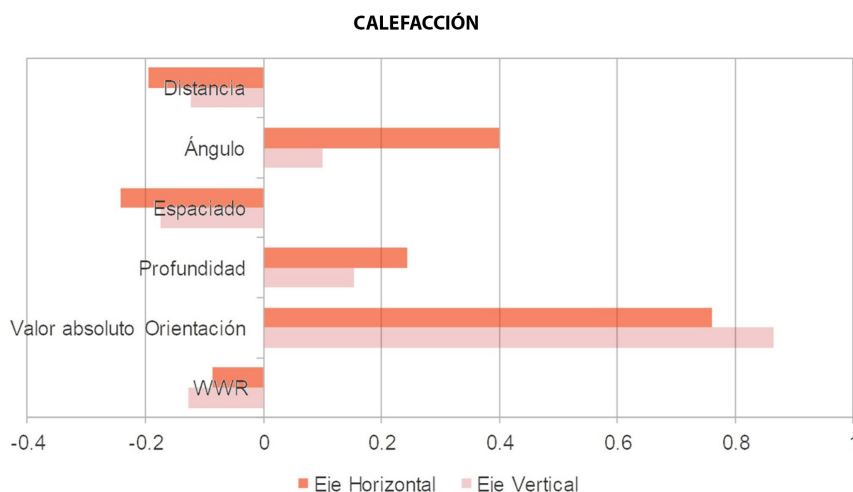


Figura 5. Estudio de correlación de calefacción. Fuente: Elaboración de los Autores

coeficientes estimados, acompañado por un cambio de signo. Esto implica que tanto la refrigeración como la calefacción, -y esta última aún de forma más marcada-, tienden a aumentar a medida que la orientación se mueve hacia los valores extremos, es decir cuando se mueve hacia la derecha (acercándose al 90) en el rango positivo $[0, 90]$ y cuando se mueve a la izquierda (acercándose al -90) en el rango negativo. Estos hallazgos, subrayan la influencia significativa de la orientación en los requerimientos energéticos del edificio. Por ejemplo, los edificios orientados hacia el este (con orientaciones en el rango de $[0, 90]$) o hacia el oeste (con orientaciones en el rango de $[-90, 0]$) presentan mayores necesidades de calefacción y refrigeración en comparación con aquellos orientados hacia el norte (orientación cercana a 0).

A continuación, se presentan los resultados del estudio de correlación que se muestran en la Figura 4, Figura 5 y Figura 6 los gráficos correspondientes a las variables de refrigeración, calefacción e iluminación.

En primer lugar, se observa que en las iteraciones realizadas la disposición de los parasoles, ya sea horizontal o vertical, no afecta la relación entre los parámetros en estudio y las necesidades energéticas. Por ejemplo, en refrigeración, una mayor proporción de área de ventana respecto a la pared (WWR) incrementa las demandas energéticas, independientemente de si los parasoles son verticales u horizontales. A medida que aumenta la profundidad de los dispositivos, las demandas disminuyen. Estas relaciones se reflejan en las correlaciones observadas, ya sean positivas o negativas. Sin embargo, cada disposición de parasoles genera variaciones en las demandas, como se muestra en la extensión de la barra correspondiente. También se observa que las variables de calefacción, e iluminación, coinciden en la influencia de los parámetros sobre las demandas energéticas, mientras que, para refrigeración, la influencia es inversa. Por ejemplo, un aumento en la distancia de los parasoles se traduce en mayores requerimientos

energéticos para calefacción e iluminación, mientras que, para refrigeración, los requerimientos disminuyen. Esto se debe a que una mayor distancia permite una mayor entrada de radiación solar, reduciendo la necesidad de iluminación artificial y calefacción.

Otro aspecto relevante del análisis es que el parámetro WWR emerge como el más influyente en las demandas de refrigeración e iluminación. Un incremento en el tamaño de las ventanas conlleva a mayores requerimientos de refrigeración debido al mayor ingreso de la radiación solar, al mismo tiempo que disminuye la demanda de iluminación por la mayor entrada de luz natural. Este fenómeno sugiere que las ventanas de grandes dimensiones pueden incrementar significativamente la carga de refrigeración durante los meses más cálidos, mientras que reducen la necesidad de iluminación artificial durante el día.

Además, es importante destacar que la relación entre la orientación absoluta y la calefacción presenta una correlación alta, lo que indica una conexión fuerte y directa entre estos factores. En contraste, la relación entre la orientación absoluta y la refrigeración muestra una correlación moderada con tendencia a baja, sugiriendo una conexión menos pronunciada. Asimismo, la relación entre la orientación absoluta y la iluminación presenta una correlación baja, que indica una conexión más débil entre estos factores.

En cuanto al diseño de los parasoles, se destacan varias correlaciones significativas respecto a la variable de refrigeración tanto en la disposición horizontal como en la vertical. En la disposición horizontal, la refrigeración muestra correlaciones negativas significativas con el ángulo de inclinación de los parasoles y la profundidad. Estas correlaciones sugieren que aumentos en estos parámetros de diseño de los parasoles se relacionan con reducciones en los requerimientos de refrigeración debido al mayor sombreado que producen. Por ejemplo,

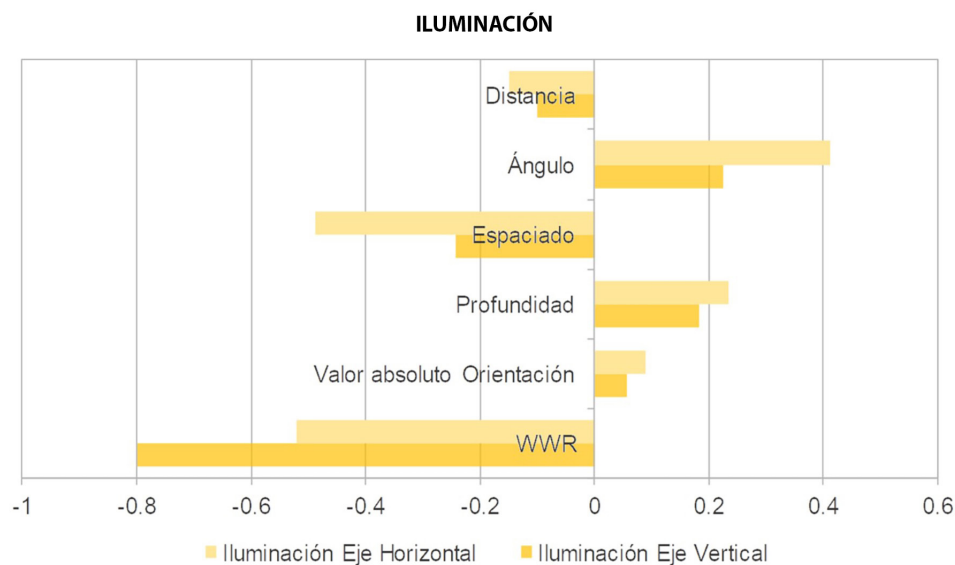


Figura 6. Estudio de correlación de iluminación. Fuente: Elaboración de los Autores

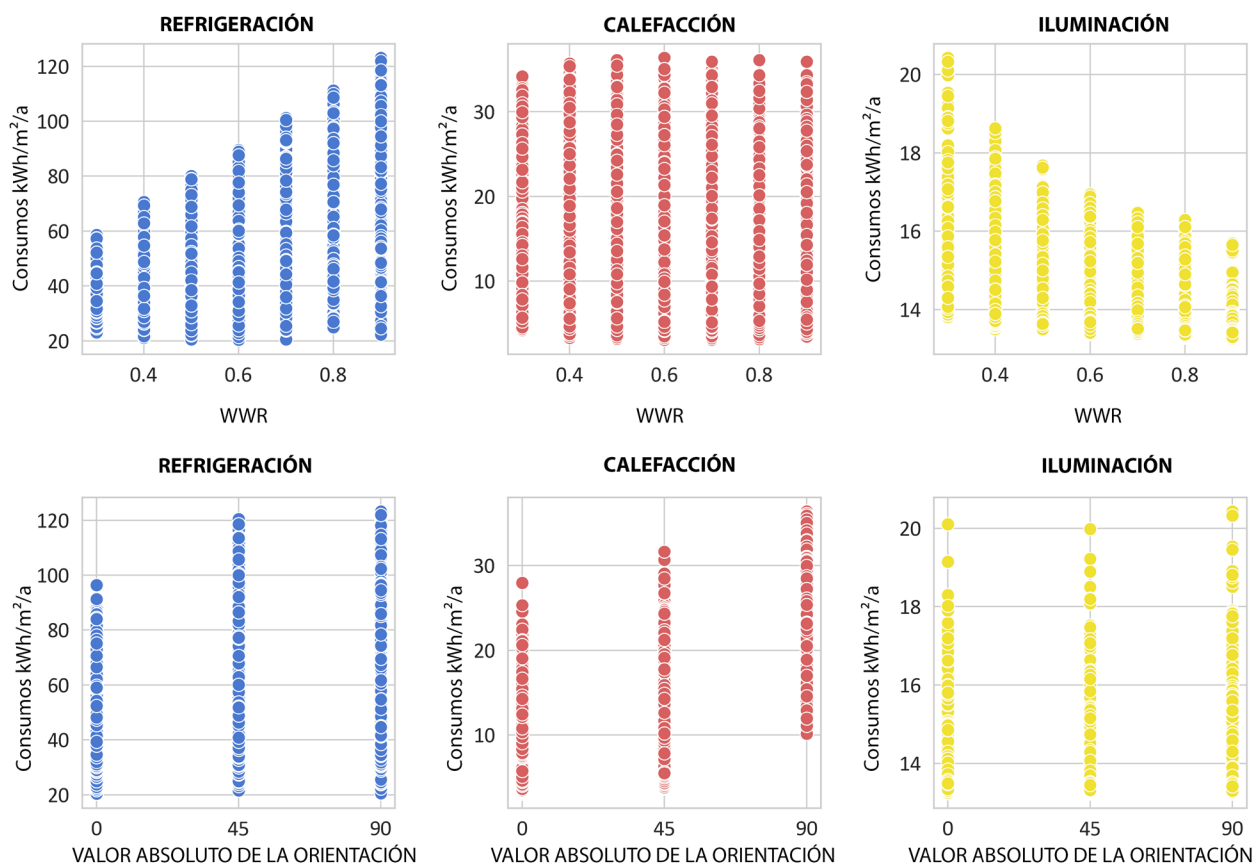


Figura 7. Valores de consumos energéticos de los parámetros más influyentes. Fuente: Elaboración de los Autores.

cuando aumentan la profundidad y el ángulo de las lamas de los parasoles, el área de sombra es mayor, y, en consecuencia, la demanda de refrigeración tiende a ser menor.

Por otro lado, se encuentran correlaciones positivas significativas entre la variable de refrigeración y los parámetros WWR, espaciado y distancia de los parasoles, lo que indica que incrementos en estos parámetros están asociados con aumentos en los requerimientos de refrigeración debido a la disminución de la superficie de protección solar. Por ejemplo, cuando aumenta el área de la ventana (WWR), el espaciado entre las lamas del parasol y la distancia entre éste y la abertura, el área de sombra tiende a reducirse, lo que incrementa la demanda de refrigeración porque la radiación solar no está siendo bloqueada eficientemente.

Finalmente, las variables de calefacción e iluminación muestran correlaciones distintas con varios factores. Se destacan correlaciones negativas significativas con la relación ventana-pared (WWR), orientación, espaciado y distancia, lo que indica que un incremento en estas variables conlleva una mayor entrada de radiación solar, que resulta en una disminución en las demandas de calefacción e iluminación. En contraste, se observan correlaciones positivas significativas con la profundidad y el ángulo, que indican que aumentos en estas variables se asocian con incrementos en calefacción e iluminación debido al aumento del área de sombreado.

El análisis presentado destaca la influencia significativa del WWR (relación ventana-pared) y la orientación absoluta como variables determinantes en los requerimientos energéticos de los edificios, particularmente en lo que respecta a las demandas de refrigeración, calefacción e iluminación. Los gráficos de la Figura 7 evidencian que un acrecentamiento en el WWR provoca un aumento considerable en el consumo energético de refrigeración ($\text{kWh/m}^2\cdot\text{a}$) debido a un incremento en las ganancias solares, mientras que simultáneamente reduce la demanda de iluminación artificial debido a la mayor penetración de luz natural. Esta intensidad en el WWR se relaciona con un incremento del 16% en refrigeración y del 13% en iluminación. En lo que respecta a la calefacción, se observa una ampliación aproximada del 18% asociado a la orientación. Los gráficos inferiores de la figura muestran que las orientaciones extremas ($\pm 90^\circ$) están relacionadas con mayores demandas energéticas, mientras que las orientaciones cercanas a 0° (norte) presentan menores requerimientos energéticos.

CONCLUSIONES

En el contexto de la problemática ambiental global, comprender las correlaciones entre los diferentes requerimientos energéticos en las edificaciones de la ciudad de Mendoza, Argentina es esencial. Este estudio

revela que los patrones de consumo para calefacción e iluminación están estrechamente relacionados, mientras que la refrigeración muestra una relación inversa. Esta dinámica sugiere que los ajustes en un área pueden tener un impacto significativo en las demás, al afectar la eficiencia energética y el consumo total. Si bien el análisis se basa específicamente en el clima de Mendoza, la metodología es replicable en otras regiones para evaluar factores en distintos contextos climáticos. Estos hallazgos constituyen los primeros pasos hacia diseños más optimizados, permitiendo avanzar en estrategias que equilibren de manera eficiente las demandas energéticas en edificaciones.

Durante las iteraciones realizadas, se observa que la disposición de los parasoles, ya sean horizontales o verticales, no altera la relación entre los parámetros de diseño y las necesidades energéticas, aunque la fuerza de esta relación varía para cada eje, como lo indican los valores del coeficiente. En cuanto a la orientación, los requerimientos energéticos aumentan a medida que se desvía de la dirección ideal. Específicamente, los edificios orientados hacia el este o el oeste requieren más energía en comparación con aquellos orientados hacia el norte. Este ajuste afecta directamente a los sistemas de calefacción, refrigeración e iluminación, siendo particularmente relevante el caso de la calefacción. Se observa un incremento aproximado del 18% de aumento del intervalo asociado a la orientación. Que evidencia que, las orientaciones extremas ($\pm 90^\circ$) están relacionadas con mayores demandas energéticas, mientras que las orientaciones cercanas a 0° (norte) presentan menores requerimientos energéticos.

El análisis de los parámetros de diseño revela que la relación ventana-pared (WWR) juega un papel crucial en las demandas de refrigeración e iluminación. Se encuentra una correlación positiva entre el WWR y las demandas de refrigeración, lo que indica que un aumento en el tamaño de las ventanas amplía la necesidad de refrigeración debido a una mayor entrada de radiación solar. Sin embargo, esta mayor radiación reduce la necesidad de iluminación artificial, ya que se aprovecha mejor la luz natural, que evidencia una correlación negativa con las demandas de iluminación. Estos hallazgos constatan el incremento del 16% en refrigeración y del 13% en iluminación en los intervalos de consumos.

Las correlaciones negativas entre la demanda de refrigeración y parámetros como el ángulo y la profundidad de las protecciones solares sugieren que un aumento en estos factores reduce la necesidad de refrigeración al proporcionar mayor sombra. En contraste, las correlaciones positivas encontradas entre la refrigeración y factores como el WWR, el espaciado y la distancia de los parasoles, así como la orientación de éstos, indican que un incremento en estos parámetros está asociado con mayores necesidades de refrigeración. Esto se debe a que una menor protección solar permite

una mayor entrada de radiación solar, lo que acrecienta la demanda de refrigeración.

Por otro lado, se encontraron correlaciones negativas significativas entre la calefacción e iluminación y el WWR, así como el espaciado y la distancia de los parasoles. Estos resultados indican que un aumento en estas variables favorece una mayor entrada de radiación solar, reduciendo las demandas de calefacción e iluminación. En contraste, las correlaciones positivas con la orientación absoluta, la profundidad y el ángulo de los parasoles sugieren que un aumento en estos parámetros está asociado con mayores demandas debido al incremento del área de sombreado.

En cuanto a las limitaciones del trabajo, se observa que, si bien el estudio examina varios factores del diseño de las protecciones solares, su enfoque es principalmente geométrico, lo que limita la consideración de las características materiales, como las del vidrio y las protecciones solares en sí mismas. Esta restricción abre la posibilidad de futuros estudios que profundicen en estos aspectos materiales.

En resumen, este análisis en climas templados con alta exposición solar ofrece una base sólida para proyectar edificaciones más sostenibles, reduciendo el consumo energético y los costos operativos. Además, proporciona información valiosa para la toma de decisiones durante las etapas iniciales del proceso de diseño.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

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

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a las siguientes fuentes de financiamiento: ANPCYT FONCYT PICT 2019-02752 (2021-2024) "Desarrollo de un protocolo normalizado de auditoría térmica y energética puntual aplicable para climas cálidos como herramienta confiable, no invasiva, de alta replicabilidad y bajo costo, que contribuya a la certificación energética de viviendas"; CONICET PIP 11220200101711CO (2021-2023) "Hábitat sustentable y resiliencia al Cambio Climático" y PUE INAHE 2017-0096 (2018-2025) "I+D+i en Eficiencia Energética y Ambiental del Hábitat Humano".

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alanís-Navarro, J. A., Casarrubias-Bahena, D., Alanís-Cantú, R., y Lavín-Delgado, J. E. (2017). Correlación y regresión lineal de variables climatológicas para el diseño de ecotecnologías y arquitectura bioclimática. *Revista de Arquitectura y Diseño*, 1(2), 1–12. https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Arquitectura_y_Diseño/vol1num2/Revista_de_Arquitectura_y_Dise%C3%B1o_V1_N2_1.pdf

Betman, A., Balter, J., Hongn, M., y Ganem, C. (2023). Estudio paramétrico de sistemas de parasoles para reducción del consumo energético en climas con alta heliofanía. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 27, 45–55. <https://portalderrevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/4592>

Bustamante, W., y Encinas, F. (2012). Parámetros de diseño y desempeño energético en edificios de clima mediterráneo. *ARQ (Santiago)*, 82, 116–119. <https://doi.org/10.4067/S0717-69962012000300020>

Dabbagh, M., y Krarti, M. (2022). Experimental evaluation of the performance for switchable insulated shading systems. *Energy and Buildings*, 256, 111753. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111753>

Dirección Nacional de Escenarios y Planeamiento Energético. (2019). Escenarios Energéticos 2030. Buenos Aires: Secretaría de Energía, Ministerio de Hacienda. http://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/planeamiento/2019-11-14_SsPESGE_Documento_Escenarios_Energeticos_2030_ed2019_pub.pdf

Doornik, J. A., y Hansen, H. (2008). An omnibus test for univariate and multivariate normality. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 70(s1), 927–939. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.2008.00537.x>

Ghosh, A., y Neogi, S. (2018). Effect of fenestration geometrical factors on building energy consumption and performance evaluation of a new external solar shading device in warm and humid climatic condition. *Solar Energy*, 169, 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.025>

Henze, N., y Zirkler, B. (1990). A class of invariant consistent tests for multivariate normality. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 19(10), 3595–3617. <https://doi.org/10.1080/03610929008830400>

International Energy Agency [IEA]. (2021). Building Envelopes. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/building-envelopes>

IPCC. (2023). Statement on the 'Climate Change 2023: Synthesis Report', 20 March 2023. https://reliefweb.int/report/world/statement-climate-change-2023-synthesis-report-20-march-2023?gad_source=1

Kaasalainen, T., Mäkinen, A., Lehtinen, T., Moisio, M., y Vinha, J. (2020). Architectural window design and energy efficiency: Impacts on heating, cooling and lighting needs in Finnish climates. *Journal of Building Engineering*, 27, 100996. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100996>

Khidmat, R. P., Fukuda, H., Kustiani, y Wibowo, A. P. (2021). Designing louvers toward optimum daylight performance in Indonesia: a parametric study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 907(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/907/1/012012>

Kirimtat, A., Koyunbaba, B. K., Chatzikonstantinou, I., y Sariyildiz, S. (2016). Review of simulation modeling for shading devices in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 23–49. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.020>

Koç, S. G., y Maçka Kalfa, S. (2021). The effects of shading devices on office building energy performance in Mediterranean climate regions. *Journal of Building Engineering*, 44, 102653. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102653>

Mangkuto, R. A., Koerniawan, M. D., Apriliyanthi, S. R., Lubis, I. H., Atthailah, Hensen, J. L. M., y Paramita, B. (2021). Design Optimisation of Fixed and Adaptive Shading Devices on Four Façade Orientations of a High-Rise Office Building in the Tropics. *Buildings*, 12(1), 25. <https://doi.org/10.3390/buildings12010025>

Mardia, K. V. (1970). Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications. *Biometrika*, 57(3), 519–530. <https://doi.org/10.2307/2334770>

Nazari, S., Keshavarz Mirza Mohammadi, P., y Sareh, P. (2023). A multi-objective optimization approach to designing window and shading systems considering building energy consumption and occupant comfort. *Engineering Reports*, 5(10), 1–39. <https://doi.org/10.1002/eng2.12726>

Servicio Meteorológico Nacional. (2023). Estado del clima en Argentina 2022. <https://repositorio.smn.gob.ar/handle/20.500.12160/2378#:~:text=El%202022%20fue%20levemente%20m%C3%A1s,oto%C3%B1o%20e%20inicio%20del%20invierno.>

Spearman, C. (1961). The proof and measurement of association between two things. In J. J. Jenkins & D. G. Paterson (Eds.), *Studies in individual differences: The search for intelligence* (pp. 45–58). Appleton-Century-Crofts.

Zou, K. H., Tuncali, K., y Silverman, S. G. (2003). Correlation and simple linear regression. *Radiology*, 227(3), 617- 628. <https://doi.org/10.1148/radiol.2273011499>

ANÁLISIS TÉRMICO DE MUROS DE QUINCHA ALIVIANADA PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DE DISEÑO EN ARGENTINA

THERMAL ANALYSIS OF LIGHTWEIGHT WATTLE AND DAUB WALLS FOR DIFFERENT DESIGN TEMPERATURES IN ARGENTINA

ANÁLISE TÉRMICA DE PAREDES DE PAU A PIQUE LEVE PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DE PROJETO NA ARGENTINA

Maria Guadalupe Cuitiño-Rosales

Doctora en Ciencias Exactas
 Investigador Adjunta del Instituto de Ingeniería y Ciencias Aplicadas a la Industria (ICAI)
 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo), San Rafael, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-0021-5648>
gcuitino@mendoza-conicet.gob.ar (Autor de Correspondencia)

Alejandro Domínguez

Diseñador Gráfico
 Subgerencia Operativa de Transferencia Tecnológica Gerencia de Desarrollo Tecnológico e Innovación.
 Coordinador de la línea de trabajo de Bioarquitectura en el Área Tecnologías Sustentables
 Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), San Martín, Argentina
<https://orcid.org/0009-0005-2415-6741>
adominguez@inti.gob.ar

Gabriel Vaccaro

Licenciado en Comunicación
 Coordinador de la Mesa estratégica de cannabis medicinal y cáñamo industrial
 Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), San Martín, Argentina
<https://orcid.org/0009-0007-6906-7798>
gvaccaro@inti.gob.ar

Victoria Di-Cesare

Diseñadora Industrial
 Responsable del área de Diseño Industrial y Sustentable, Subgerencia Regional Cuyo
 Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), San Martín, Argentina
<https://orcid.org/0009-0002-3715-6490>
vdicesare@inti.gob.ar



RESUMEN

Se analiza el comportamiento térmico de los muros de quinchá liviana en distintas zonas bioclimáticas de Argentina, que surgen como una alternativa sustentable frente a otros materiales de construcción. Se determinaron experimentalmente las conductividades térmicas del relleno de quinchá (0.07 W/mK) y del revoque (0.34 W/mK), obteniendo una transmitancia térmica global de $0.79 \text{ W/m}^2\text{K}$ para muros de 15.6 cm de espesor. A partir de mediciones in situ en una vivienda, se demostró la capacidad de los muros de quinchá liviana para mantener estabilidad térmica interior, con amplitudes térmicas significativamente menores respecto del exterior. El análisis comparativo con ladrillos macizos y ladrillos huecos concluyó que los muros de quinchá requieren menores espesores para alcanzar niveles de aislamiento óptimos, adaptándose a diversas zonas bioclimáticas. Esta técnica constructiva permite la replicabilidad en el contexto argentino, destacándose por su eficiencia térmica, sostenibilidad y confort interior, con oportunidades futuras para explorar su resistencia al fuego.

Palabras clave

quinchá, conductividad térmica, confort interior.

ABSTRACT

The thermal performance of lightweight wattle and daub walls is analyzed in different bioclimatic zones of Argentina, presenting them as a sustainable alternative to other construction materials. The thermal conductivities of the wattle and daub (0.07 W/mK) and plaster (0.34 W/mK) infill were experimentally determined, yielding an overall thermal transmittance of $0.79 \text{ W/m}^2\text{K}$ for walls with a thickness of 15.6 cm . In situ measurements conducted in a dwelling demonstrated the ability of lightweight wattle and daub walls to maintain interior thermal stability with significantly lower thermal amplitude than outside. A comparative analysis with solid and hollow bricks concluded that wattle and daub walls require less thickness to achieve optimal insulation levels, making them suitable for different bioclimatic zones. This construction technique is replicable within the Argentinian context, with its thermal efficiency, sustainability, and indoor comfort standing out, with future opportunities to explore its fire resistance.

Keywords

wattle-and-daub, thermal conductivity, indoor comfort.

RESUMO

Analisou-se o desempenho térmico de paredes de pau a pique leve (em espanhol quinchá alivianada) em diferentes zonas bioclimáticas da Argentina, que surgem como uma alternativa sustentável a outros materiais de construção. As condutividades térmicas do enchimento de pau a pique ($0,07 \text{ W/mK}$) e do reboco ($0,34 \text{ W/mK}$) foram determinadas experimentalmente, obtendo-se uma transmitância térmica geral de $0,79 \text{ W/m}^2\text{K}$ para paredes de $15,6 \text{ cm}$ de espessura. Com base em medições in situ em uma casa, foi demonstrada a capacidade das paredes de pau a pique leve para manter a estabilidade térmica interna, com amplitudes térmicas significativamente menores em comparação com o exterior. A análise comparativa com tijolos maciços e tijolos ocos concluiu que as paredes de pau a pique exigem menos espessura para atingir níveis ideais de isolamento, adaptando-se a diversas zonas bioclimáticas. Esta técnica de construção permite a replicabilidade no contexto argentino, destacando-se por sua eficiência térmica, sustentabilidade e conforto interior, com oportunidades futuras para explorar sua resistência ao fogo.

Palavras-chave:

pau a pique, condutividade térmica, conforto interno.

INTRODUCCIÓN

La aislación térmica en los muros perimetrales de las viviendas ha tomado relevancia creciente en la construcción sostenible y eficiente desde el punto de vista energético (Zhao et al., 2020; Sánchez Azócar, 2011). Dado que el territorio argentino abarca regiones con climas tan diversos como los fríos de la Patagonia y los calurosos de la región Chaqueña (Matteucci, 2012; IRAM 11603, 2012), la implementación de soluciones de aislación térmica se vuelve fundamental para el confort de los ocupantes y la eficiencia energética¹ de las construcciones. La capacidad aislante de los cerramientos opacos influye directamente en el confort térmico interior² de las viviendas, al retener el calor en invierno y mantenerse frescas en verano. Este comportamiento impacta en el consumo de energía para calefacción y refrigeración, los costos operativos, y la huella de carbono de las construcciones (Muñoz et al., 2012). Por ello, analizar la conductividad térmica³ (λ) de los materiales resulta esencial para reducir el impacto ambiental y mejorar la eficiencia energética de los edificios (Castillo et al., 2019). El coeficiente de transmisión térmica (K), es una medida de la capacidad de un material o de una estructura para transferir calor (García León, Flórez-Solano, y Espinel Blanco, 2017). En el contexto de los muros, esta propiedad es crucial porque determina cuánto calor se pierde o se gana, a través de los cerramientos. Un valor bajo de K indica que el muro es un buen aislante y tiene un menor flujo de calor.

Numerosos estudios han investigado diversas estrategias para mejorar la eficiencia energética de los edificios, Rey y Velasco (2006) en su trabajo proponen estrategias prácticas para mejorar este comportamiento mediante auditorías detalladas y certificaciones normativas, en que destacan la importancia del análisis de consumo, la optimización de sistemas, de materiales, y la implementación de tecnologías sostenibles, que fomentan edificios más eficientes y ambientalmente responsables (Rey Martínez y Velasco Gómez, 2006). Asdrubali et al. (2015), examina los materiales no convencionales que promueven la eficiencia energética en edificios, que subrayan su importancia para zonas climáticamente diversas (Asdrubali et al., 2015). Zhao et al. (2020) en su trabajo, propone el uso de fibras naturales como alternativas

viabiles a los plásticos en sistemas de aislamiento (Zhao et al., 2020). Mientras que Lakatos (2022) resalta el potencial de los materiales como aerogeles y paneles de vacío por su alto rendimiento térmico. Zhovkva (2020), expone la experiencia internacional en el diseño de complejos multifuncionales sostenibles, que destacan los principios fundamentales del diseño orientados a lograr eficiencia energética y respeto al medio ambiente (Zhovkva; 2020). Estos trabajos muestran la importancia de abordar de manera integral los distintos tipos de materiales disponibles en el mercado, que muestran la importancia de realizar investigaciones integrales que comparen la conductividad térmica de una amplia gama de materiales de construcción y su impacto combinado en el confort y el consumo energético.

Una vivienda bien aislada minimiza el flujo de calor entre el interior y el exterior (Vanhoutteghem y Svendsen, 2014), lo que significa que el gasto energético está significativamente influenciado por la capacidad aislante de los materiales utilizados en la construcción. En climas fríos, un buen comportamiento de los cerramientos reduce la necesidad de calefacción, mientras que, en climas cálidos, disminuye la necesidad de refrigeración, esto se traduce en una reducción en la demanda de recursos. Buratti et al. (2021) destaca la relevancia de integrar soluciones sostenibles en contextos climáticos extremos.

Un ambiente interior con buena regulación térmica contribuye al bienestar físico y psicológico de los habitantes (González Couret, y Véliz Párraga, 2016). Las fluctuaciones térmicas pueden causar estrés y problemas de salud, en particular, una vivienda bien aislada ayuda a proteger a los residentes de las temperaturas extremas, lo que es crucial para los grupos vulnerables como niños, ancianos y personas con condiciones de salud preexistentes. Un estudio en Nueva Zelanda, (Howden-Chapman et al., 2007). mostró que mejorar el acondicionamiento adentro de las viviendas, redujo los problemas respiratorios y las hospitalizaciones, especialmente en personas con condiciones preexistentes como asma o infecciones respiratorias recurrentes. Las viviendas aisladas también mostraron una mejora en la percepción de bienestar general de los residentes). Investigaciones en Corea del Sur (Ham,

1 Eficiencia Energética: es la capacidad de un sistema, material o construcción para minimizar las pérdidas de calor y optimizar el uso de energía. Se relaciona con el aislamiento térmico, transmitancia térmica y diseño eficiente, que reduce el consumo energético necesario para calefacción o refrigeración, y promoviendo confort térmico y sostenibilidad ambiental. (Kreith y Goswami, 2007).

2 Confort Térmico Interior: es la percepción de bienestar térmico en un espacio cerrado, donde las personas no sienten ni frío ni calor excesivos. Una vivienda mal aislada puede presentar temperaturas interiores extremas, tanto frías en invierno como calurosas en verano. Depende de factores como temperatura del aire, humedad, velocidad del viento, radiación térmica, actividad física y ropa, son cruciales para la salud, productividad y bienestar. (Forgiarini Rupp, Giraldo Vásquez y Lamberts, 2015)

3 Conductividad térmica: es una propiedad física, intrínseca de los materiales, que mide la capacidad de conducción de calor. (IRAM 11601, 2002)

Lee y Kim, 2024) destacaron que los estándares de aislamiento en edificios afectan significativamente las temperaturas interiores y los riesgos de enfermedades relacionadas con el calor, las viviendas con aislamiento deficiente tienen más probabilidades de superar los umbrales críticos de temperatura, especialmente en zonas rurales y edificios antiguos sin controles de mantenimiento. La Organización Mundial de la Salud, OMS, (World Health Organization [WHO], 2018) subraya que un buen aislamiento térmico no sólo mejora el confort interior, sino que también reduce enfermedades respiratorias y cardiovasculares asociadas con temperaturas extremas.

La investigación y desarrollo en el campo de los materiales de construcción avanza constantemente, con el objetivo de encontrar soluciones que sean más duraderas y sostenibles. Los materiales naturales están siendo redescubiertos y adaptados con nuevas técnicas de procesamiento para mejorar sus propiedades aislantes sin comprometer su sostenibilidad.

En Argentina actualmente hay 60 Ordenanzas municipales que permiten la construcción con tierra en diversas técnicas (Red Protierra Argentina, 2024), una de las más utilizadas en cerramientos es la quincha⁴ en sus diversas variantes: muros de quincha prefabricada con relleno de una mezcla de barro arcilloso de consistencia plástica y fibras vegetales de una densidad mayor a la quincha liviana húmeda⁵ (Cuitiño Rosales, Maldonado y Esteves Miramont, 2014), muros de quincha liviana húmeda, donde el relleno es de fibras vegetales sumergidas en una lechada de tierra arcillosa, comúnmente llamada barbotina (Acevedo Oliva et al., 2017). La propuesta de estudiar la técnica quincha liviana se originó en el marco del Ciclo participativo de hábitat sustentable del Alto Valle, en el norte de la región patagónica de Argentina. Se firmó un convenio de colaboración y vinculación interinstitucional entre siete entidades: Municipalidad de Allen (Río Negro), Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Río Negro, Colegio de Arquitectos de la provincia de Neuquén y el Colegio de Arquitectos de Río Negro.

El empleo de materiales naturales para la construcción de muros tiene diferentes ventajas, entre las principales

se encuentra el desempeño térmico. A partir de ensayos normalizados se determinó la conductividad térmica de probetas a escala, construidas con la técnica quincha liviana, siendo de gran relevancia este dato para poder realizar estudios de construcciones con esta técnica, al igual que se habilita la opción de poder comparar térmicamente a los cerramientos de quincha liviana con otros materiales industrializados que se utilizan comúnmente en la construcción tradicional.

OBJETIVO

El trabajo evalúa el desempeño térmico de los muros de quincha liviana como alternativa sustentable en la construcción de viviendas, analizar su capacidad de aislamiento térmico y comparar con materiales como ladrillos macizos y ladrillos cerámicos huecos. Determinar las propiedades térmicas del relleno y del revoque, a través de ensayos normalizados y mediciones in situ en una vivienda. Se definen los espesores de muros de quincha liviana necesarios para cumplir con los valores normativos de transmitancia térmica⁶ en diversas zonas bioclimáticas de Argentina con el propósito de validar su viabilidad.

METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo se centra en la caracterización térmica de los componentes del muro de quincha liviana y su análisis comparativo frente a materiales convencionales. En primer lugar, se realizaron ensayos normalizados con método de placa caliente para determinar las conductividades térmicas del relleno y del revoque. Las probetas se fabricaron con mezclas de suelo arcilloso, fibras vegetales y agua, siguiendo procesos de secado y acondicionamiento higrotérmico controlados. Posteriormente, se evaluó la transmitancia térmica global del muro de manera teórica, de acuerdo con normativas nacionales. Asimismo, se analizó una vivienda construida con esta técnica en la ciudad de Belén de Escobar, situada a 50 Km al norte de la Capital Federal, ciudad de Buenos Aires, Argentina, se registraron mediciones higrotérmicas en el propio lugar. Finalmente, se establecieron los espesores de muros, necesarios para cumplir con las Normas IRAM en diferentes zonas bioclimáticas, que validen la eficiencia térmica del sistema.

⁴ Quincha: Sistema constructivo en el que los muros están conformados por una estructura de madera, que, a su vez, contiene un tejido de caña o carrizo, y el que es finalmente recubierto con barro (Cuitiño et al., 2015).

⁵ Quincha Liviana húmeda: Es aquella quincha que posee de relleno fibras vegetales sumergidas en una lechada de tierra arcillosa (barbotina), también conocida como tierra alivianada con paja o barro-paja liviano. (Acevedo Oliva et al., 2017)

⁶ Transmitancia térmica: flujo de calor que pasa por unidad de superficie del elemento y por grado de diferencia de temperatura entre los dos ambientes separados por dicho elemento. Se expresa en $W/(m^2 \times K)$. Es la relación de la conductividad térmica de todos los materiales que componen el sistema y sus espesores. (Acevedo Oliva et al., 2017)



Figura 1: Probeta para ensayo térmico: a) Relleno liviano, b) Revoque de tierra. Fuente: Elaboración de los autores

Tabla 1. Acondicionamiento térmico de las probetas a ensayar. Fuente: Elaboración de los autores.

Denominación	Tiempo de secado [Hs]	Masa de la probeta [Kg]			Cambio relativo de la masa de la probeta [%]		
		M1	M2	M3	mr	mc	md
Probeta 1 relleno liviano	216	9.20	7.25	7.31	26.90	25.85	0.83
Probeta 2 relleno liviano		9.00	7.11	7.13	26.58	26.23	0.28
Probeta 1 revoque	288	43.00	41.89	41.95	2.65	2.50	0.14
Probeta 2 revoque		41.92	41.15	41.20	1.87	1.75	0.12

ANÁLISIS DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Para obtener en forma experimental los valores de conductividad térmica del relleno de paja de baja densidad y del revoque de tierra más pesado y de mayor densidad, se realizaron ensayos normalizados en INTI (ISO 8302, 1991); American society for testing and materials [ASTM] C177 (2013); IRAM 11559 (1995). Para su realización se construyeron dos probetas de relleno liviano y dos probetas de revoque, todas de dimensiones 60 cm x 60 cm x 8 cm de espesor.

Ambas mezclas se prepararon con un suelo previamente caracterizado en laboratorio, donde se obtuvo que la composición es: arena 17%, limo 40% y arcilla 43%, lo que se clasificó como suelo arcilloso-limoso. Para la elaboración de las probetas de relleno se mezcló el 50% de suelo arcilloso caracterizado con 50% de agua, se dejó hidratar durante tres días, luego se batió con un mezclador eléctrico hasta disolver los grumos presentes. A este suelo en estado líquido se lo denomina barbotina. Luego se mezclaron 72 litros de barbotina con un fardo de 13.16 kg de fibras de rastrojo de trigo, *Triticum aestivum*, hasta lograr que todas las fibras estén humedecidas y cubiertas con la barbotina, pero al apretarlas no debe escurrir líquido y no puede contener terrones de barro. Con esta mezcla se rellenaron dos moldes de madera haciendo un poco de presión para que se mantenga compacta. Una vez secas las probetas se retiró el molde de madera, Figura 1a.

La segunda parte del sistema constructivo es el revoque de tierra, es decir, la mezcla encargada de cubrir el relleno liviano

de paja de trigo como la estructura de madera, en ambas caras del muro. Las proporciones del revoque consisten en: una parte de suelo, una parte de agua, dos partes de rastrojo de trigo cortado (máximo 5cm de longitud) y dos partes de arena, con esta mezcla de barro se llenó el molde hasta los 7.5 cm, luego se completaron los 8 cm de espesor con una terminación de revoque fino para lograr que las superficies sean planas y paralelas en ambas caras de la probeta, para que las placas de ensayo se puedan apoyar en forma correcta en toda la superficie. Para la terminación del fino se utilizó una parte de suelo tamizado por una malla de 1mm x 1mm, dos partes de arena tamizada y una parte de agua, Figura 1b.

Las cuatro probetas se dejaron secar a la intemperie durante 20 días y luego se trasladaron al laboratorio para la realización del ensayo. Se dispusieron en un ambiente de temperatura y humedad controlada para el acondicionamiento higrotérmico. Se determinó el peso inicial de la probeta (M1), luego, se inició el proceso de secado a una temperatura de 60° C, hasta que se verificó la constancia en la masa (M2). Seguidamente se dejó aclimatar a 23°C en la estufa (M3), hasta alcanzar un equilibrio higrotérmico.

CAMBIO DE MASA.

Se calcula el cambio relativo de masa de la probeta luego del proceso de secado (m_i) (Ecuación 1), luego se aplicó un tratamiento de acondicionamiento más complejo (m_c) (Ecuación 2), y finalmente, el cambio relativo de masa se debió únicamente al acondicionamiento térmico (m_d)

(Ecuación 3). De acuerdo con las siguientes expresiones se obtuvieron los resultados de la Tabla 1.

$$m_r = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$m_c = \frac{M_1 - M_3}{M_3} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$m_d = \frac{M_3 - M_2}{M_2} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Se observó que, en el caso de las probetas del relleno, se requirieron 216h para lograr el acondicionamiento higrotérmico. La variación de la masa es del orden del 26%, esta variación se debe a que durante el proceso de secado las probetas terminan de eliminar la humedad restante de la barbotina incorporada en la mezcla de paja al inicio del proceso. En el caso de las probetas de revoque las variaciones de las masas fueron menores, debido a que se trabajó con un material de mayor densidad y con menor incorporación de humedad, por lo que durante las etapas de acondicionamiento en el horno de secado fue poca la pérdida de humedad respecto de la masa inicial, y luego, durante el acondicionamiento a temperatura ambiente, no absorbieron demasiada humedad para lograr el equilibrio higrotérmico.

La determinación de la conductividad térmica de las probetas fue de acuerdo con el método de ensayo de la transmisión del calor en régimen estacionario mediante el medidor de caudal térmico, siguiendo los lineamientos establecidos en las Normas: ISO 8302 (1991); ASTM C177 (2013); IRAM 11559 (1995). Durante la medición de la resistencia térmica

de las probetas de relleno liviano y de revoque, se hizo uso del sistema de placa caliente, que consiste en colocar en forma horizontal las dos probetas con una placa caliente en el medio, una placa fría arriba de la muestra superior y otra placa fría debajo de la muestra inferior, luego se aisló todo el perímetro del panel para evitar las pérdidas de calor por la periferia. Para el análisis de conductividad térmica se trabajó con un rango de temperatura media de placa caliente de 32°C y 8°C en el caso de la placa fría, los resultados se muestran en la Tabla 2.

Con los datos obtenidos del ensayo se aplicó la Ley de Fourier para la conducción del calor (Ecuación 4), con la que se obtiene la conductividad del material:

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = k * A * \frac{T_f - T_c}{e} \quad (\text{Ecuación 4})$$

A partir de este planteo, y dado que el ensayo involucra dos paneles se realizó el siguiente desarrollo para obtener el valor de conductividad de los materiales ensayados (Ecuación 5), (Ecuación 6), (Ecuación 7), (Ecuación 8):

$$\Delta Q = \left[k * A * \frac{T_{f1} - T_{c1}}{e_1} \right] + \left[-k * A * \frac{T_{f2} - T_{c2}}{e_2} \right] \quad (\text{Ecuación 5})$$

Factorización:

$$\Delta Q = k * A * \left(\frac{\Delta T_1 * e_2 + \Delta T_2 * e_1}{e_1 * e_2} \right) \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$Q = k * A * \left(\frac{\Delta T_1 * e_2 + \Delta T_2 * e_1}{e_1 * e_2} \right) \quad (\text{Ecuación 7})$$

Tabla 2. Temperaturas de ensayos y dimensiones de probetas. Fuente: Elaboración de los autores.

		Probeta de relleno	Probeta revoque
Temperatura de placa caliente superior / inferior		32,0°C / 32,0°C	32,0°C / 31,9°C
Temperatura de placa fría superior / Inferior		8,0°C / 8,0°C	8,3°C / 7,8°C
Diferencia entre placas		24°C	23,7°C / 24,1°C
Media de ensayo		20°C	20,1°C / 19,9°C
Potencia media suministrada a la resistencia calefactora	Tensión	6.97V	14.37V
	Corriente	0.62A	1,29A
Espesor panel superior		0,074 m	0,0853
Espesor panel Inferior		0,074 m	0,0852
Flujo de calor		4.273 W	18.125 W
Densidad media promedio		276,7 Kg/m3	1354,7Kg/m2
Temperatura ambiente		22,5°C	24,4°C
Humedad Relativa		50%	63%

Finalmente se obtuvo:

$$k = \frac{Q}{A} * \frac{e_1 * e_2}{(\Delta T_1 * e_2 + \Delta T_2 * e_1)} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

Q: Potencia térmica; $V \cdot I \cdot N$ [W]

V: Tensión suministrada [V].

I: Corriente suministrada [A].

N: Factor de calibración del equipo de placa caliente: 0,985

k_{1-2} : Es la conductividad térmica del panel superior e inferior, respectivamente [W/m²°C]

A: Área de la placa caliente: 0,3078 m x 0,3078 m = 0,0948 m².

ΔT_{1-2} : Delta de temperatura para el panel superior y para el panel inferior, respectivamente [°C].

e_{1-2} : Espesor del panel superior e inferior, respectivamente [m].

Para analizar el comportamiento térmico del muro de quinchá como muro de cerramiento, fue necesario verificar los valores máximos admisibles de transmitancia térmica para la época de invierno, de acuerdo a lo establecido en las Normas IRAM 11601 (2002); IRAM 11603 (2012); IRAM 11605 (1996). Con los valores obtenidos de resistencia térmica y haciendo uso de los valores de resistencia térmica superficial exterior 0,13 m²K/W e interior 0,04 m²K/W, dados en la Norma IRAM 11601 (2002), y por medio de la Ecuación 9 se obtuvieron los valores de transmitancia térmica global (Ecuación 10). Con estos datos de los ensayos experimentales y a partir de las pautas de diseño para invierno establecidas en las Normas IRAM 11603 (2012) y IRAM 11605 (1996), se realizó un análisis comparativo acerca de los espesores de muros necesarios para obtener la misma transmitancia térmica en muros con diferentes materiales de construcción, tales

como ladrillo cocido y ladrillo cerámico hueco, respecto del muro de quinchá liviana.

$$R_{Total} = \frac{e_{rev1}}{\lambda} + \frac{e_{rell}}{\lambda} + R_{Sext} + R_{Sint} + \frac{e_{rev2}}{\lambda} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$K_{global} = \frac{1}{R_{Total}}$$

(Ecuación 10)

Donde:

e_{rev1-2} = Espesor del revoque interior y exterior del muro de quinchá [m]

e_{rell} = Espesor del relleno liviano del muro de quinchá [m]

λ = Conductividad térmica del muro de quinchá [W/m K]

R_{Sext} = Resistencia térmica superficial exterior, IRAM 11.601 [0,13 m² K/W]

R_{Sint} = Resistencia térmica superficial interior, IRAM 11.601 [0,04 m² K/W]

CASO DE ESTUDIO

Con los datos de transmitancia térmica global, se midió en el lugar una vivienda ubicada en una zona de humedales de Escobar, Provincia de Buenos Aires, perteneciente a la zona bioclimática IIIa templado cálido de la Norma IRAM 11603 (1996). Los registros se realizaron durante el mes de Julio, para esto se dispusieron dataloggers a 2,20 m de altura desde el nivel de piso terminado, que adquirieron un dato cada 15 minutos de la temperatura de los ambientes interiores y del exterior. El criterio para la elección de los ambientes (habitación principal, oficina y sala de juegos) fue que no utilizaran sistemas de calefacción auxiliar, principalmente durante la etapa de medición. El resultado de los registros generó una curva para cada ambiente,

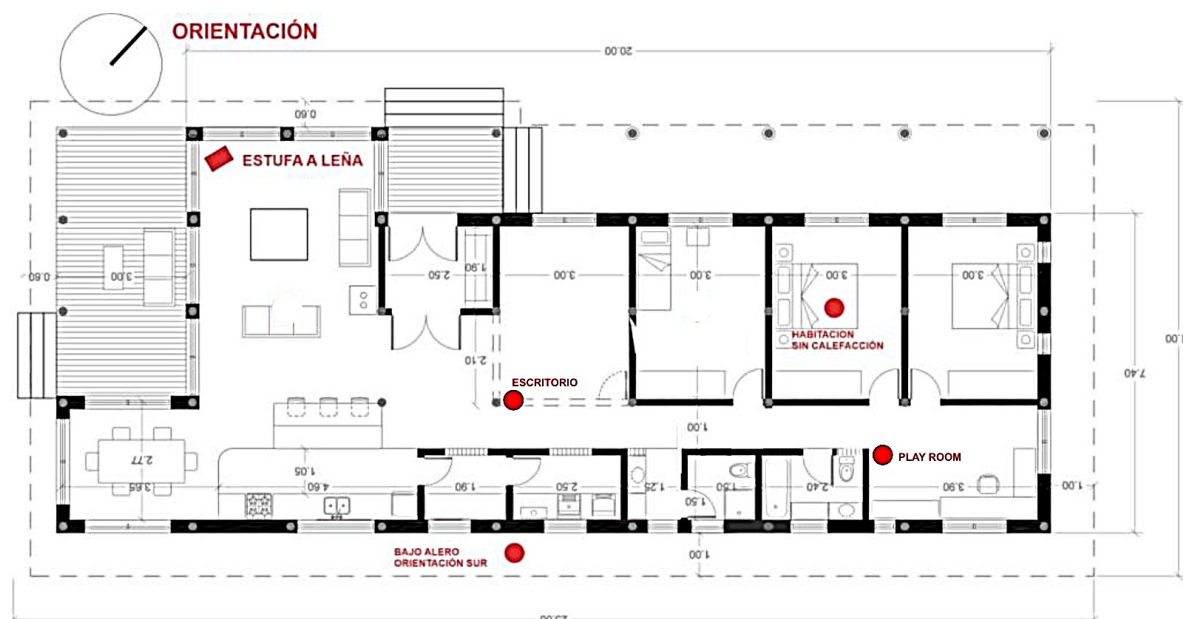


Figura 2: Planta de arquitectura de vivienda a medir. Fuente: Elaboración propia de los autores.



Figura 3: Proceso constructivo vivienda Escobar. Fuente: Elaboración de los autores.

que permitió observar la capacidad aislante de los muros de quincha liviana y las amplitudes térmicas diarias (Figura 2).

La vivienda de la Figura 3, cuenta con una superficie cubierta de 157m², para las fundaciones se utilizaron pilotines de hormigón armado donde se apoyó una plataforma de madera elevada 0.50m respecto del terreno natural. La estructura principal es un sistema de pórticos de postes rollizos de *eucalyptus grandis* de 0.18m de diámetro aproximado. Los muros tienen un entramado de listones de eucalypto de 1"x1/2", para contener el relleno, conformado por una mezcla de paja de trigo y barbotina con una densidad seca promedio de 400 Kg/m³ (in situ). Para la mezcla del revoque de 0.05m de espesor, se utilizaron 2 partes de rastrojo de trigo con 2 partes de arena y 1 parte de tierra. Para el revoque pre fino se utilizaron 2 partes de arena con 1 parte de tierra, y el revoque fino se hizo con 2 partes de arena, 1 parte de arcilla Caolin AF200 + ¼ parte de engrudo cocido. Tanto para el relleno como para el revoque se utilizaron las composiciones de mezclas ensayadas experimentalmente y descritas en la primera parte de este trabajo. De esta forma se obtuvieron muros terminados de 0.28 m de espesor con las propiedades térmicas ya ensayadas. Las carpinterías son de PVC con doble vidriado hermético. El techo al igual que el piso es un entramado liviano de madera de pino eliotti de 2"x 8" con placa de fenólico de 18 mm en la parte superior, placa de fenólico de 18mm en la parte inferior, nylon de 200µm de barrera de vapor y aislación térmica de lana de vidrio de 100mm. La cubierta invertida está conformada por: espuma de polietileno de 10 cm, membrana plástica de 750µm, manto geotextil de 150gr, sustrato alivianado con viruta de madera con un espesor de 8cm y vegetación.

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE ZONAS BIOCLIMÁTICAS

El sistema constructivo de quincha liviana puede ser adaptado para construir los cerramientos opacos de las

viviendas en cualquiera de las seis zonas bioclimáticas de la Argentina (IRAM 11603,1996), para ello se calcularon a partir de la Ecuación 11 los espesores necesarios del relleno liviano para el muro de quincha liviana correspondiente a cada una de las temperaturas de diseño para invierno, y a la transmitancia máxima admisible asociada. Con la Ecuación 13, se procedió de forma similar para obtener el espesor de muro de ladrillo macizo y ladrillo cerámico hueco, que sería necesario para cada una de las diferentes localidades de Argentina. Los espesores de revoque quedaron como datos constantes tanto de la quincha liviana (e_{rell-Q}) como de los diferentes muros de ladrillos (e_L). En el caso de los revoques de tierra se definió en 0.05 m de grosor para ambas caras del muro ($e_{rev\ ext}$, $e_{rev\ int}$), y en el caso de los muros con revoques cementicios ($e_{r.int}$, $e_{r.ext}$), se contemplaron 0.02 m de revoque para cada cara, y las juntas de unión (e_j) entre ladrillos de 0.015m, donde N_{L-1} es la cantidad de juntas necesarias para unir los N_L ladrillos que conforman el muro total y las resistencias superficiales (R_{si} , R_{se}) dadas en la normativa IRAM 11601 (2002). Con la Ecuación 12 y Ecuación 14 se obtuvieron los espesores totales de muro, y los valores las conductividades y resistencias térmicas se muestran en la Tabla3.

$$e_{rell-Q} = \left(\frac{1}{K_{max\ adm}} - \frac{e_{rev\ ext}}{\lambda_{rev\ ext}} - \frac{e_{rev\ int}}{\lambda_{rev\ int}} - R_{si} - R_s \right) \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$e_{muro\ Q} = e_{rev\ int} + e_{rell-nec} + e_{rev} \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$e_L = \left(\frac{1}{K_{max\ adm}} - \frac{e_{r.int}}{\lambda_{r.int}} - \frac{N_{L-1} * e_j}{\lambda_j} - \frac{e_{r.ext}}{\lambda_{r.ext}} - R_{si} - R_{se} \right) \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$e_{muro\ L} = e_{rev.int} + N_{L-1} * e_j + N_L * e_L + e_r \quad (\text{Ecuación 14})$$

Tabla 3. Valores de conductividad y resistencia superficial de los materiales utilizados. Fuente: Elaboración de los autores.

Conductividad (W/mK)						Resistencia superficial (m²K/W)		
$\lambda_{rev\ ext}$	$\lambda_{rev\ int}$	$\lambda_{r\ ext}$	$\lambda_{r\ int}$	λ_{rell-Q}	$\lambda_{Lmacizo}$	λ_{Lhueco}	R_{si}	R_{se}
0.34	0.34	1.16	0.91	0.07	0.91	0.42	0.13	0.04

Tabla 4. Respuesta térmica de los paneles de quinchá liviana. Fuente: Elaboración de los autores.

Designación	Características		Respuesta térmica	
	Espesor [m]	Densidad [kg/m³]	Resistencia Térmica [mK/W]	Conductividad Térmica [W/mK]
Relleno	0.074	276.7	14.29	0.07
Revoque	0.0852	1354.7	2.94	0.34

Tabla 5. Análisis comparativo de espesores de muros y transmitancia térmica. Fuente: Elaboración de los autores.

Autor	Espesor [m]	Transmitancia Térmica global [W/m²K]
INTI	0.156	0.79
Acevedo Oliva et al.	0.156	1.03 0.73
Cuitiño Rosales, Maldonado y Esteves Miramont,.	0.10	1.82
Adec	0.145	1.14

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ENSAYO EXPERIMENTAL EN PROBETAS

Por medio de las ecuaciones de la Ley de Fourier para la transmisión del calor (Ecuación 8) se obtuvo que, el valor de conductividad térmica para el relleno liviano, es de $k_1 = 0.07 \text{ W/mK}$ (Ecuación 15) y para el caso del revoque de tierra es de $k_2 = 0.34 \text{ W/mK}$ (Ecuación 16), que puede observarse en la Tabla 4.

$$k_1 = \frac{6.97V * 0.62A * 0.985}{0.0948 \text{ m}^2} * \frac{0.074m * 0.074m}{(24 \text{ K} * 0.074m + 24K * 0.024m)} = 0.07 \frac{W}{mK}$$

(Ecuación 15)

$$k_2 = \frac{14.37V * 1.29A * 0.985}{0.0948 \text{ m}^2} * \frac{0.0853m * 0.0852m}{(23.7 \text{ K} * 0.0853m + 24.1K * 0.0852m)} = 0.34 \frac{W}{mK}$$

(Ecuación 16)

Se determina la transmitancia térmica global de un muro de quinchá liviana por medio de las ecuaciones 9 y 10, el valor obtenido para un muro de 0.156m de espesor (equivalente al utilizado en los ensayos realizados por el equipo de trabajo de Protierra Chile, conformado por un revoque grueso de 0.05m y un relleno de 0.05 m de espesor es de $0.79 \text{ W/m}^2\text{K}$. En los ensayos realizados por el Equipo de Protierra Chile (Acevedo Oliva et al., 2017)) para muro de quinchá liviana húmeda de 0.156 m de espesor, se obtuvo una transmitancia térmica de $1.03 \text{ W/m}^2\text{K}$, se hizo el mismo estudio para un muro de quinchá liviana seca⁷ y la transmitancia térmica fue de $0.73 \text{ W/m}^2\text{K}$. En el trabajo de Cuitiño Rosales, Maldonado y Esteves Miramont, (2014) en el ensayo experimental en probetas de quinchá húmeda⁸ con un espesor de 0.10m, se obtuvo una transmitancia térmica de $1.82 \text{ W/m}^2\text{K}$ y finalmente en el trabajo de la Agencia para el Desarrollo Económico de la Ciudad de Córdoba (Adec, 2019) para

⁷ Quinchá Liviana seca: Es aquella quinchá que posee en su relleno solo fibras vegetales en estado seco, sin ningún contenido de tierra, arcilla o agua (Acevedo Oliva et al., 2017).

⁸ Quinchá Húmeda: Es aquella quinchá que posee de relleno una mezcla de barro, en estado plástico (tierra arcillosa más agua) con fibras vegetales, de una densidad mayor a la quinchá liviana húmeda (Acevedo Oliva et al., 2017).

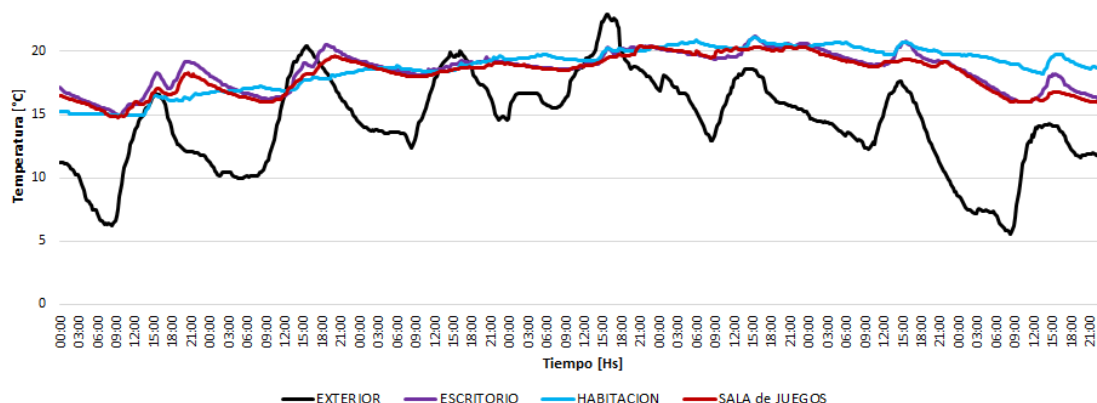


Figura 4: Curvas de comportamiento térmico de la vivienda en estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

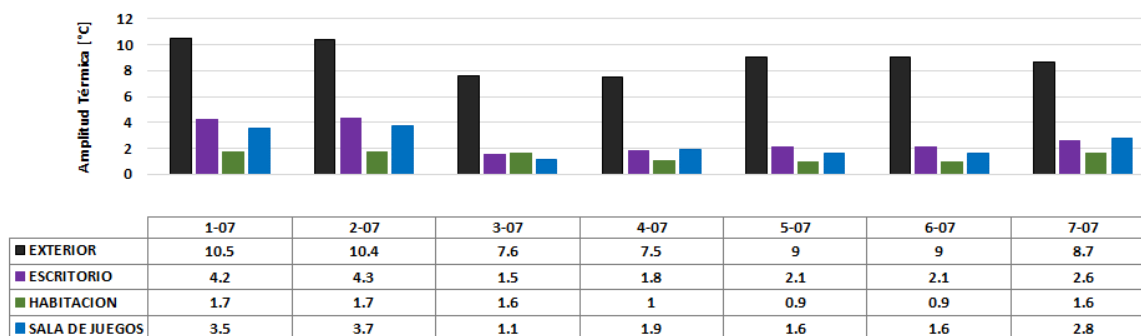


Figura 5: Amplitud térmica diaria para el caso de estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

un muro de 0.145m de espesor se obtuvo un valor de transmitancia térmica de $1.14\text{W/m}^2\text{K}$. Se aprecia que el muro de quinchá liviana ensayado por el INTI, presenta una mejor respuesta aislante respecto de los otros muros, estos datos se ven en la Tabla 5.

MEDICIONES EN EL INTERIOR DE LA VIVIENDA

Argentina cuenta con seis zonas bioclimáticas, zona I: muy cálida, zona II: cálida, zona III: templada cálida, zona IV: templada fría, zona V: fría y zona VI: muy fría. En las zonas bioclimáticas frías de Argentina fue necesario utilizar muros de quinchá con espesores entre 0.25m y 0.30 m para que verifiquen las condiciones del nivel A de transmitancia térmica máxima admisible dado en la Tabla 1 de la Norma IRAM 11605 (1996), la que está en función de la temperatura de diseño de invierno establecida en la Norma IRAM 11603 (2012). En este estudio, se tiene una transmitancia térmica de $0.30\text{W/m}^2\text{K}$ para un muro de quinchá liviana conformado por 0.05 m de espesor de revoque por cada cara del muro, más 0.20 m de espesor de relleno de paja liviana mezclada con barbotina.

En la Figura 4 y Figura 5, se pueden observar los datos de temperatura obtenidos en el mes de julio. Como referencia de medición se toma la curva de medición exterior, donde se observa la amplitud térmica⁹ diaria, principalmente entre las horas de día y las de noche, con valores entre los 7.6°C y 10.5°C . A pesar de esta variabilidad térmica exterior, en el interior se aprecia una menor variación entre las amplitudes térmicas diarias, donde los valores máximos registrados en el caso del escritorio son de 4.3°C , en la habitación es de 1.7°C y en la sala de juegos es de 3.7°C , lo que muestra un comportamiento térmico estable, lo que favorece al confort habitacional. La vivienda cuenta con una estufa a leña ubicada en la sala de estar en caso de ser necesario alcanzar una temperatura de confort más alta, sin embargo, durante esta etapa de registro de datos no se utilizó ningún sistema de calefacción auxiliar.

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE ZONAS BIOCLIMÁTICAS

La técnica constructiva quinchá liviana, Figura 6 a, puede ser adaptada para construirse en cualquier zona

⁹ Amplitud térmica: diferencia entre la temperatura máxima y mínima que se registra en un lugar en un determinado periodo de tiempo (IRAM 11549, 2002).

Tabla 6. Espesores necesarios y totales de muros. Fuente: Elaboración de los autores (2024)

Datos		Muro de quincha liviana [m]		Muro de ladrillo macizo [m]			Muro de ladrillo cerámico hueco [m]		
Temp. Ext. de diseño	Nivel A Kmax adm [W/m2K]	Espesor necesario	Espesor Total	Espesor necesario	Espesor Total	Unidades de ladrillo macizo NLM	Espesor necesario	Espesor Total	Unidades de ladrillo hueco NLH
-15	0.23	0.27	0.37	3.50	3.73	19	1.68	1.78	9
-14	0.23	0.27	0.37	3.50	3.73	19	1.68	1.78	9
-13	0.24	0.26	0.36	3.33	3.73	19	1.61	1.78	9
-12	0.25	0.25	0.35	3.19	3.535	18	1.54	1.59	8
-11	0.25	0.25	0.35	3.19	3.535	18	1.54	1.59	8
-10	0.26	0.24	0.34	3.07	3.34	17	1.48	1.59	8
-9	0.27	0.23	0.33	2.95	3.15	16	1.42	1.59	8
-8	0.28	0.22	0.32	2.83	3.15	16	1.37	1.39	7
-7	0.29	0.21	0.31	2.74	2.95	15	1.32	1.39	7
-6	0.3	0.20	0.30	2.63	2.95	15	1.27	1.39	7
-5	0.31	0.19	0.29	2.55	2.76	14	1.23	1.39	7
-4	0.32	0.19	0.29	2.46	2.76	14	1.18	1.39	7
-3	0.33	0.18	0.28	2.39	2.56	13	1.15	1.20	6
-2	0.35	0.17	0.27	2.23	2.56	13	1.08	1.20	6
-1	0.36	0.16	0.26	2.17	2.37	12	1.04	1.20	6
> 0	0.38	0.15	0.25	2.05	2.17	11	0.98	1.20	6

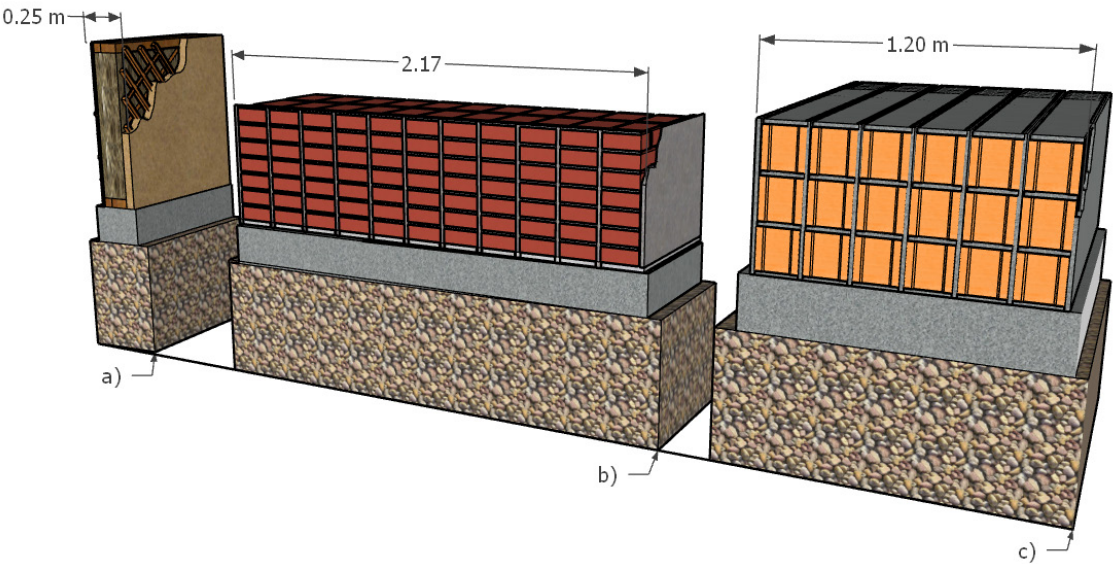


Figura 6: Detalles de muros: a) Quincha liviana, b) Ladrillo macizo c) Ladrillo hueco. Fuente: Elaboración de los autores (2024)

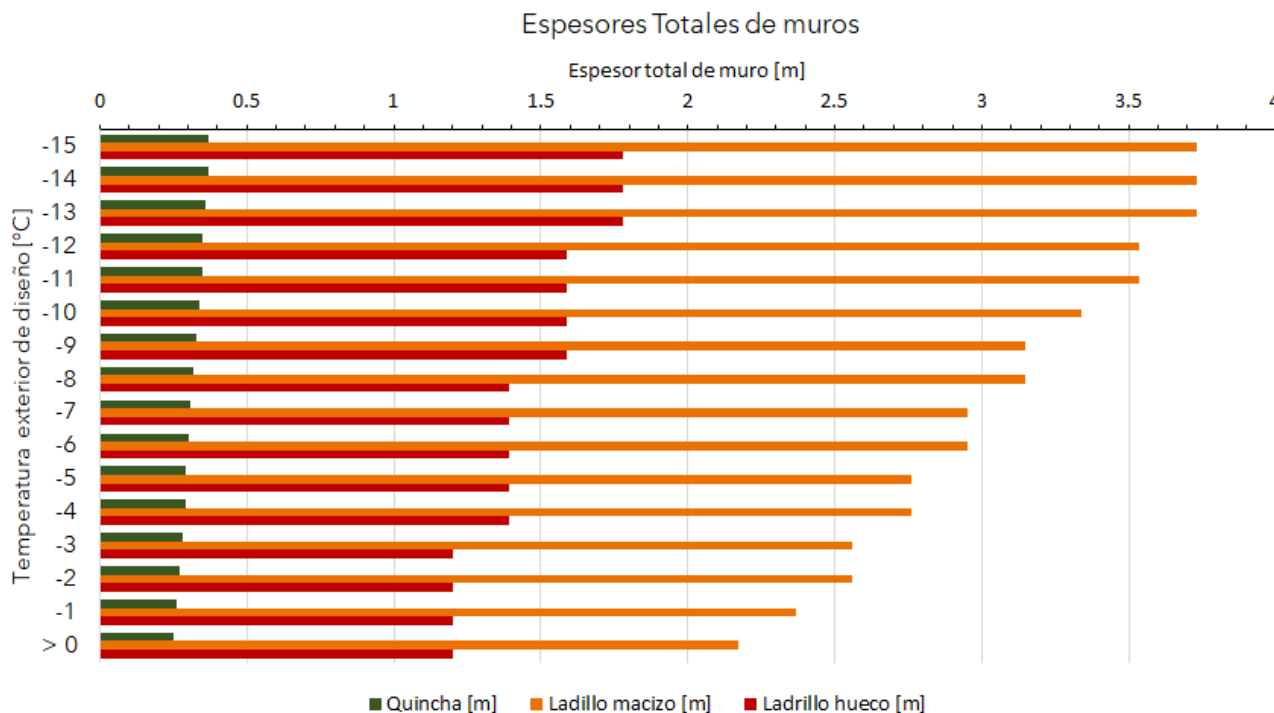


Figura 7: Cuadro comparativo de espesores de muros de materiales de estudio para diferentes temperaturas de diseño exterior. Fuente: Elaboración de los autores (2024).

bioclimática de Argentina, siendo necesario analizar los espesores de muro para verificar la condición de transmitancia térmica máxima admisible, entregada por la Norma IRAM 11605 (1996).

A partir de lo descrito en la metodología (Ecuación 11-12-13 y 14), en la Tabla 6 se obtuvieron los espesores de muro necesarios para cumplir el nivel A de transmitancia térmica máxima admisible para cada una de las temperaturas de diseño de invierno, y a continuación el ancho total de muro que cumpliría con dicha normativa. En el caso de la quinchá el dato variable a obtener fue el espesor de relleno liviano y en los otros dos casos, la variable a analizar fue el ancho de muro de ladrillo, y en todos los casos el revoque es un dato fijo. En la Figura 6 a, b y c se aprecian los casos de estudio planteados.

En la Figura 7, están representados los espesores totales de muros para cada caso de estudio. En los muros de quinchá con el relleno de paja y con revoques por ambas caras, el espesor total de muro representa entre el 10% y 12% del espesor de muro requerido, para el caso de utilizar el muro de ladrillo macizo y respecto del ladrillo macizo hueco representa entre el 21% y 23% del espesor total. Además, se puede observar que frente a una misma demanda de transmitancia térmica, los muros de ladrillos macizo y el cerámico hueco, requieren de una cantidad elevada de mampuestos para conformar el muro, como se puede observar en la Figura 6, donde se ha representado la última situación donde la temperatura de diseño es mayor a los 0°C y la transmitancia máxima admisible es

de 0.38W/m²K, requiriendo para el caso de la quinchá un relleno de 0.15m y un espesor de muro terminado de 0.25m, siendo necesario 11 mampuestos en el caso del muro de ladrillo macizo dando un muro terminado de 2.17m y en la situación del ladrillo cerámico hueco se necesitaron 6 mampuestos, resultando en un muro de 1.20m. Para los casos del ladrillo macizo y del ladrillo hueco es poco factible construir los muros con los valores obtenidos, debido a las grandes dimensiones requeridas para alcanzar los niveles de $K_{maxadm'}$, en estos casos es necesario reducir los espesores de muro, y compensar esta reducción con la incorporación de materiales aislantes (Mac Donnell, 2014).

CONCLUSIONES

Con los valores de conductividad térmica obtenidos en los ensayos de relleno y revoque de muros de quinchá liviana, se obtuvieron los parámetros necesarios para realizar el estudio higrotérmico de las viviendas construidas con esta técnica. Se obtuvo como resultado una respuesta óptima en cuanto al comportamiento térmico, al ser comparada con estudios similares en cerramientos opacos para vivienda.

La conductividad térmica obtenida del relleno fue de 0.07 W/m.K, y del revoque de tierra 0.34 W/m.K. La conformación de un muro de 0.156 m de espesor, con revoque de 0.05 m en cada cara y relleno de 0.056 m de espesor, da como resultado una transmitancia térmica

global de $0.79 \text{ W/m}^2\text{K}$, equiparada con la quincha ensayada en Protierra Chile (Acevedo Oliva et al., 2017), donde un muro del mismo espesor (0.156 m) da una transmitancia térmica de $1.03 \text{ W/m}^2\text{k}$.

En la vivienda estudiada, se utilizaron muros de quincha liviana con espesores de entre 25 cm y 30 cm y se pudo verificar el comportamiento higrotérmico con una transmitancia térmica de $0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$. De las mediciones en el lugar en el mes de julio 2023, se obtuvo que, a pesar de las amplitudes térmicas exteriores variaban entre 7.5°C y 10.5°C , el interior muestra estabilidad térmica durante toda la medición, con amplitudes entre 4.3°C y 0.9°C , lo que se refleja en el confort interior, debido a que no fue necesario recurrir a sistemas de calefacción auxiliar.

Los datos obtenidos en este estudio permitieron realizar los cálculos teóricos para conocer los diferentes espesores requeridos de acuerdo a las necesidades de transmitancia térmica para cada zona bioclimática de Argentina. De esta forma, para el nivel óptimo de transmitancia térmica se pudo concluir que para todos los casos el muro de quincha liviana, cumplen con el Nivel A con espesores de muro considerablemente menores respecto de un muro de ladrillo macizo y de un muro de ladrillo cerámico hueco.

Cabe destacar que el comportamiento de muros de quincha liviana continúa siendo investigado para poder ser implementado en diferentes zonas, tanto bioclimáticas como sísmicas. Con esta información se estudiará la resistencia al fuego de este mismo sistema constructivo, bajo la Norma IRAM 11950 (2010) enfocada en la Resistencia al fuego de los elementos de la construcción - Método de ensayo”.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

CRedit

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

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Municipalidad de Allen, Río Negro y al Instituto Nacional de Tecnología Industrial por su apoyo a la realización de los ensayos necesarios para esta publicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia para el Desarrollo Económico de la Ciudad de Córdoba ham (Adec). (2019) - Proyecto N°182-Atlas Dinámico De Envolventes. Atlas dinámico de envolventes. Atlas de comportamiento energético en régimen dinámico de envolventes constructivas. Instituto de Sustentabilidad Edilicia - Colegio de Arquitectos de la Provincia de Córdoba.

Acevedo Oliva, R., Carrillo Zuñiga, O. R., y Broughton, J. (2017). Construcción en quincha liviana. Sistemas constructivos sustentables de reinterpretación patrimonial. https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2020/03/CONSTRUCCION_CON_QUINCHA_LIVIANA_1a_edicion.pdf

Asdrubali, F., D'Alessandro, F., y Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>

American society for testing and materials [ASTM]. (2013). ASTM C177-13 (2013). Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus. <https://www.astm.org/c0177-19.html>

Buratti, C., Belloni, E., Merli, F., y Zinzi, M. (2021). Aerogel glazing systems for building applications: A review. *Energy and Buildings*, 231, 110587. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110587>

Castillo Quimis, E. L., Mite Pezo, J. A., y Pérez Arévalo, J. J. (2019). Influencia de los materiales de la envolvente en el confort térmico de las viviendas. Programa Mucho Lote II, Guayaquil. *Revista Universidad y Sociedad*, 11(4), 303-309. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/1306>

Cuitiño Rosales, M. G., Maldonado, N. G., y Esteves Miramont, A. (2014). Analysis of the Mechanical Behavior of Prefabricated Wattle and Daub Walls. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction*, 3, (4), 235-246. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/32338>

Cuitiño, G., Esteves, A., Maldonado, G., y Rotondaro, R. (2015). Análisis de la transmitancia térmica y resistencia al impacto de los muros de quincha. *Informes de la Construcción*, 67(537), e063-e063. <https://doi.org/10.3989/ic.12.082>

Forgiarini Rupp, R., Giraldo Vásquez, N., y Lamberts, R. (2015). A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*, 105, 178-205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>

García León, R. A., Flórez-Solano, E. y Espinel Blanco, E. (2017). Conductividad térmica de polvos de arcillas utilizadas en la industria cerámica de Ocaña Norte de Santander y la región. *Revista Ingenio*, 13(1), 1-9. <https://portal.amelica.org/ameli/journal/814/8145075001/>

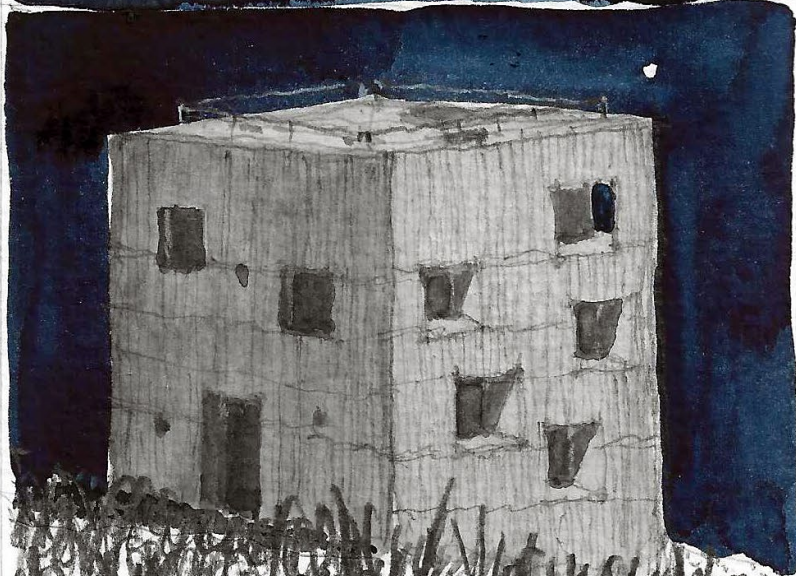
González Couret, D. G., y Véliz Párraga, J. F. V. (2016). Resiliencia urbana y ambiente térmico en la vivienda. *Arquitectura y Urbanismo*, 37(2), 63-73. <https://rau.cujae.edu.cu/index.php/revistaau/article/view/470>

- Ham, H. J., Lee, S., y Kim, H. -J. (2024). The Impact of Residential Building Insulation Standards on Indoor Thermal Environments and Heat-Related Illness Risks During Heatwaves: A Case Study in Korea. *Sustainability*, 16(22), 9831. <https://doi.org/10.3390/su16229831>
- Howden-Chapman, P., Matheson, A., Crane, J., Viggers, H., Cunningham, M., Blakely, T., Cunningham, C., Woodward, A., Saville-Smith, K., O'Dea, D., Kennedy, M., Baker, M., Waipara, N., Chapman, R., y Davie, G. (2007). Effect of insulating existing houses on health inequality: cluster randomised study in the community. *BMJ (Clinical research ed.)*, 334(7591), 460. <https://doi.org/10.1136/bmj.39070.573032.80>
- IRAM 11559. (1995). *Acondicionamiento térmico. Determinación de la Resistencia térmica y propiedades conexas en régimen estacionario. Método de la placa caliente con guarda*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires: IRAM
- IRAM 11605. (1996). *Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires: IRAM.
- IRAM 11549. (2002). *Aislamiento térmico de edificios. Vocabulario*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires: IRAM
- IRAM 11601. (2002). *Aislamiento térmico de edificios. Método de cálculo – Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires: IRAM
- IRAM 11950. (2010). *Resistencia al fuego de los elementos de la construcción - Método de ensayo*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires: IRAM.
- IRAM 11603. (1996). *Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires: IRAM.
- IRAM 11603. (2012). *Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Buenos Aires: IRAM.
- ISO 8302. (1991). *Thermal Insulation, Determination of Steady-State Areal Thermal Resistance and Related Properties--Guarded-Hot-Plate Apparatus*. The International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/15422.html>
- Kreith, F., y Goswami, D. Y. (Eds.). (2007). *Handbook of energy efficiency and renewable energy*. Crc Press, Taylor & Francis Group
- Lakatos, Á. (2022). Novel Thermal Insulation Materials for Buildings. *Energies*, 15(18), 6713. <https://doi.org/10.3390/en15186713>
- Mac Donnell, H. P. (2014). *Los muros exteriores: Análisis de muros empleados en la actualidad*. Revista Vivienda. Buenos aires.
- Matteucci, S. D. (2012). Ecorregión Estepa Patagónica. Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos. En J. Morello, S. D. Matteucci, A. F. Rodriguez y M. E. Silva, *Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos* (pp. 549-654). Orientación Gráfica Editora SRL, Buenos Aires,
- Muñoz, C., Zaror, C., Saelzer, G., y Cuchí, A. (2012). Estudio del flujo energético en el ciclo de vida de una vivienda y su implicancia en las emisiones de gases de efecto invernadero, durante la fase de construcción Caso Estudio: Vivienda Tipología Social. Región del Biobío, Chile. *Revista de la construcción*, 11(3), 125-145. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2012000300011>
- Red Protierra Argentina, 2024. Relevamiento y análisis de normas jurídicas y técnicas referidas a la construcción con tierra vigentes en la República Argentina. <https://redprotierra.com.ar/2020/07/15/relevamiento-y-analisis-de-normativas-de-construccion-con-tierra-en-argentina/>
- Rey Martínez, F. J., y Velasco Gómez, E. (2006). Eficiencia energética en edificios. Certificación y auditorías energéticas: certificación y auditorías energéticas. Ediciones Paraninfo, SA.
- Sánchez Azócar, J. R. (2011). Análisis de Factibilidad Técnica y Económica para la Incorporación de una Empresa de Rehabilitación Térmica de Viviendas Usadas, en el Mercado de la Construcción Chilena [Tesis de Magister, Universidad de Chile] Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102639>
- Vanhoutteghem, L., y Svendsen, S. (2014). Modern insulation requirements change the rules of architectural design in low-energy homes. *Renewable energy*, 72, 301-310. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.005>
- World Health Organization [WHO]. (2018). *Housing and health guidelines*. Geneva: World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/275838/WHO-CED-PHE-18.02-eng.pdf>
- Zhao, R., Guo, H., Yi, X., Gao, W., Zhang, H., Bai, Y., y Wang, T. (2020). Research on Thermal Insulation Properties of Plant Fiber Composite Building Material: A Review. *International Journal of Thermophys*, 41(87). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-02665-0>
- Zhovkva, O. (2020). Energy efficiency and environmental friendliness, as important principles of sustainability for multifunctional complexes. *Revista ingeniería de construcción*, 35(3), 308-320. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732020000300308>

Carla Pali

Pago von Ulrichshausen

2005



BARNUM 2022

Objeto singular Columna