

Aimón
Cámara Mirador
Nicolás Sáez,
2018



Revista
Hábitat
Sustentable

ISSN 0719-0700
Vol. 14 N°. 1
jun
2024

BARRÍA 2023



Objeto singular coliumo



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 M^ÁRIA PAZ CID ALARCÓN / Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
mpcid@ubiobio.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
- 08 **PROPUESTA METODOLÓGICA PARA MEDIR EL DESLUMBRAMIENTO EN AMBIENTES INTERIORES MEDIANTE CUATRO RANGOS DE APERTURA OCULAR**
Julieta Yamin-Garretón, Darío Jaime, Maureen De Gastines, Emanuel Schumacher, Andrea Pattini
- 22 **PERCEPCIÓN TÉRMICA DE USUARIOS EN LA VIVIENDA VERNÁCULA DE LA COMUNIDAD URO DEL LAGO TITICACA EN PERÚ**
Diana Karen Pari-Quispe, Joára Cronemberger-Ribeiro Silva, Samuel Huaquisto-Cáceres, Hugo Anselmo Ccama-Condori, Leyda Cinthia Aza-Medina
- 34 **MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN FACHADAS DE VIDRIO MEDIANTE ESTRATEGIAS DE DISEÑO BIOMIMÉTICO**
Büşra Öztürk, Güneş Mutlu-Avinç, Semra Arslan-Selçuk
- 44 **OPTIMIZACIONES EN EL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO PARA LA SOSTENIBILIDAD DE UN ÁREA METROPOLITANA DE SUDAMÉRICA IMPLEMENTANDO ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE MATERIALES**
Andrés Felipe Restrepo-Ramírez, Carlos Andrés Rúa-Machado, Yhan Paul Arias-Jaramillo
- 66 **UN ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA CERTIFICACIÓN EDGE EN EDIFICACIONES: EL CASO DE PERÚ**
Mónica J. Condezo-Solano, Andrews A. Erazo-Rondinel, Lorena Milagros Barrozo-Bojorquez, Coraima Chantal Rivera-Nalvarte, Areli Zaraida García-Puclla
- 80 **LA VOLUNTARIEDAD DE UNA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA COMO CAUSA DE DESINFORMACIÓN EN LOS CONSUMIDORES Y PRÁCTICAS DE GREENWASHING**
Macarena Díaz de Valdés-Haase
- 92 **CALIFICACIÓN DE VIVIENDAS PREFABRICADAS EN MADERA BASADA EN ATRIBUTOS DE CUMPLIMIENTO NORMATIVO, COMPLEJIDAD Y SUSTENTABILIDAD EN CHILE CENTRAL**
Rose Marie Garay-Moena, Susana Graciela Benedetti-Ruiz
- 102 **RECONOCIMIENTO DE LUZ Y COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN LA ESTRUCTURA Y FUNCIÓN DEL CAZADOR DE VIENTO BABER EN LA ARQUITECTURA VERNÁCULA DE BANDAR LENGÜÉ**
Hamed Mohammadi-Mazraeh, Mohammadreza Mahmoudzadeh
- 118 **INTEGRACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CIRCULARIDAD AL DISEÑO ARQUITECTÓNICO MEDIANTE BIM**
Viviana Duran-Navarrete, Rodrigo García-Alvarado, Mabel Vega-Coloma

EDITORIAL

Me complace introducir este número de la revista Hábitat Sustentable compartiendo la buena noticia del avance de la revista hasta el cuartil Q2 en el ranking Scimago, área de Arquitectura. De esta manera, la revista se posiciona en el número 64 dentro de 179 revistas del área, principalmente por el número de citas que recibe cada uno de sus artículos, entre otros criterios de cobertura e impacto. Si consideramos solo las revistas indexadas en Scopus de la región Latinoamericana, HS se posiciona en el segundo lugar, tanto en el área de Arquitectura como de Construcción. Este logro se debe al arduo trabajo que realiza el equipo de gestión editorial encabezado por Jocelyn Vidal, así como a los investigadores e investigadoras que componen el comité editorial y el grupo de pares revisores.

Uno de los principales méritos de HS es pertenecer al grupo de revistas denominadas de "acceso abierto diamante", lo que implica que sus artículos son publicados sin costo para autores y lectores. En tiempos en que la mayoría de las publicaciones científicas se concentran en grandes editoriales internacionales con fines de lucro, resulta motivante para la comunidad académica contar con una revista con las características de HS. Esto es posible gracias al compromiso que la Universidad del Bío-Bío (Chile), a través de la Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño y la Vicerrectoría de Investigación y Postgrados, ha tenido en pos de promover el acceso abierto a resultados de investigación.

Durante el año 2023, con el fin de aumentar la visibilidad de los artículos, hemos creado cápsulas audiovisuales que resumen cada artículo publicado, las cuales se difunden en las redes sociales de la revista, tales como Instagram y LinkedIn. De esta forma, los resultados de la investigación académica pueden alcanzar no solo el medio académico, sino también el público general.

Dentro de los desafíos futuros, nos parece importante atraer a autores y autoras que estén generando conocimiento avanzado en temáticas de sustentabilidad del entorno construido, abarcando las líneas de diseño arquitectónico y urbano sustentable; materiales y tecnologías constructivas sustentables; arquitectura para la salud y el bienestar; y métodos y herramientas de análisis. Si bien en un principio la revista se orientó hacia problemáticas específicas de Latinoamérica, hemos visto cómo su alcance se ha ido ampliando a contribuciones de otros países que conforman el Sur Global, lo cual refuerza su prestigio y relevancia internacional.

En el contexto del Sur Global, el entorno construido enfrenta problemas específicos que difieren de aquellos del Norte

Global. Las consecuencias del cambio climático son más severas en este contexto, afectando principalmente a la población más vulnerable. Una proporción importante de la población habita en asentamientos informales, donde la mala calidad de la construcción genera importantes riesgos frente a incendios, inundaciones y olas de calor. Este número se compone de contribuciones de autores provenientes de Irán, Turquía, Perú, Colombia, Argentina y Chile. Cubre una gran diversidad de temas, desde confort en arquitectura vernácula hasta el desarrollo de nuevos materiales con criterios de sustentabilidad. Agradecemos a todos quienes han confiado en la revista y esperamos que los lectores disfruten su lectura.

EDITORIAL

I am pleased to introduce this issue of Hábitat Sustentable by sharing the great news of the journal's progress to the Q2 quartile in the Scimago Ranking in the Architecture area. The journal is now ranked 64th among 179 journals in the area, mainly because of the number of citations each article receives, among other criteria based on coverage and impact. Considering just the journals indexed in Scopus for Latin America, HS is second in Architecture and Construction. This achievement is thanks to the hard work of the editorial management team, headed by Jocelyn Vidal, as well as the researchers in the editorial committee and peer review group.

One of HS's main merits is its membership in the "diamond open access" group of journals. This means its articles are published at no cost to authors and readers. At a time when most scientific publications are concentrated in large international for-profit publishing houses, it is motivating for the academic community to have a journal with the characteristics of HS. This is possible thanks to the commitment that the Universidad del Bío-Bío (Chile), through the Faculty of Architecture, Construction and Design and the Vice-Rector's Office for Research and Postgraduate Studies, has had to promote open access to research results.

In 2023, to increase the articles' visibility, we created audiovisual capsules that summarize each published article. These capsules are disseminated on the journal's social networks, such as Instagram and LinkedIn. In this way, the results of academic research can reach not only the academic sphere but also the general public.

Among the future challenges, we feel it is essential to attract authors generating advanced knowledge in built environment sustainability issues, covering sustainable architectural and urban design, sustainable construction materials and technologies, architecture for health and well-being, and analysis methods and tools. Although the journal was initially oriented toward specific problems of Latin America, its scope has been expanding to include contributions from other countries that make up the Global South, which reinforces its prestige and international relevance.

In the context of the Global South, the built environment faces specific problems that differ from those of the Global North. The consequences of climate change are more severe in this context, mainly affecting the most vulnerable population. A significant proportion of the population lives in informal settlements, where the poor quality of construction generates significant risks from fires, floods, and heat waves.

This issue features contributions from authors in Iran, Türkiye, Peru, Colombia, Argentina, and Chile. It covers a wide variety of topics, from comfort in vernacular architecture to the development of new materials with sustainability criteria. We thank everyone who has trusted the journal and hope readers enjoy reading it.

EDITORIAL

É com grande satisfação que apresento este número da revista Habitat Sustentável, compartilhando a boa notícia do avanço da revista para o quartil Q2 no ranking Scimago, área de Arquitetura. Com isso, a revista passa a ocupar a posição de número 64 entre 179 periódicos da área, principalmente em função do número de citações recebidas por cada um de seus artigos, entre outros critérios de abrangência e impacto. Se considerarmos apenas as revistas indexadas na Scopus na América Latina, a HS está em segundo lugar, tanto na área de Arquitetura quanto na de Construção. Essa conquista se deve ao trabalho árduo da equipe de gestão editorial liderada por Jocelyn Vidal, bem como dos pesquisadores que compõem o comitê editorial e o grupo de revisores.

Um dos principais méritos da HS é pertencer ao grupo de periódicos de “acesso aberto diamante”, o que significa que seus artigos são publicados gratuitamente para autores e leitores. Em tempos em que a maioria das publicações científicas está concentrada em grandes editoras internacionais com fins lucrativos, é motivador para a comunidade acadêmica ter uma revista com as características da HS. Isso é possível graças ao compromisso que a Universidad del Bío-Bío (Chile), por meio da Faculdade de Arquitetura, Construção e Design e da Vice-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, assumiu para promover o acesso aberto aos resultados de pesquisa.

Durante 2023, para aumentar a visibilidade dos artigos, criamos cápsulas audiovisuais que resumem cada artigo publicado e que são divulgadas nas redes sociais da revista, como Instagram e LinkedIn. Dessa forma, os resultados das pesquisas acadêmicas podem chegar não apenas ao meio acadêmico, mas também ao público em geral.

Como parte dos desafios futuros, acreditamos que é importante atrair autores que estejam gerando conhecimento avançado sobre questões de sustentabilidade no ambiente construído, abrangendo as áreas de projeto arquitetônico e urbano sustentável; materiais e tecnologias de construção sustentáveis; arquitetura para saúde e bem-estar; e métodos e ferramentas de análise. Embora a revista tenha sido inicialmente orientada para questões específicas da América Latina, temos visto como seu escopo tem se expandido para incluir contribuições de outros países que compõem o Sul Global, o que reforça seu prestígio e relevância internacional.

No contexto do Sul Global, o ambiente construído enfrenta problemas específicos que diferem daqueles do

Norte Global. As consequências das mudanças climáticas são mais graves nesse contexto, afetando principalmente a população mais vulnerável. Uma proporção significativa da população vive em assentamentos informais, onde a má qualidade da construção gera riscos significativos de incêndios, inundações e ondas de calor.

Esta edição é composta por contribuições de autores do Irã, Turquia, Peru, Colômbia, Argentina e Chile. Ela abrange uma ampla gama de tópicos, desde o conforto na arquitetura vernacular até o desenvolvimento de novos materiais com critérios de sustentabilidade. Agradecemos a todos aqueles que depositaram sua confiança na revista e esperamos que os leitores gostem de lê-la.

Maureen Trebilcock-Kelly
Coeditora Hábitat Sustentable
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



PROPUESTA METODOLÓGICA PARA MEDIR EL DESLUMBRAMIENTO EN AMBIENTES INTERIORES MEDIANTE CUATRO RANGOS DE APERTURA OCULAR

Recibido 23/11/2023
 Aceptado 17/04/2024

METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR MEASURING GLARE IN INDOOR ENVIRONMENTS USING FOUR EYE OPENNESS RANGES

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MEDIR O ENCANDEAMENTO EM AMBIENTES INTERNOS UTILIZANDO QUATRO GAMAS DE ABERTURA OCULAR

Julieta Yamin-Garretón

Doctora en Medio Ambiente Visual e Iluminación eficiente
 Investigadora del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-9322-2902>
jyamin@mendoza-conicet.gob.ar (Autora de Correspondencia)

Darío Jaime

Licenciado en Energías Renovables
 Personal de Apoyo - Programador
 Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0009-0008-5617-8736>
djaime@mendoza-conicet.gob.ar

Maureen De Gastines

Doctora en Ingeniería
 Investigadora del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-0357-9375>
mdegastines@mendoza-conicet.gob.ar

Emanuel Schumacher

Ingeniero en Electrónica
 Personal de Apoyo del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0009-0002-4428-2022>
eschumacher@mendoza-conicet.gob.ar

Andrea Pattini

Doctora en Medio Ambiente Visual e Iluminación eficiente
 Investigadora – Directora del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-6305-1268>
apattini@mendoza-conicet.gob.ar



RESUMEN

El desarrollo de modelos de deslumbramiento contribuye a una mejor evaluación del confort visual de los ocupantes en espacios interiores. Los indicadores oculares pueden ser una herramienta adecuada para evaluar el deslumbramiento de manera dinámica en climas soleados para evitar las molestias visuales. En este trabajo, se mide el grado de apertura ocular y se propone su medición en cuatro rangos (oclusión, semi-oclusión, semi-apertura y apertura) por medio de un eye-tracker. El objetivo de este trabajo fue evaluar de qué manera se relaciona el grado de apertura ocular con los niveles de iluminancia vertical (Ev) inferiores a 2484 lx (valor donde aparece la sensación de deslumbramiento molesto), así como determinar si la percepción subjetiva del deslumbramiento de las personas corresponde a los rangos de deslumbramientos propuestos por Wienold (2019). Estos parámetros se midieron en tres condiciones de deslumbramiento percibido (notable, perturbador e intolerable). Los resultados mostraron que la medición de apertura ocular en cuatro rangos, tiene el potencial de cuantificar de manera objetiva y dinámica la sensación de deslumbramiento en todos los escenarios evaluados y en cuanto a su relación con los valores de Ev de referencia, los valores percibidos como notable y perturbador, fueron inferiores a los valores de referencia, mientras que los valores percibidos como intolerable fueron coincidentes.

Palabras clave

deslumbramiento, confort visual, indicadores oculares

ABSTRACT

The development of glare models contributes to a better assessment of occupant's visual comfort in indoor spaces. Eye indicators can dynamically assess glare in sunny climates to avoid visual discomfort. In this work, an eye tracker measures the degree of eye openness in four ranges (occlusion, semi-occlusion, semi-openness, and openness). This work aimed to evaluate how the degree of eye openness is related to vertical illuminance levels (Ev) below 2484 lx (value where the sensation of bothersome glare appears), as well as to determine whether people's subjective perception of glare follows the glare ranges proposed by Wienold (2019). These parameters were measured in three conditions of perceived glare (noticeable, disturbing, and intolerable). The results showed that the measurement of eye openness in four ranges has the potential to objectively and dynamically quantify the sensation of glare in all the scenarios evaluated. Regarding its relationship with the reference Ev values, the values perceived as noticeable and disturbing were lower than the reference values, while the values perceived as intolerable coincided.

Keywords

glare, visual comfort, eye indicators

RESUMO

O desenvolvimento de modelos de ofuscamento contribui para uma melhor avaliação do conforto visual dos ocupantes de ambientes internos. Os indicadores oculares podem ser uma ferramenta adequada para avaliar o ofuscamento de forma dinâmica em climas ensolarados para evitar o desconforto visual. Neste trabalho, o grau de abertura ocular é medido e proposto para ser medido em quatro faixas (oclusão, semi-oclusão, semi-abertura e abertura) por meio de um rastreador ocular. O objetivo deste trabalho foi avaliar como o grau de abertura ocular está relacionado aos níveis de iluminância vertical (Ev) abaixo de 2484 lx (valor em que aparece a sensação de brilho incômodo), bem como determinar se a percepção subjetiva de brilho das pessoas corresponde às faixas de brilho propostas por Wienold (2019). Esses parâmetros foram medidos em três condições de percepção de ofuscamento (perceptível, incômodo e intolerável). Os resultados mostraram que a medição da abertura ocular em quatro faixas tem o potencial de quantificar de forma objetiva e dinâmica a sensação de ofuscamento em todos os cenários avaliados e, em termos de sua relação com os valores de Ev de referência, os valores percebidos como perceptíveis e incômodos foram inferiores aos valores de referência, enquanto os valores percebidos como intoleráveis foram coincidentes.

Palavras-chave:

ofuscamento, conforto visual, indicadores oculares

INTRODUCCIÓN

Es importante abordar el desempeño de la iluminación natural en los edificios desde dos perspectivas: la eficiencia energética y el factor humano. Respecto al factor humano, una vista al exterior agradable y el acceso controlado a la luz natural son factores cruciales para el bienestar de las personas en términos de confort visual (Aries et al., 2010). Pero estos beneficios pueden obtenerse sólo si la ventana está acompañada de un elemento de control solar adecuado para regular el nivel de deslumbramiento, el que representa uno de los mayores desafíos en la búsqueda de un confort visual óptimo y es una barrera fundamental para el uso eficiente de la luz natural en los edificios (Shin et al., 2012).

El deslumbramiento se define como una sensación producida por luminancias dentro del campo visual mayores a las luminancias a la que el sistema visual está adaptado (DiLaura, 2010). El deslumbramiento subjetivo experimentado por las personas, se puede medir a partir de cuestionarios, la escala de cuatro puntos propuesta por Osterhaus y Bailey es una de las más utilizadas, su denominación en inglés y su correspondiente traducción al español es 'imperceptible = imperceptible', 'noticeable = notable', 'disturbing = perturbador' e 'intolerable = intolerable'. Por otro lado, existen modelos de deslumbramiento que describen la magnitud subjetiva de deslumbramiento experimentado por los observadores (CIE, 2020) y consisten en medidas fotométricas ajustadas a las respuestas de las personas, obtenidas por ej. a partir de la escala de 4 puntos de Osterhaus y Bailey previamente mencionada. Una particularidad de estos modelos, es que considera la dirección de la mirada en un punto fijo (Hopkinson, 1950). Esta es una gran limitación de los modelos, ya que, la dirección de la mirada es dinámica y obliga al ojo a readaptarse a las distintas condiciones fotométricas del ambiente (Kokoschka y Haubner, 1985). Por lo tanto, resulta muy complicado evaluar el confort visual efectivo de los ocupantes a partir de mediciones fijas en un puesto de trabajo (Johra et al., 2021).

Los modelos más utilizados son el DGP (Wienold y Christoffersen, 2006) y la métrica Ev (iluminancia vertical a nivel de los ojos) (Wienold et al., 2019). Sin embargo, la aplicabilidad de la métrica DGP y Ev está limitada por el alcance del conjunto de datos utilizado para su desarrollo, ya que no pueden representar todo el espectro de escenarios lumínicos encontrados en situaciones del mundo real (Quek et al., 2021). Además de esto, hay muchos aspectos psicológicos como el estado emocional, nivel de sensibilidad al deslumbramiento, interpretación de cuestionarios y escalas, y fisiológicos como, la corrección visual, pigmentación ocular, cronotipo, que podrían influir en la sensación de deslumbramiento y que aún no han sido bien identificados, muchos de ellos, se describen

detalladamente en el artículo de revisión bibliográfica de Pierson et al., (2017).

Un estudio reciente de revisión bibliográfica de la respuesta fisiológica de las personas frente a condiciones de discomfort visual en espacios de oficina, mostró una gran cantidad de inconsistencias en los modelos existentes y destacó la necesidad de un método más objetivo para derivar en los índices de deslumbramiento, como la respuesta fisiológica de las personas (Hamedani et al., 2019). La respuesta fisiológica registrada, mediante un seguidor de ojos, puede contribuir a una evaluación de la mirada de manera dinámica, teniendo en cuenta las fluctuaciones lumínicas del ambiente (Sarey Khanie, 2015).

La naturaleza de estas respuestas fisiológicas, se encuentra en el sistema nervioso autónomo del cuerpo humano, el que mediante varios reflejos, intenta disminuir las fluctuaciones del entorno, en este caso el exceso de luz, además de mantener el cuerpo fisiológicamente estable (Boyce, 2003). Algunos de los mecanismos de adaptación visual han sido ampliamente estudiados, pero los que aún requieren mayor validación estadística son :

- Grado de apertura ocular: un primer estudio mostró que el exceso de luz en el área de los ojos, producía cambios en las actividades de los músculos faciales alrededor del ojo (Berman et al., 1993). Posteriormente, este indicador mostró una correlación elevada con el deslumbramiento percibido por las personas en condiciones de deslumbramiento perturbador e intolerable (Yamin Garretón et al., 2015; Yamin Garretón et al., 2016).
- Frecuencia y amplitud de parpadeo espontáneo del ojo: la actividad de parpadeo espontáneo, puede verse afectada por la presencia de una fuente deslumbrante, especialmente si los sujetos miran ligeramente hacia arriba (Doughty, 2014). Por otra parte, existen otros estudios que han mostrado un aumento de la frecuencia de pestaños en trabajo de oficina con uso de PVD (Pantalla de visualización de datos) (Yamin Garretón et al., 2016).
- Tamaño relativo de la pupila: este indicador mostró una correlación media y significativa, con la evaluación subjetiva de las personas frente al deslumbramiento (Lin et al., 2015), y es considerado el mejor predictor de deslumbramiento "perturbador e intolerable" (Hamedani et al., 2020b).
- Movimientos oculares: varios estudios han mostrado una correlación significativa entre la sensación de deslumbramiento y las respuestas de las personas (Hamedani et al., 2020a; Lin et al., 2015; Sarey Khanie et al., 2013; Yamin Garretón et al., 2016).

Los indicadores oculares recientemente citados, demostraron inicialmente ser una herramienta adecuada para evaluar el deslumbramiento en climas soleados,

Tabla 1: Tres rangos de deslumbramiento. Fuente: Elaboración propia de los autores.

Métrica	Valores umbrales ('cut-off')		
	Imperceptible-notable BIN	Notable-Perturbador BNP	Perturbador-Intolerable BPI
Ev	2484 lx	3359 lx	4384 lx

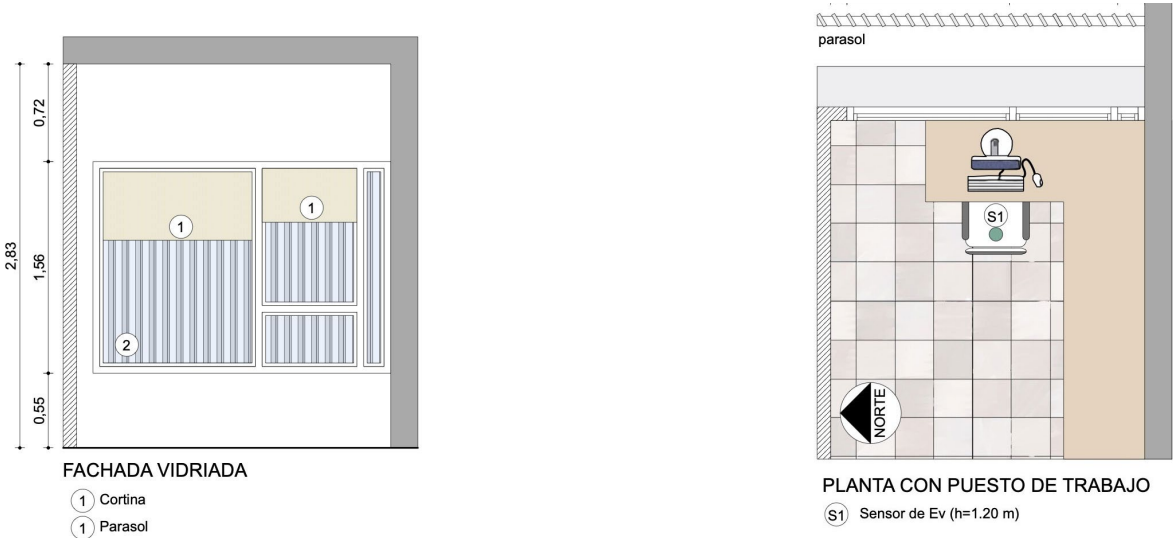


Figura 1: En la fachada vidriada (superior) se observa los dos tipos de elementos de control utilizados y las dimensiones de la ventana. En la planta (inferior) se observa el puesto de trabajo y la ubicación del sensor de iluminancia vertical. Fuente: Elaboración de los autores.

sin embargo, se requieren estudios adicionales para validar su uso y extender su aplicación, ya que estos fueron estudiados en situaciones de deslumbramiento desde 3000 lx hasta 11000 lx de Iluminancia vertical a nivel de los ojos (Yamin Garretón et al., 2015). Estos indicadores no fueron probados aún en situaciones de iluminancias verticales más bajas, que son las que se encuentran frecuentemente en espacios de oficina, un valor importante de detectar es el valor umbral entre deslumbramiento imperceptible y notable de 2484 lx establecido por Wienold et al. (2019), este valor umbral determina la frontera entre el confort y el discomfort visual, este valor también se denomina BCD del inglés (borderline confort discomfort) tiene su origen en los experimentos de Luckiesh y Guth (1949).

En el siguiente trabajo, se propone utilizar la apertura ocular desde una perspectiva objetiva y dinámica, para cuantificar el deslumbramiento a partir de una metodología novedosa. La medición de este indicador, se abordará a partir de cuatro rangos de apertura (oclusión, semi-oclusión, semi-apertura, apertura). El objetivo de validar estos indicadores oculares es:

- Determinar de qué manera se relaciona el grado de apertura ocular con los niveles de iluminancia

- vertical inferiores a 2484 lx (valor donde aparece la incomodidad por deslumbramiento), así como determinar si la percepción subjetiva del deslumbramiento de las personas corresponde a los rangos de Ev propuestos por Wienold et al. (2019).
- Una evaluación más precisa del deslumbramiento, que considere el dinamismo de la visión y detecte la aparición del deslumbramiento incómodo en espacios interiores como oficinas, puede prevenir, que las personas bloqueen las ventanas debido al riesgo potencial de deslumbramiento. Una ventana con acceso a iluminación natural controlada y sin fuentes deslumbrantes, permite los beneficios de la vista al exterior, cómo hacer mejoras en el funcionamiento cognitivo (Sharam et al., 2023), un adecuado funcionamiento del sistema circadiano (Mathew et al., 2023), entre otros aspectos importantes mencionados en Abd-Alhamid et al. (2023).

METODOLOGÍA

La investigación realizada, consiste en medir el comportamiento ocular, a través de la apertura ocular en cuatro rangos (oclusión/semi-oclusión/semi-apertura y



Figura 2: Las seis figuras, muestran un ejemplo de las tres condiciones de deslumbramiento generadas por los usuarios a partir de la manipulación de cortinas roller y la posición del monitor sobre el escritorio. Se accionó sólo la cortina derecha. Para tener una visión completa del entorno, se tomó una foto con lente ojo de pez, cuyo ángulo de visión es de 180°. Fuente: Elaboración de los autores.

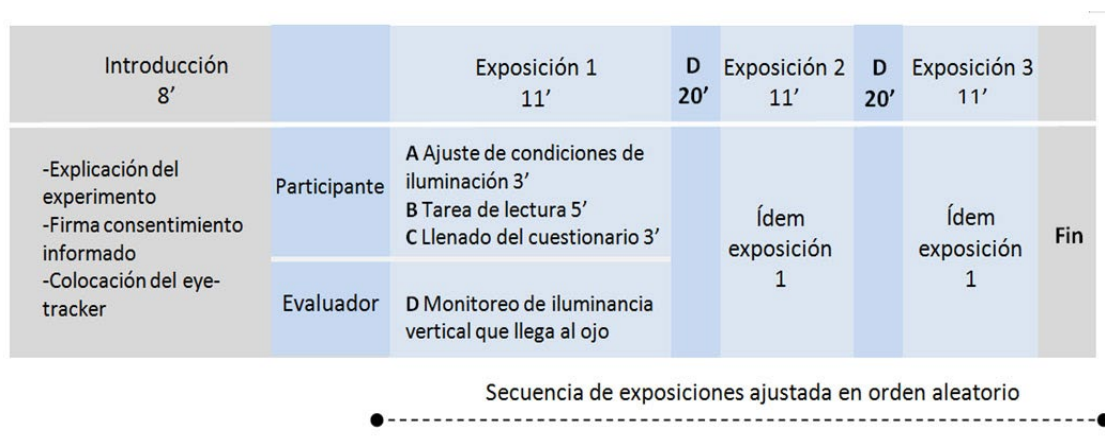


Figura 3: Secuencia de actividades en el experimento. D (tiempo de descanso). Fuente: Elaboración de los autores.

apertura) por medio de un eye-tracker. Estos parámetros se midieron en tres condiciones de iluminación: DN (deslumbramiento notable), DP (deslumbramiento perturbador) - DI (deslumbramiento intolerable) en función de la sensación subjetiva de deslumbramiento, las que fueron definidas por los participantes, en relación al tiempo que podían tolerar cada situación con deslumbramiento (Osterhaus, 1996; Osterhaus y Bailey, 1992), la descripción detallada se encuentra en la sección: Ajuste de las condiciones de iluminación.

Se evaluaron 9 participantes en estas tres condiciones lumínicas, donde cada uno, tenía que realizar una tarea de lectura en una oficina ubicada en el centro científico tecnológico CCT-Conicet, Mendoza. Las mediciones, se realizaron a partir de las 9:00 am hasta las 10:00 am aproximadamente, en el equinoccio de primavera durante los meses de septiembre (hora de inicio: altitud solar 13.06° y azimut 108) y octubre (hora de inicio: altitud solar 22°, azimut 100) de 2023. Las mediciones se realizaron en días completamente soleados. Durante el experimento, la iluminación artificial estuvo apagada y se utilizó sólo iluminación natural proveniente de la ventana. Las ventanas están ubicadas con orientación al este, cuentan con dimensiones de 2.00 x 1.56 m, con cortinas tipo "Roller" de interior y parasoles verticales exteriores (Figura 1). La disposición del puesto de trabajo, permitía la visión

frontal, perpendicular y/o paralela a la ventana (Figura 2). El procedimiento experimental se detalla en profundidad en la sección: Secuencia Experimental.

Se monitoreó la Iluminancia vertical que llega al ojo (Ev). Este indicador es adecuado sólo cuando la cantidad de luz que llega a los ojos, es elevada y superior al efecto producido por el contraste entre la luminancia de la fuente y el fondo (Wienold et al., 2019), como en el caso de este experimento. El objetivo, fue identificar de qué manera se relaciona el grado de apertura ocular, con los niveles de iluminancia vertical inferiores a 2484 lx, así como determinar, si la percepción subjetiva del deslumbramiento de las personas corresponde a los rangos de deslumbramientos propuestos por Wienold et al. (2019) indicados en la Tabla 1.

Los nueve participantes del estudio (7 mujeres, 2 hombres) tenían que contar con algunas características principales como, presentar visión normal y estar en buenas condiciones de salud para poder participar en el experimento. Las edades de los participantes fueron: media=35, ds=6.39, mín=23 máx=40. Esta muestra, incorpora nueve personas seleccionadas como sujetos experimentales de un estudio anterior con muestra de mayor tamaño (Yamin Garretón et al., 2015). A partir de pruebas estadísticas epidemiológicas de especificidad y sensibilidad, los participantes, fueron clasificados como sujetos experimentados y seleccionados

Tabla 2. Escala de deslumbramiento utilizado. Fuente: Elaboración propia de los autores.

Nombre	Pregunta	Respuesta
Binaria	¿Experimenta alguna molestia debido al deslumbramiento en este momento?	Sí No
Escala Osterhaus-Bailey	En este momento, ¿cómo describirías el nivel de deslumbramiento en su campo de visión?	Imperceptible Notable Perturbador Intolerable

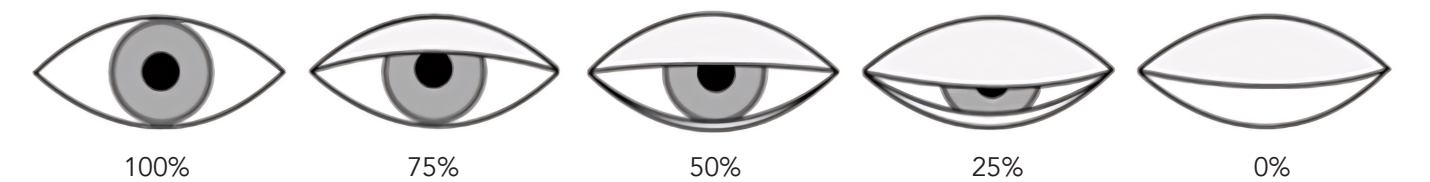


Figura 4: Diferentes porcentajes de apertura ocular. Fuente: Elaboración de los autores

para el ensayo. La sensibilidad es la probabilidad que la persona identifique como deslumbrante una condición que efectivamente lo es y la especificidad, es la probabilidad que la persona identifique como no deslumbrante una condición lumínica que no lo es. La relación entre la sensibilidad y la especificidad, nos da la exactitud diagnóstica. El cálculo por pasos de esta metodología, puede encontrarse en Rodríguez et al. (2017). Esta metodología de trabajar con un grupo reducido pero experimentado, ha sido validada en algunos trabajos de deslumbramiento (Hopkinson, 1957; Suk et al., 2016).

SECUENCIA EXPERIMENTAL

La secuencia de actividades realizadas por los participantes y evaluadores durante el experimento se puede observar en la Figura 3.

-Ajuste de las condiciones de iluminación: Como se observa en la Figura 3, los participantes (A) tuvieron que acomodar su puesto de trabajo mediante el accionamiento de las cortinas "Roller": subir o bajar cortinas y posicionar la pantalla para generar distintas direcciones de la visión respecto a la ventana. Visión de 0° (directa a la ventana), 90° (paralela a la ventana) y 45° (perpendicular a la ventana).

A partir de la modificación de su espacio de trabajo, los participantes pudieron experimentar las tres condiciones lumínicas: notable – perturbador – intolerable. Previamente, se les proporcionó una definición de las tres condiciones en función del tiempo en que podían tolerar cada situación con deslumbramiento (Osterhaus, 1996; Osterhaus y Bailey, 1992).

- 1. Deslumbramiento notable: Es el punto donde se nota el deslumbramiento por primera vez, hay una ligera experiencia de incomodidad, pero se puede tolerar

Tabla 3. Rangos de apertura. Fuente: Elaboración de los autores.

Porcentaje de apertura	Nombre de referencia
0-25%	Oclusión
25-50%	Semi-oclusión
50-75%	Semi-apertura
75-100%	Apertura

- durante varias horas.
- 2. Deslumbramiento perturbador: Se definió como una experiencia de malestar en que el deslumbramiento puede ser tolerado durante 15 a 30 minutos y requiere un cambio de las condiciones de iluminación.
 - 3. Deslumbramiento Intolerable: Es el deslumbramiento que, los sujetos no pueden soportar, cuentan con un punto de inflexión que, requiere cambios de las condiciones de iluminación inmediatas.

-Tarea de lectura: A continuación, como se observa en la Figura 3, los participantes (B) realizaron una tarea de lectura con la vista fija en la pantalla, el texto se proyectaba en el margen superior de la misma y la persona debía bajar el texto con el mouse, pero no su visión, ya que dirigir la visión hacia abajo, implica que los párpados se cierren, lubricando el ojo y reduciendo la aparición de los pestaños. Se realizó este tipo de tarea con la visión lo más fija posible en la pantalla, para obtener una señal más limpia. Las personas leyeron un texto en la pantalla en un tiempo de 5 minutos, tiempo para lograr que el ojo se adapte a la condición lumínica específica.

-Llenado de cuestionario: Al finalizar la tarea, como se observa en la Figura 3, los participantes (C) procedieron a llenar un cuestionario para cada una de las tres exposiciones

(Tabla 2). El orden de las exposiciones fue aleatorio, para evitar el sesgo de orden. El descanso entre cada exposición fue de 20 minutos, tiempo necesario para que se readapte el ojo de los participantes y puedan prepararse para la siguiente exposición.

-Monitoreo de iluminancia vertical: Como se observa en la Figura 3, los evaluadores (D) monitorearon y registraron la iluminancia vertical a nivel de los ojos al inicio y al final de la tarea de lectura realizada por los participantes; para corroborar que, el valor de iluminancia vertical no varió de manera importante durante la realización de la tarea. Se consideraron válidos, los escenarios en que el valor de iluminancia no varía significativamente entre la primera y segunda medición, reportándose el valor promedio de los dos puntos registrados. El sensor de iluminancia consistió en un equipo "LMT Lux 2 luxmeter" con rango de medición de 0.1 a 200000 lx, fecha de calibración 2023. Este sensor se montó sobre un trípode, se ubicó a la altura de los ojos del participante en dirección a la tarea, con un ángulo de 45°.

REGISTRO OCULAR

El grado de contracción muscular alrededor de los ojos que, reduce la luz que entra se midió basándose en el modelo de Tsao (Tsao, 2008) definido por la ecuación (1)

$$DEO = L/L_{\max} \quad (1)$$

Donde DEO, es el porcentaje de apertura ocular, L es el nivel de apertura del ojo en presencia de una fuente de deslumbramiento y L_{max} es la altura máxima del ojo, cuando está totalmente abierto. Se estableció un valor umbral para definir si el ojo estaba abierto o cerrado: si la relación era inferior a 0.2, entonces el ojo se consideraba cerrado, en caso contrario se definía como abierto (Figura 4).

En este trabajo, se propone clasificar la apertura ocular en cuatro rangos igualmente distribuidos (Tabla 3) para posteriormente calcular el tiempo en que los ojos estuvieron en dicha apertura.

DESCRIPCIÓN DEL EYE-TRACKER

El eye-tracker empleado fue diseñado específicamente para este estudio (Figura 5). El mismo consiste en un casco sobre el que se montó, mediante un brazo articulado, una cámara web de alta calidad (Calidad 720p, tamaño de lente 1/4", ángulo de visión de lente: 68,6°) que registra la imagen del rostro de los participantes. Las imágenes se tomaron con una frecuencia de 30 fotogramas por segundo y muestran una porción fija del rostro.

El análisis de las imágenes registradas, consistió primero en realizar el reconocimiento facial de los individuos empleando el modelo Face Landmark Detection de MediaPipe (Bazarevsky et al., 2019; Yan y Grishchenko, 2022) por medio de 478 puntos faciales, de los que sólo



Figura 5. Eye-tracker en uso. Fuente: Elaboración de los autores.

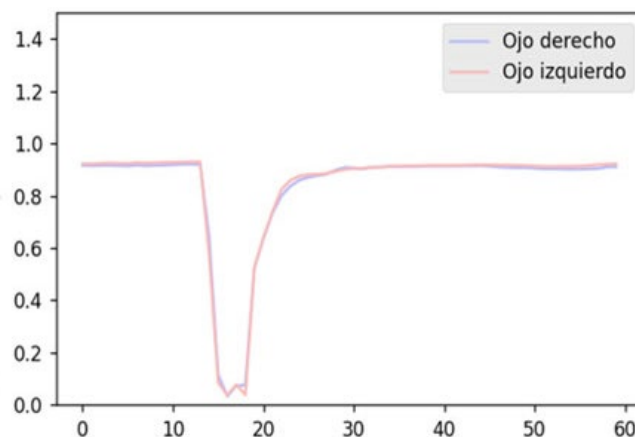
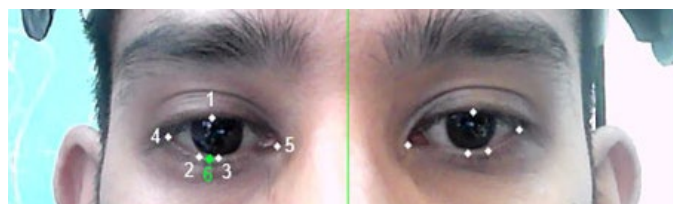


Figura 6. Cámara y script en funcionamiento. Izquierda: video captando los 10 puntos de interés detectados en blanco. Derecha: lectura de apertura ocular de los últimos 60 fotogramas. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 4. Medidas de iluminancia vertical (Ev) registradas en los tres escenarios evaluados. Fuente: Elaboración de los autores.

Ev	DN	DP	DI
Min	1050 lx	1100 lx	3600 lx
Max	2000 lx	3800 lx	12000 lx
Promedio	1496.11 lx	2411.11 lx	6966.66 lx
De	353.07 lx	706.12 lx	2723.96 lx

Tabla 5. Valores de apertura ocular (media, mediana y ds) para la sensación de deslumbramiento notable (DN). Fuente: Elaboración de los autores.

DN	Apertura 0-1		
	media	mediana	DS
Participante 1	0.92	0.94	0.08
Participante 2	0.83	0.86	0.12
Participante 3	0.86	0.91	0.16
Participante 4	0.71	0.76	0.18
Participante 5	0.87	0.88	0.08
Participante 6	0.80	0.84	0.15
Participante 7	0.78	0.80	0.10
Participante 8	0.79	0.80	0.08
Participante 9	0.84	0.84	0.11
Media total	0.82	0.85	0.12
Ds total	0.06	0.06	0.04

Tabla 6. Valores de apertura ocular (media, mediana y ds) para la sensación de deslumbramiento perturbador (DP). Fuente: Elaboración de los autores

DP	apertura 0-1		
	media	mediana	DS
Participante 1	0.85	0.86	0.11
Participante 2	0.80	0.82	0.10
Participante 3	0.75	0.79	0.13
Participante 4	0.75	0.81	0.18
Participante 5	0.89	0.90	0.07
Participante 6	0.72	0.75	0.14
Participante 7	0.81	0.82	0.09
Participante 8	0.89	0.90	0.07
Participante 9	0.78	0.79	0.09
Media total	0.80	0.82	0.10
Ds total	0.06	0.05	0.04

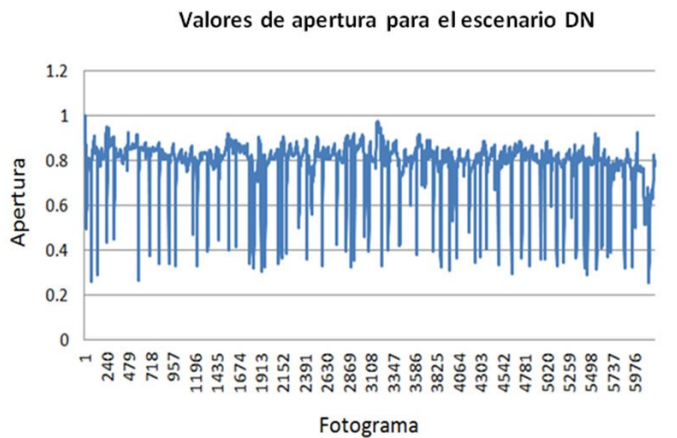


Figura 7. Valores de apertura ocular del participante 2 para el escenario DN en función del tiempo (30 fotogramas por segundo). Fuente: Elaboración de los autores.

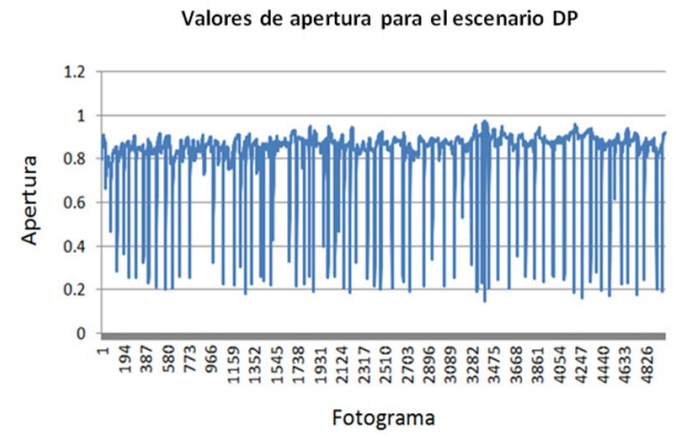


Figura 8. Valores de apertura ocular del participante 2 para el escenario DP en función del tiempo (30 fotogramas por segundo). Fuente: Elaboración propia de los autores.

diez fueron de interés correspondientes a los ojos. Luego, a través de un script escrito en Python, se calcularon las coordenadas de los puntos de interés. La apertura ocular se calculó a partir de la distancia entre dos puntos fundamentales, el punto 1 que corresponde al párpado superior y el punto 6 que corresponde al párpado inferior siendo la distancia promedio entre los puntos 2 y 3 (Figura 6. Izquierda).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores mínimos, máximos, medios y de desviación estándar (De) de Ev registrados en las tres condiciones pueden observarse en la Tabla 4.

En la Tabla 4, se puede observar las medidas de Ev registradas durante la realización de la tarea visual, que hacen referencia al deslumbramiento percibido. A partir de los valores promedios de Ev, se observa que en los escenarios con deslumbramiento percibido como notable y perturbador, los valores de Ev fueron menores a los valores de referencia de la Tabla 1. Mientras que los valores de deslumbramiento percibido como intolerable, fueron coincidentes con los valores de referencia de la Tabla 1.

Por otro lado, se calculó el nivel de coincidencia de las respuestas de las personas con los valores de referencia. Se observó que, para el escenario DN, sólo 2 de las 9 respuestas coincidieron con los valores de referencia

propuesto por Wienold (2019); para el escenario DP, 3 de las 9 respuestas coincidieron con los valores de referencia; mientras que para el escenario DI, 9 de las 9 respuestas coincidieron con los valores de referencia.

A partir de los valores promedios de Ev y del nivel de coincidencia de las respuestas subjetivas con los valores de la Tabla 1, se puede determinar que, en los escenarios de deslumbramiento percibido como notable y perturbador, los valores de Ev no fueron coincidentes a los valores de referencia de la Tabla 1. Estas diferencias pueden deberse a otros factores además de la Ev, como presencia de brillos o reflejos indeseados, que pueden haber afectado la sensación de deslumbramiento y no fueron evaluados en esta investigación.

VALORES DE APERTURA

En la Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7, se observa que, los valores de apertura ocular (media, mediana y desviación estándar "DS") de los nueve participantes en las tres condiciones de iluminación. Al final de cada tabla se puede observar también, la media total (med_tot) y la desviación estándar total (ds_tot) para obtener un valor de apertura por escenario. A la derecha de cada tabla se muestra la frecuencia de aperturas en las tres condiciones del participante 2 (Figura 7, Figura 8 y Figura 9).

Del análisis de la media total y la Ds total de los valores de apertura de los tres escenarios, se observó que, en el escenario DN con niveles lumínicos menores, el valor de apertura fue levemente mayor ($m=0.82$) respecto a los otros dos escenarios, este valor corresponde al rango de apertura (0.75-1). En el escenario DP con valores de deslumbramiento intermedios el valor medio de apertura fue levemente menor (0.80) pero también correspondiente a un rango de apertura total, por los que las diferencias entre los escenarios DN y DP no son evidentes. Por último, en el escenario DI el valor de apertura fue menor ($m=0.73$) correspondiente a un rango de semi-apertura (0.5-0.75), en este escenario con niveles de deslumbramiento más altos, se pone en evidencia la reducción de la apertura ocular.

Si bien estos datos muestran una tendencia general que, los valores de apertura disminuyen con el aumento de los niveles lumínicos, es decir que, a mayor nivel de deslumbramiento, menor nivel apertura, esta tendencia no se encuentra en todos los participantes. Por ejemplo, el participante 8 tuvo una apertura ocular promedio más elevada en el escenario DP (0.89) que en el escenario DN (0.79), y en el caso del participante 6, se registró un valor promedio de apertura ocular más elevada en el escenario DI (0.82) que en los otros dos escenarios (0.80 y 0.72).

Se observa, además en los escenarios DN (Tabla 5, participante 4) y DP (Tabla 6, participante 6), valores de

Tabla 7. Valores de apertura ocular (media, mediana y ds) para la sensación de deslumbramiento Intolerable (DI). Fuente: Elaboración de los autores

DI	apertura 0-1		
	media	mediana	DS
Participante 1	0.75	0.76	0.07
Participante 2	0.72	0.74	0.09
Participante 3	0.60	0.60	0.09
Participante 4	0.69	0.74	0.16
Participante 5	0.73	0.73	0.08
Participante 6	0.82	0.86	0.14
Participante 7	0.78	0.78	0.08
Participante 8	0.72	0.73	0.11
Participante 9	0.75	0.75	0.11
Media total	0.73	0.75	0.11
Ds total	0.06	0.07	0.03

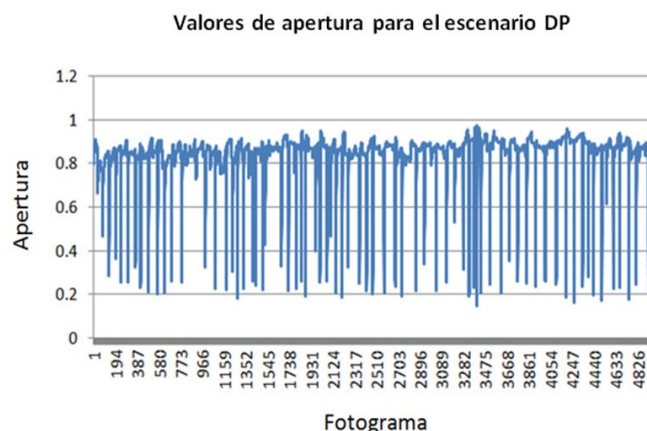


Figura 9. Valores de apertura ocular del participante 2 para el escenario DI en función del tiempo (30 fotogramas por segundo). Fuente: Elaboración propia de los autores.

Tabla 8. Pruebas de Z de Wilcoxon para comparación de medias (pruebas no paramétricas). Fuente: Elaboración de los autores.

	Z-Wilcoxon	Sig. (bilateral)
DN-DP	-0.830	0.407
DN-DI	-2.313	0.021
DP-DI	-2.018	0.044

Tabla 9. Porcentaje de tiempo en los 4 rangos de apertura para las tres condiciones de deslumbramiento percibido. La suma de tiempo total para cada situación fue del 100%. Fuente: Elaboración de los autores.

	DN				DP				DI			
	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.75	0.75-1	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.75	0.75-1	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.75	0.75-1
P1	1.8%	2.7%	5.1%	90.4%	1.5%	2.8%	12.4%	83.3%	1.1%	4.0%	38.0%	54.1%
P 2	1.6%	1.9%	3.7%	92.8%	0.2%	2.7%	15.1%	81.9%	0.6%	4.0%	49.8%	45.6%
P 3	1.2%	4.8%	4.4%	89.7%	1.1%	4.4%	17.0%	77.5%	0.0%	13.7%	78.8%	7.5%
P 4	5.0%	4.1%	5.6%	85.2%	5.1%	5.5%	16.8%	72.5%	5.6%	5.0%	39.0%	50.5%
P 5	0.8%	0.4%	1.2%	97.6%	0.2%	0.4%	7.7%	91.7%	0.2%	1.6%	46.1%	52.0%
P 6	1.8%	2.8%	6.7%	88.7%	1.6%	3.4%	14.2%	80.9%	1.6%	4.0%	7.1%	87.3%
P 7	1.2%	0.8%	2.8%	95.3%	0.8%	0.8%	1.4%	97.0%	0.4%	1.4%	12.5%	85.7%
P 8	1.0%	1.0%	6.2%	91.9%	0.2%	0.8%	17.2%	81.8%	0.8%	2.9%	44.3%	52.0%
P 9	1.0%	2.9%	5.3%	90.9%	1.8%	1.8%	14.0%	82.4%	1.0%	4.0%	41.3%	53.8%
Me	1.7%	2.4%	4.5%	91.4%	1.4%	2.5%	12.9%	83.2%	1.2%	4.5%	39.7%	54.3%
	100%				100%				100%			
De	1.3	1.4	1.7	3.6	1.5	1.7	5.2	7.2	1.6	3.6	20.9	23.3

Tabla 10. Pruebas de Wilcoxon para comparación de medias, p significación bilateral. Fuente: Elaboración de los autores.

	Oclusión		Semi-oclusión		Semi-apertura		Apertura	
	Z	p	Z	p	Z	p	Z	p
DN - DP	-0.984	0.325	-0.254	0.799	-2.549	0.011	-2.192	0.028
DN - DI	-1.544	0.123	-2.673	0.008	-2.666	0.008	-2.666	0.08
DP - DI	-0.511	0.610	-2.442	0.015	-1.599	0.110	-1.599	0.110

apertura menores (ojo en semi-apertura) respecto al resto de los participantes (ojo en apertura). Esto evidencia que, los valores promedio de apertura (media) no son una prueba estadística suficientemente robusta para discriminar las tres condiciones de deslumbramiento percibido. Si bien el escenario DI fue estadísticamente diferente a los otros dos escenarios ($p<0.05$) (Tabla 8), el escenario DN no fue estadísticamente diferente respecto al DP ($p>0.05$) (Tabla 8). Para determinar la diferencia entre estos dos escenarios (DN-DP), se calculó cuánto tiempo estuvieron los participantes en las 4 condiciones de apertura (oclusión, semi-oclusión, semi-apertura, apertura).

ANÁLISIS DE CUATRO RANGOS DE APERTURA

En la Tabla 9 se observa el porcentaje de tiempo en que los ojos de los participantes estuvieron en los 4 rangos de apertura para las tres condiciones de deslumbramiento percibido. De manera general, se puede decir que, en las tres condiciones de deslumbramiento percibido, los ojos estuvieron mayor tiempo en apertura (0.75-1), observándose también que la apertura en este rango va disminuyendo a medida que aumenta el deslumbramiento. De manera más particular, se pueden realizar las siguientes observaciones respecto a los cuatro

rangos de apertura. Por un lado, los valores medios del porcentaje de tiempo en oclusión (0-0.25) fueron de 1.7% (escenario DN), 1.4% (escenario DP) y 1.2% (escenario DI), las pruebas z-Wilcoxon (Tabla 10) muestran que no hubo diferencias estadísticamente significativas ($p>0.05$) entre los tres escenarios (Tabla 9). Por otra parte, los valores medios del porcentaje de tiempo en semi-oclusión (0.25-0.50) fueron de: 2.4% (escenario DN), 2.5% (escenario DP) y 4.5% (escenario DI), con diferencias significativas sólo entre los escenarios DN y DI y entre DP y DI ($p<0.05$). Respecto a los valores de la media en rango de semi-apertura (0.50 - 0.75) se evidencia que, el tiempo se cuadruplica entre el escenario DP (12.9%) y el DN (4.5%) y casi se triplica entre el escenario DI (39%) y el DP (12.9%). Las pruebas estadísticas mostraron que hubo diferencias significativas entre el escenario DN y DP y entre DN y DI ($p<0.05$). Por último, en apertura total (0.75-1) sólo hubo diferencias significativas entre el escenario DP (83.2%) y DI (54.3%).

A partir del análisis previamente reportado, es importante destacar que, en el rango de oclusión total no es posible diferenciar los tres escenarios lumínicos. Por el contrario, en los rangos de semi-apertura y apertura, se diferenció el escenario DN del DP. En los rangos de semi-apertura y semi-oclusión, se distinguió el escenario DN del DI. Por último, el rango de semi-oclusión fue el único capaz de diferenciar el escenario DP del DI. Es importante resaltar que, todos los escenarios lumínicos evaluados, se pudieron discriminar mediante indicadores oculares. Los tres rangos de apertura que mayor información proporcionaron fueron: el de semi-oclusión, semi-apertura y apertura.

El porcentaje de tiempo en los diferentes rangos de apertura ocular definidos en la investigación, es un indicador significativo del nivel de deslumbramiento, ya que permite diferenciar los 3 niveles existentes (notable, perturbador e intolerable). Considerándose este el resultado como el más relevante del estudio.

Es importante resaltar las limitaciones de este trabajo y las propuestas para futuros trabajos:

- En futuros trabajos, se podrían considerar los rangos de iluminación presentados a los participantes de dos maneras: predefinidas por los evaluadores y que todos los participantes experimenten las mismas condiciones de deslumbramiento percibido, y ajustados por los participantes según su experiencia previa (como fue el caso de este experimento).
- Es importante que, en futuros trabajos, se complementen las medidas de iluminancia vertical con modelos de deslumbramiento como el modelo DGP, que incluye medidas de contraste de luminancias. También es importante evaluar distintas tareas, no sólo tareas de lectura en pantalla, ya que las tareas típicas de oficinas incluyen tareas sobre en plano horizontal (teclado, papel).

- Además, es necesario incluir más participantes con distinto nivel de sensibilidad al deslumbramiento, para poder sacar resultados más robustos. También sería importante complementar la metodología propuesta con otros indicadores oculares, como el número de pestañeos, o realizar análisis de frecuencias para detectar patrones en el comportamiento ocular que se repitan bajo diferentes condiciones de deslumbramiento percibido.
- Del mismo modo, sería interesante en futuros trabajos, contrastar la información obtenida de los cuestionarios acerca del confort visual y relacionarla con los indicadores oculares. Para determinar si hay sesgos en las respuestas de las personas, producto del diseño experimental. Se han realizado numerosas sugerencias y críticas sobre la validez de las preguntas utilizadas en los cuestionarios subjetivos (Fotios y Kent, 2021; Quek et al., 2023). Esto está relacionado a la aparición de distintos tipos de sesgos en los diseños experimentales, por ejemplo, el efecto Hawthorne "modificación de la respuesta del participante como consecuencia del hecho de saber que están siendo estudiados, y no en respuesta al estudio experimental" (Perera, 2023) entre otros tipos de sesgos.
- Por último, la investigación contribuye a sentar las bases para crear un sistema de control, para regular los dispositivos de sombreado en oficinas a partir de la medición de deslumbramiento siguiendo la apertura ocular de manera dinámica, en contraste con las mediciones lumínicas actuales que se realizan en un punto de medición fijo.

CONCLUSIONES

Los modelos físicos están adaptados a las respuestas de las personas por medio de cuestionarios. Pero estos cuestionarios tienen una validez limitada (Quek et al., 2023) y pueden influir en las respuestas obtenidas según sea el tipo de cuestionario empleado. Los indicadores oculares, podrían proveer información objetiva respecto al grado de deslumbramiento experimentado por los participantes para cuantificar la sensación de las personas. Otra limitación, es que los modelos por la ubicación de los sensores, se colocan en una posición fija y consideran la dirección de la mirada en una dirección limitada. Por otra parte, los indicadores oculares, aportan información de la mirada de manera dinámica, registrando las distintas condiciones fotométricas del ambiente, a través de las fluctuaciones oculares.

El objetivo de la investigación fue proponer cuatro rangos de apertura ocular para evaluar el deslumbramiento. Sobre la muestra analizada, se encontró una tendencia a que es posible la discriminación de las condiciones de deslumbramiento percibido (DN-DP-DI) a partir de tres rangos de apertura: semi-oclusión (0.25-0.50) y semi-apertura (0.50-0.75) y apertura (0.75-1). Mientras que, en el rango de oclusión (0-0.25) no fue posible diferenciar los tres escenarios lumínicos. Respecto a los rangos propuestos, estos consistieron en 4 rangos igualmente distribuidos, en futuros trabajos se podría ajustar la distribución de los rangos, para analizar de manera más efectiva los niveles de deslumbramiento.

Respecto al nivel de coincidencia de las respuestas de las personas y los valores propuestos por Wienold et al. (2019), se puede concluir que, a partir de los valores promedios y del nivel de coincidencia de las respuestas subjetivas en los escenarios de deslumbramiento percibido como notable y perturbador, los valores de E_v medios, fueron menores a los valores de referencia, mientras que los valores de deslumbramiento percibido como intolerable, son coincidentes con los valores de referencia de la Tabla 1, sin embargo, se necesitan más estudios de validación para confirmar estos hallazgos.

La presencia de deslumbramiento en condiciones de deslumbramiento perturbador e intolerable. Este estudio visualizó la posibilidad de diferenciar entre condiciones de deslumbramiento notable y perturbadoras. Ajustar las herramientas, que ayudan a desarrollar modelos de deslumbramiento o incrementar su validez, podrían servir para una mejor evaluación del confort visual de los ocupantes en espacios interiores, a su vez, este trabajo pretende sentar las bases para desarrollar un algoritmo, capaz de identificar patrones oculares para realizar ajustes automáticos en los dispositivos de sombreado.

Es importante resaltar que, estudios previos a este trabajo (Hamedani et al., 2019), ya habían encontrado la posibilidad de cuantificar la presencia de deslumbramiento mediante indicadores oculares. Más específicamente, algunos estudios realizados en los últimos años (Hamedani et al., 2020), demostraron que la amplitud de pestaños y el índice de agitación pupilar, podían cuantificar ciertas condiciones de deslumbramiento relativo (que incluye condiciones de deslumbramiento imperceptible y notable); mientras que los movimientos oculares (fijaciones) y el diámetro de la pupila, podían cuantificar niveles de deslumbramiento más extremos (perturbador e intolerable). La diferencia evidenciada en este estudio, respecto de los analizados previamente, es que en esta investigación se determinó la posibilidad de diferenciar todo el espectro de condiciones de deslumbramiento, las que van desde notable hasta

perturbador e intolerable, mediante un sólo indicador ocular que es la apertura ocular en sus cuatro rangos. Ajustar las herramientas que ayudan a desarrollar modelos de deslumbramiento o incrementar su validez, pueden servir para una mejor evaluación del confort visual de los ocupantes en espacios interiores.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo derivado del proyecto "Diferencias en la adaptación visual bajo dos climas luminosos diferentes y su influencia en la percepción de deslumbramiento molesto en oficinas" financiada por PIBBA 0915 Conicet- PICT-2019-04356, PUE - Inahe

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd-Alhamid, F., Kent, M., y Wu, Y. (2023). Quantifying window view quality: A review on view perception assessment and representation methods. *Building and Environment*, 227, 109742. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132322009726?via%3Dihub>
- Aries, M. B. C., Veitch, J. A., y Newsham, G. R. (2010). Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort. *Journal of Environmental Psychology*, 30(4), 533–541. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2009.12.004>
- Bazarevsky, V., Kartynnik, Y., Vakunov, A., Raveendran, K., y Grundmann, M. (2019). BlazeFace: Sub-millisecond neural face detection on mobile gpus. *ArXiv Preprint ArXiv:1907.05047*. <https://arxiv.org/abs/1907.05047>
- Berman, S. M., Bullimore, M. A., Jacobs, R., Bailey, I. L., y Gandhi, N. (1993). An Objective-Measure of Discomfort Glare. 1993 *IESNA Annual Conference*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00994480.1994.10748079>
- Boyce, P. R. (2003). *Human factors in lighting*. Crc Press.
- CIE S 017/E:2020. (2020). ILV: International Lighting Vocabulary, 2nd Edition. <https://cie.co.at/publications/ilv-international-lighting-vocabulary-2nd-edition-0>
- DiLaura, D. L. (2010). A New Lighting Handbook. *LEUKOS* 6(4), 256–258. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/15502724.2010.10732125>
- Doughty, M. J. (2014). Spontaneous eyeblink activity under different conditions of gaze (eye position) and visual glare. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 252, 1147–1153. <https://doi.org/10.1007/s00417-014-2673-8>
- Fotios, S., y Kent, M. (2021). Measuring discomfort from glare: Recommendations for good practice. *Leukos*, 17(4),

338–358. <https://eprints.whiterose.ac.uk/165602/3/fotios%20kent%202020%20measuring%20discomfort%20AUTHORS%20FINAL%20VERSION.pdf>

Hamedani, Z., Solgi, E., Skates, H., Hine, T., Fernando, R., Lyons, J., y Dupre, K. (2019). Visual discomfort and glare assessment in office environments: A review of light-induced physiological and perceptual responses. *Building and Environment*, 153, 267–280. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.035>

Hamedani, Z., Solgi, E., Hine, T., Skates, H., Isoardi, G., y Fernando, R. (2020a). Lighting for work: A study of the relationships among discomfort glare, physiological responses and visual performance. *Building and Environment*, 167, 106478. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106478>

Hamedani, Z., Solgi, E., Hine, T., y Skates, H. (2020b). Revealing the relationships between luminous environment characteristics and physiological, ocular and performance measures: An experimental study. *Building and Environment*, 172, 106702. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106702>

Hopkinson, R. G. (1950). The multiple criterion technique of subjective appraisal. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 2(3), 124–131. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1080/17470215008416585>

Hopkinson, R. G. (1957). Evaluation of glare. *Illuminating Engineering*, 52(6), 305–316. https://www.brikbases.org/sites/default/files/ies_038.pdf

Johra, H., Gade, R., Poulsen, M. Ø., Christensen, A. D., Khanie, M. S., Moeslund, T., y Jensen, R. L. (2021). Artificial Intelligence for Detecting Indoor Visual Discomfort from Facial Analysis of Building Occupants. *Journal of Physics: Conference Series*, 2042(1), 12008. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2042/1/012008>

Kokoschka, S., y Haubner, P. (1985). Luminance ratios at visual display workstations and visual performance. *Lighting Research & Technology*, 17(3), 138–144. <https://doi.org/10.1177/14771535850170030101>

Lin, Y., Fotios, S., Wei, M., Liu, Y., Guo, W., y Sun, Y. (2015). Eye movement and pupil size constriction under discomfort glare. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 56(3), 1649–1656. <https://doi.org/10.1167/iovs.14-15963>

Luckiesh, M., y Guth, S. K. (1949). Brightness in the visual field at the borderline between comfort and discomfort (BCD). *Illuminating Engineering*, 44, 650–670. https://www.brikbases.org/sites/default/files/ies_035_0.pdf

Mathew, V., Kurian, C. P., Varghese, S. G., Priyadarshini, K., y Bhandary, S. S. (2023). Real-time investigations and simulation on the impact of lighting ambience on circadian stimulus. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(5), 6703–6716. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-022-07510-0>

Osterhaus, W. K. E. (1996). Discomfort glare from large area glare sources at computer workstations. In *Proceedings for the 1996 International Daylight Workshop, Building with*

Daylight: Energy-Efficient Design., (pp. 103–110). https://www.researchgate.net/publication/323350484_Review_of_Factors_Influencing_Discomfort_Glare_Perception_from_Daylight

Osterhaus, W. K. E., y Bailey, I. L. (1992). Large area glare sources and their effect on visual discomfort and visual performance at computer workstations. *Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1825–1829. <https://www.osti.gov/servlets/purl/10125235>

Perera, A. (2023). Hawthorne effect: Definition, how it works, and how to avoid it. *Simply Psychology*. <https://www.simplypsychology.org/hawthorne-effect.html>

Pierson, C., Wienold, J., y Bodart, M. (2017). Discomfort glare perception in daylighting: influencing factors. *Energy Procedia*, 122, 331–336. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.332>

Quek, G., Jain, S., Karmann, C., Pierson, C., Wienold, J., y Andersen, M. (2023). Comparison of questionnaire items for discomfort glare studies in daylit spaces. *Lighting Research & Technology*, 14771535231203564. <http://dx.doi.org/10.1177/14771535231203564>

Quek, G., Wienold, J., Khanie, M. S., Erell, E., Kaftan, E., Tzempelikos, A., Konstantzos, I., Christoffersen, J., Kuhn, T., y Andersen, M. (2021). Comparing performance of discomfort glare metrics in high and low adaptation levels. *Building and Environment*, 206, 108335. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108335>

Rodriguez, R. G., Garretón, J. A. Y., y Pattini, A. E. (2017). An epidemiological approach to daylight discomfort glare. *Building and Environment*, 113, 39–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.028>

Sarey Khanie, M. (2015). *Human Responsive Daylighting in Offices: a Gaze-driven Approach for Dynamic Discomfort Glare Assessment*. Ecole polytechnique federale de Lausanne. <http://thedaylightsite.com/human-responsive-daylighting-in-offices/>

Sarey Khanie, M., Stoll, J., Mende, S., Wienold, J., Einhäuser, W., y Andersen, M. (2013). *Uncovering relationships between view direction patterns and glare perception in a daylit workspace*. https://www.researchgate.net/publication/280728553_Uncovering_relationships_between_view_direction_patterns_and_glare_perception_in_a_daylit_workspace

Sharam, L. A., Mayer, K. M., y Baumann, O. (2023). Design by nature: The influence of windows on cognitive performance and affect. *Journal of Environmental Psychology*, 85, 101923. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2022.101923>

Shin, J. Y., Yun, G. Y., y Kim, J. T. (2012). Evaluation of daylighting effectiveness and energy saving potentials of light-pipe systems in buildings. *Indoor and Built Environment*, 21(1), 129–136. <https://doi.org/10.1177/1420326X11420011>

Suk, J. Y., Schiler, M., y Kensek, K. (2016). Absolute glare factor and relative glare factor based metric: Predicting and quantifying levels of daylight glare in office space.

Energy and Buildings, 130, 8–19. <https://thuvien.huce.edu.vn/kiposdata1/baotapchi/Tapchinuocngoai/Energy%20and%20Buildings/Energy%20and%20Buildings.Vol%20130.A3.pdf>

Tsao, L.-J. (2008). Driver drowsiness detection and warning under various illumination conditions. Master Tesis. *Institute of Computer Science and Information Engineering National Central University Chungli*.

Wienold, J., y Christoffersen, J. (2006). Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and Buildings*, 38(7), 743–757. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778806000715>

Wienold, J., Iwata, T., Sarey Khanie, M., Erell, E., Kaftan, E., Rodriguez, R. G., Yamin Garretón, J. A., Tzempelikos, T., Konstantzos, I., Christoffersen, J., y others. (2019). Cross-validation and robustness of daylight glare metrics. *Lighting Research & Technology*, 51(7), 983–1013. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1477153519826003>

Yamin Garretón, J. A., Rodriguez, R. G., y Pattini, A. E. (2016). Glare indicators: an analysis of ocular behaviour in an office equipped with venetian blinds. *Indoor and Built Environment*, 25(1), 69–80. <https://doi.org/10.1177/1420326X14538082>

Yamin Garretón, J., Rodriguez, R. G., Ruiz, A., y Pattini, A. E. (2015). Degree of eye opening: A new discomfort glare indicator. *Building and Environment*, 88, 142–150. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132314003631>

Yan, G., y Grishchenko, I. (2022). *MediaPipeFace Landmark*. https://www.researchgate.net/publication/364279614_MediaPipe's_Landmarks_with_RNN_for_Dynamic_Sign_Language_Recognition

PERCEPCIÓN TÉRMICA DE USUARIOS EN LA VIVIENDA VERNÁCULA DE LA COMUNIDAD URO DEL LAGO TITICACA EN PERÚ

Recibido 27/04/2023
 Aceptado 06/06/2024

THERMAL PERCEPTION OF USERS IN THE VERNACULAR HOUSING OF THE URO COMMUNITY OF LAKE TITICACA IN PERU

PERCEPÇÃO TÉRMICA DOS USUÁRIOS NA HABITAÇÃO VERNACULAR DA COMUNIDADE URO DO LAGO TITICACA, NO PERU

Diana Karen Pari-Quispe

Magíster en Arquitectura y Urbanismo
 Docente e investigadora Escuela Profesional de Arquitectura y Urbanismo
 Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-1580-2968>
 diana.pari@unap.edu.pe (Autora de Correspondencia)

Joára Cronemberger-Ribeiro Silva

Doctora Arquitectura y Construcción
 Docente y Vice-coordinadora del Laboratorio de Control Ambiental y Eficiencia Energética (LACAM),
 Facultad de Arquitectura y Urbanismo Universidade de Brasília, Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-8649-451X>
 joaracronemberger@unb.br

Samuel Huaquisto-Cáceres

Doctor Ciencia Tecnología y Medio Ambiente
 Docente e Investigador RENACYT, Escuela Profesional de Ingeniería Civil
 Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-9294-6359>
 shuaquisto@unap.edu.pe

Hugo Anselmo Ccama-Condori

Doctor Ciencia Tecnología y Medio Ambiente
 Docente e Investigador, Director del Instituto de Investigación en Arquitectura y Construcciones (IARCO),
 Escuela Profesional de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú
<https://orcid.org/0000-0003-2886-7901>
 hccama@unap.edu.pe

Leyda Cinthia Aza-Medina

Magíster en Tecnología en la Arquitectura
 Docente e investigadora RENACYT, Escuela Profesional de Arquitectura y Urbanismo
 Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-3707-2126>
 lcaza@unap.edu.pe



RESUMEN

El objetivo de la siguiente investigación fue realizar un estudio de campo, para conocer la percepción térmica de los usuarios de la vivienda vernácula en clima frío de la región Altoandina peruana. Las unidades analizadas fueron viviendas construidas en base a "totora" de la comunidad Uro. El estudio de campo desarrollado consistió en caracterizar el desempeño térmico de la vivienda, determinar la superficie corporal y aislamiento de ropa, valorar la sensación, preferencia y aceptabilidad térmica, determinar las estrategias de ajustes personales y calcular la temperatura neutra. Se recogieron 78 encuestas válidas en dos períodos estacionales (verano e invierno). Los resultados revelan que, los usuarios de la vivienda se encuentran incómodos. La preferencia apunta a ambientes más cálidos y secos. La temperatura neutra en verano fue de 19.62 °C y en invierno de 21.98 °C. Los habitantes del lugar evidenciaron tener la expectativa que el ambiente puede mejorarse térmicamente con mayor aislamiento.

Palabras clave

vivienda vernácula, confort térmico, percepción térmica, condición climática.

ABSTRACT

The objective of this work was to conduct a field study to determine the thermal perception of users of vernacular housing in the cold climate of the Peruvian High Andean region. The units analyzed were houses built by the Uro community using "totora" (bulrush reeds). The field study characterized the dwelling's thermal performance, determined body surface area and clothing insulation, assessed thermal sensation, preference, and acceptability, determined personal adjustment strategies, and calculated the neutral temperature. Seventy-eight valid surveys were collected in two periods (summer and winter). The results reveal that the dwelling's users are uncomfortable. The preference points to warmer and drier environments. The neutral temperature was 19.62 °C in summer and 21.98 °C in winter. However, the inhabitants had the expectation that the environment could be thermally improved with more insulation.

Keywords

vernacular housing, thermal comfort, thermal perception, climate conditions.

RESUMO

O objetivo da pesquisa a seguir foi realizar um estudo de campo para descobrir a percepção térmica dos usuários de habitações vernaculares no clima frio da região dos Altos Andes peruanos. As unidades analisadas foram moradias construídas em "totora" da comunidade Uro. O estudo de campo consistiu em caracterizar o desempenho térmico da habitação, determinar a área de superfície corporal e o isolamento das roupas, avaliar a sensação, preferência e aceitabilidade térmica, determinar as estratégias de ajuste pessoal e calcular a temperatura neutra. Setenta e oito questionários válidos foram coletados em dois períodos sazonais (verão e inverno). Os resultados revelam que os usuários da residência não se sentem confortáveis. A preferência é por ambientes mais quentes e secos. A temperatura neutra no verão foi de 19,62 °C e de 21,98 °C no inverno. Os habitantes do local evidenciaram a expectativa de que o ambiente possa ser melhorado termicamente com mais isolamento.

Palavras-chave:

habitação vernacular, conforto térmico, percepção térmica, condição climática.

INTRODUCCIÓN

La región Altoandina del Perú, presenta un clima frío de tundra y glaciar, radiación solar elevada, baja oscilación térmica anual y oscilación térmica diaria elevada. Debido a esta variabilidad climática, el comportamiento térmico de las edificaciones es diferente y la altitud influye en gran medida (Molina et al., 2023). Bajo este contexto, la comunidad Uro enfrenta principalmente en el periodo de invierno malestares, enfermedades respiratorias e incluso la muerte. Para mitigar esta situación los lugareños acostumbran usar ropa gruesa para protegerse del frío. Según registros del SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, del Perú), la temperatura exterior promedio en la comunidad desciende en verano a 3.50 °C y en invierno a -1.60 °C, esto evidencia el clima adverso del lugar.

La comunidad Uro se emplaza en el lago Titicaca, considerado el lago navegable más alto del mundo, a 3800 metros sobre el nivel del mar. Es un pueblo antiguo, su existencia data desde hace más de 500 años d.c. La vida está íntimamente vinculada al lago y sus recursos, del total de población el 60% está asentadas en islas flotantes, el resto vive en tierra firme. La "Totorá" (*Schoenoplectus Totorá*) es el principal medio de subsistencia (Aza-Medina et al., 2023, p. 2; Hidalgo-Cordero et al., 2023). Ya sea que el material esté dispuesto de manera suelta, trenzada o tejida como mantas de Totorá, o en la construcción de las islas artificiales, viviendas, embarcaciones (Hidalgo-Cordero y Aza-Medina, 2023, p. 2; Hýsková et al., 2020).

Se han realizado importantes estudios sobre confort térmico en viviendas vernáculas en regiones de baja altitud (Costa-Carrapiço et al., 2022; Malik y Bardhan, 2022; Wídera, 2021). Sin embargo, se encontraron escasos estudios en regiones de gran altitud, por lo que se hace necesario investigar, considerando que el confort térmico es uno de los parámetros importantes que puede proporcionar información para la adaptación de estrategias en viviendas, debido a su impacto en la salud humana, productividad, calidad del espacio interior y la reducción del consumo energético (Malik y Bardhan, 2022). Proporcionar información para mejorar las viviendas es crucial y desafiante, debido que, este depende de muchos factores como: aspectos climáticos, psicológicos, fisiológicos y culturales que requieren estudios de campo (Abdollahzadeh et al., 2023). Por lo tanto, una cuestión fundamental para realizar estudios de campo, es conocer la percepción térmica de los usuarios de una vivienda a los cambios de temperatura en el interior del ambiente (Camuffo, 2019, p. 15).

De acuerdo a Chang et al. (2021), los estudios sobre viviendas vernáculas, se centran fundamentalmente en la adaptación climática, cuyo propósito es proporcionar estrategias de diseño pasivo que se adapten al clima y sean energéticamente eficientes. Así mismo, Xiong et

al. (2019), indica que el confort térmico en viviendas vernáculas, se centra en la adaptabilidad de los usuarios al clima para proporcionar condiciones ambientales térmicas aceptables. Por lo tanto, las viviendas vernáculas son lugares donde los usuarios se adaptan al clima, por lo que se requiere mejorar las condiciones internas de la vivienda.

En ese contexto, el objetivo de este estudio fue realizar un estudio de campo para conocer la percepción térmica de los usuarios de la vivienda vernácula en clima frío, típico de la región Altoandina peruana, con la finalidad de proporcionar información de la percepción térmica de los usuarios de la vivienda para recomendar estrategias adaptativas a fin de mejorar las condiciones internas de éstas.

MÉTODO

ÁREA DE ESTUDIO

Comunidad Uro

Se definió como área de estudio a la comunidad Uro en el departamento de Puno - Perú, en el lago Titicaca con latitud Sur de 15° 49' 14", longitud Oeste de 69° 58' 12" y altitud de 3900 metros sobre el nivel del mar. La comunidad se encuentra emplazada en islas flotantes construidas con "Totorá", este lugar se encuentra a 5 km del puerto de la ciudad de Puno. Las islas de los Uros, están conformadas por más de 100 unidades que se organizan en una franja alineada, se accede por la mitad dividiéndose en dos zonas, en dirección Norte y Sur, (Figura 1). Las islas enfocadas en el uso de la vivienda son las más frecuentes, las alberga en forma de medialuna con un espacio central que funciona como patio.

La vivienda vernácula de la comunidad Uro

Las viviendas, se caracterizan por tener una forma compacta y de un nivel. El techo es a dos aguas, depende de la puerta para ventilar el ambiente. El piso suele estar entablado de madera o en Totorá suelta, se eleva para evitar el ingreso de la humedad en 50 cm respecto al nivel del suelo de la isla (Figura 2a). "La estructura está compuesta por listones de madera de 2 pulgadas empotrados con clavos" (Steffens et al., 2017, p. 2), que sirven de soporte (Figura 2b). Los muros de la vivienda consisten en mantas de Totorá seca tejida a mano "kesanas", haciendo un espesor aproximado de 3 pulgadas, se constató que la técnica de tejido de los muros varía en relación a la del techo, en este último inclusive se observó Totoras de mayor longitud y con una técnica diferente de trenzado (Figura 2c).

La vivienda, con el pasar del tiempo ha sufrido cambios, en sus inicios contaba con planta circular y techo cónico, (Figura 3a). Actualmente presenta una planta rectangular o cuadrada (Figura 3b). Además, se observa

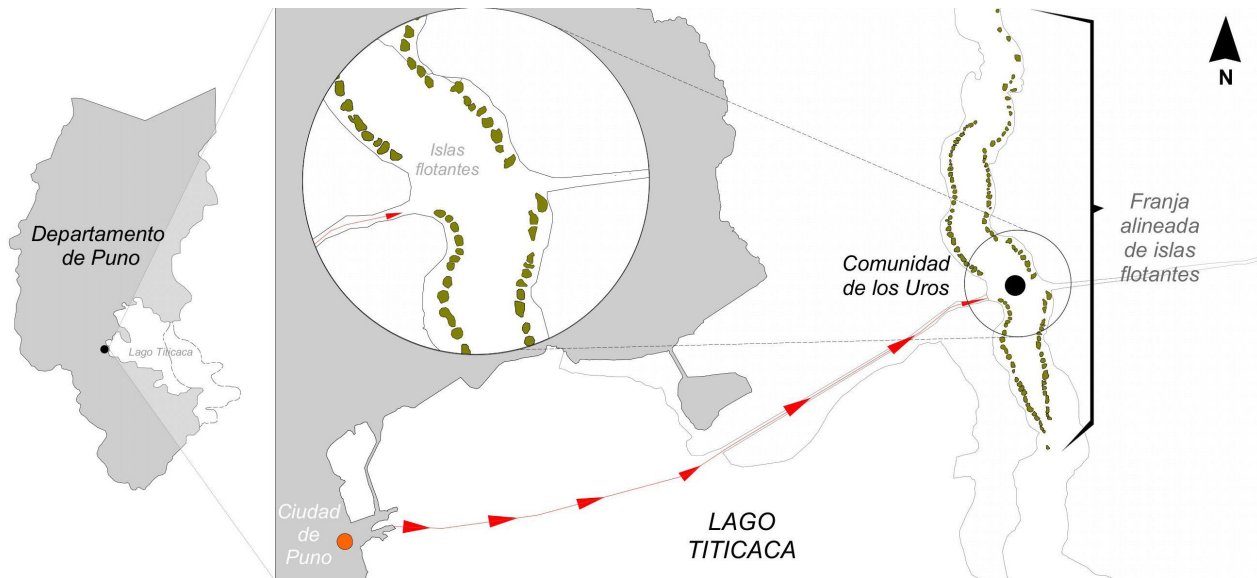


Figura 1. Islas flotantes - ubicación. Fuente: Elaboración de los autores.

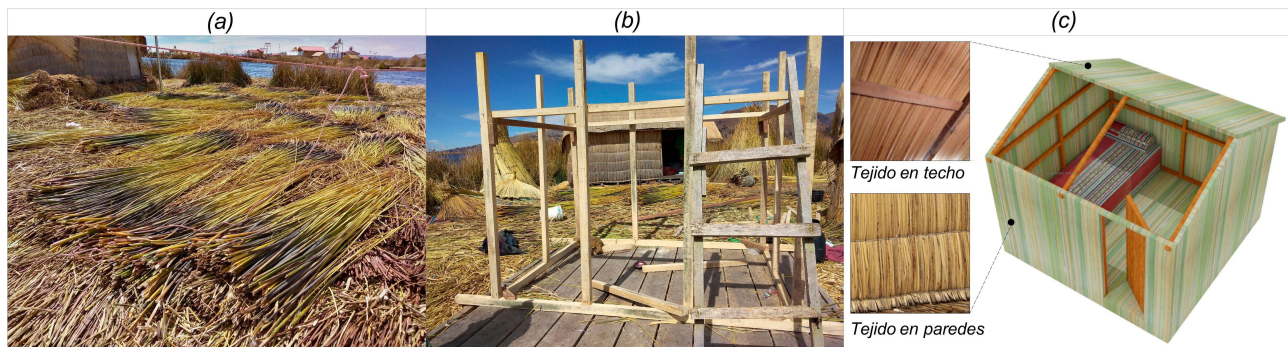


Figura 2. Vivienda Uro - armado. Fuente: Elaboración de los autores.

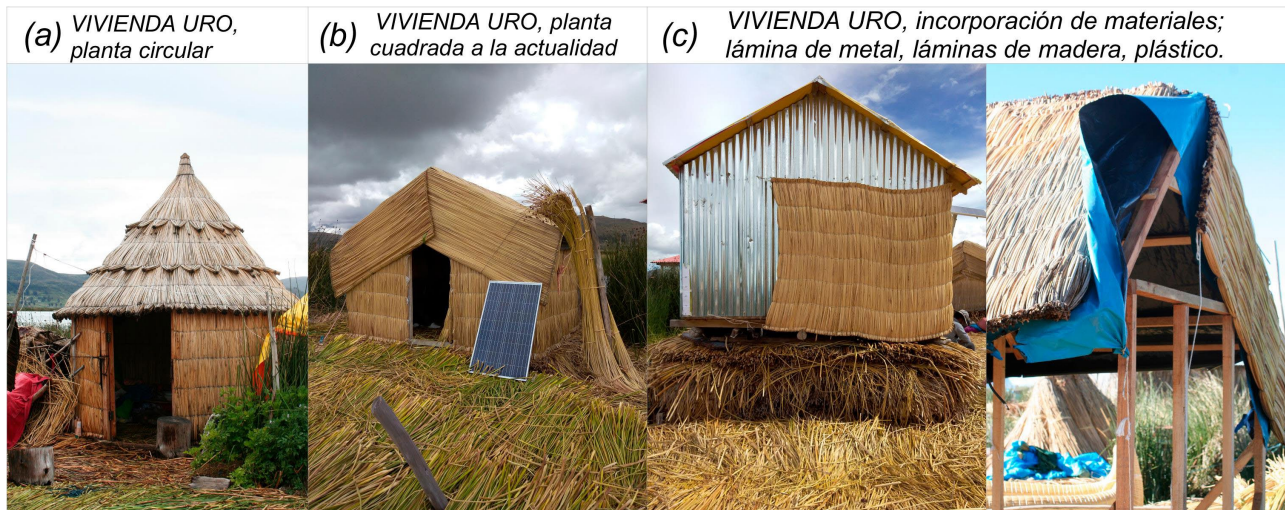


Figura 3. Evolución de la forma y materiales. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 4. Fotos interiores y exteriores de las viviendas vernáculas. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 1. Tamaño de la muestra. Fuente: Elaboración de los autores

Descripción		Total		Verano		Invierno	
		n = 78		n = 50		n = 28	
		Muestra	Porcentaje	Muestra	Porcentaje	Muestra	Porcentaje
Género	Femenino	52	67%	33	66%	19	68%
	Masculino	26	33%	17	34%	9	32%

la incorporación de materiales actuales en techos y muros como; láminas de metal, láminas de madera y plástico, que desfigura lo autóctono (Figura 3c).

El uso interno de las construcciones se da en gran medida como ambiente múltiple, cumpliendo la función de cocina, almacén y dormitorio; atendiendo las necesidades básicas en un sólo lugar (Figura 4a), en otros casos como un ambiente de uso dormitorio (Figura 4b).

TAMAÑO DE LA MUESTRA

Para determinar el tamaño de la muestra, se utilizó el muestreo no probabilístico en cada período de estudio. Se consideró la disponibilidad y disposición de los usuarios para participar en el estudio (Tabla 1).

ESTUDIO DE CAMPO

Se realizaron encuestas con la medición paralela del desempeño térmico de la vivienda durante siete días; 5 días en la estación de verano (06/01/22 al 13/01/22) y 2

días en la estación de invierno (15/07/22 al 16/07/22). Se tomó como estudio a 21 islas de la comunidad Uro por la accesibilidad. Se utilizaron las normas y estándares ASHRAE 55-2017, ISO 7730, ISO 10551 e ISO 7726 (ANSI/ASHRAE 55, 2017a, pp. 8–19; ISO 7726, 1998, p. 23; ISO 7730, 2005; ISO 10551, 1995). Se recopilaron 78 respuestas válidas de sensación, preferencia y aceptabilidad térmica. Fueron entrevistadas 50 personas en 40 viviendas en el período de verano y 28 personas en 19 viviendas en el período de invierno. Los participantes fueron varones y mujeres con edades entre los 18 y 60 años.

Desempeño térmico interno de la vivienda

Se registraron datos de temperatura del aire, humedad relativa, temperatura de globo y velocidad del viento. Se colocaron dos equipos; un medidor de estrés por calor y un termo-anemómetro de hilo caliente (Figura 5b). Las mediciones fueron tomadas con las puertas cerradas, el horario de registro fue de 09 horas a 15 horas. Los equipos se colocaron en el centro del ambiente a una

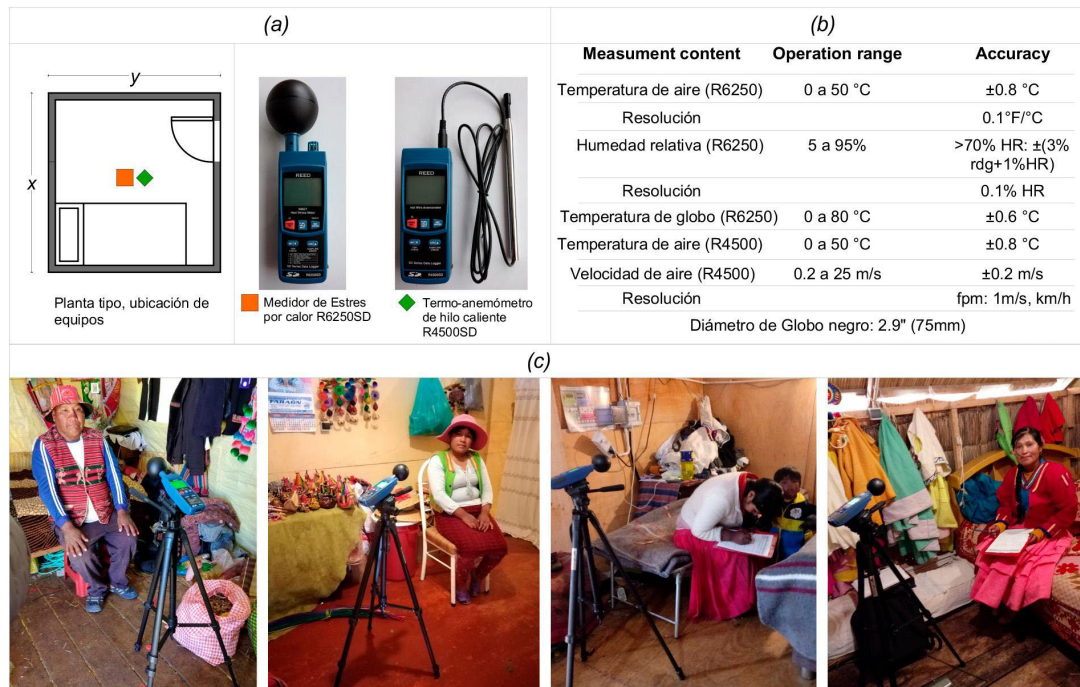


Figura 5. Medición, encuestas y ubicación de equipos. Fuente: Elaboración de los autores.

altura de 1.10 metros con respecto al nivel del suelo y 0.5 metros del usuario (Figura 5a y Figura 5c), El registro se realizó a intervalos de 5 minutos para el caso del medidor de estrés por calor R6250SD y a 2 minutos en el caso del termo-anemómetro de hilo caliente R4500SD. De forma paralela se recogió información de la percepción térmica a partir de encuestas.

Posterior al registro de datos de campo, se calculó la temperatura operativa (TO), por ser una ponderación de la temperatura media radiante de los cerramientos y la temperatura seca del aire, considerando que, ambas contribuyen a la temperatura ambiental con sus coeficientes de transferencia de calor radiante y convectivo (Ecuación 1).

$$t_o = At_a + (1 - A) t_r \quad (1)$$

Dónde: t_o es la temperatura operativa, A =Constante en función de la velocidad del aire, t_a es la temperatura del aire (°C), t_r es la temperatura media radiante (°C).

Este procedimiento se realizó para cada una de las viviendas estudiadas. Para el análisis de datos, se correlacionaron las variables temperatura operativa (TO) y humedad para mostrar diagramas de dispersión.

Superficie corporal y aislamiento de ropa de los usuarios

Para determinar la superficie corporal, se recopiló información sobre la actividad previa que estaban desarrollando, ingesta de comida, aspectos generales

como; género, edad. Posteriormente, se procedió a medir la estatura y peso de los usuarios (Tabla 2). Considerando el modelo matemático de Mosteller, (Ecuación 2).

$$Superficie\ corporal\ (m^2) = \sqrt{\frac{altura\ (cm) \times peso\ (kg)}{3600}} \quad (2)$$

Tabla 2. Información general de los usuarios. Fuente: Elaboración de los autores.

Estación	Género	Tamaño de la muestra	Altura (cm)	Peso (kg)
Verano	Varones	17	165.29	88.37
(enero)	Mujeres	33	152.27	77.26
Invierno	Varones	9	161.22	75.92
(julio)	Mujeres	19	151.79	71.24

En relación al índice de aislamiento (Clo), se ofreció una lista de prendas típicas que incluyó 20 opciones (Figura 6). Los datos obtenidos se procesaron en una hoja de cálculo Excel realizando una sumatoria por usuario.

Sensación, preferencia y aceptabilidad térmica

Para la sensación y preferencia térmica, se utilizó encuestas de escala de valoración de 7 puntos, y para la aceptabilidad encuestas dicotómicas con valoración aceptable y no aceptable (Tabla 3). Se realizaron por día entre 9 a 14 encuestas, el horario fue desde las 10:00

Opciones de vestimenta										
	1 Bividi Juch'usa kurpiñu	2 Camiseta Jisk'a amparani almilla	3 Camisa manga corta Muru Almilla	4 Camisa manga larga Jach'a amparani almilla	5 Camisa de franela Quña franelata almilla	6 Chaleco sin mangas Muru kurpiñu	7 Casaca gruesa Truru kasaka	8 Suéter o Chompa Chumpa	9 Suéter grueso Thuru chumpa	10 Pantalón tela Warira phantilla
	Índice (clo)	0,15	0,09	0,15	0,25	0,30	0,25	0,55	0,25	0,36
Opciones de vestimenta										
	11 Pantalón de franela Quña Franelata pantaluna	12 Falda ligera Juch'usa phalta	13 Falda gruesa o Pollera Thuru pullira jani ukasti phalta	14 Medias gruesas Thuru phullq'u	15 Sandalias o ojotas Jiskhunaka	16 Zapatos Sapatunaka	17 Botas Wiskalla wutasa	18 Guantes Wantisanaka	19 Sombrero Sumiru	20 Gorro o Chullo Lluch'u/ch'ullu
	Índice (clo)	0,30	0,15	0,25	0,10	0,02	0,04	0,10	0,05	0,10

Figura 6. Opciones de vestimenta. Fuente: Elaboración de los autores y traducción al idioma Aymara por la docente Miriam Jiménez del CELEN – UNAP

Tabla 3. Escala de valoración utilizadas. Fuente: Adaptado de la ASHRAE e ISO 10551 (1995).

Escala		Sensación		Preferencia		Aceptabilidad
		¿Cómo se encuentra usted en este momento en relación a la temperatura y humedad?		¿Cómo preferiría estar en este momento?		¿En este momento usted acepta térmicamente este ambiente?
		Temperatura	Humedad	Temperatura	Humedad	Temperatura
-3	Muy frío	Muy seco	Mucho más frío	Mucho más seco		
-2	Frio	Seco	Más Frío	Más Seco		
-1	Ligeramente frío	Ligeramente seco	Ligeramente más frío	Ligeramente más seco		
0	Ni caliente, ni frío	Ni húmedo, ni seco	Sin cambio	Sin cambio		Aceptable
1	Ligeramente caliente	Ligeramente húmedo	Ligeramente más caliente	Ligeramente húmedo		Inaceptable
2	Caliente	Húmedo	Más caliente	Más Húmedo		
3	Muy caliente	Muy húmedo	Mucho más caliente	Mucho más húmedo		

hasta las 16:00 horas. Se procuró que los usuarios realicen una actividad sedentaria (1.2 met) de 20 minutos antes de responder.

Se tomaron respuestas de forma oral, para luego ser registrada en el cuestionario, se usó una cartilla de apoyo con las escalas de valoración para mejor visualización. Para las respuestas sobre la sensación y preferencia térmica respecto a la temperatura y humedad, las preguntas fueron: ¿Cómo se encuentra usted en este momento en relación a la temperatura y humedad? y ¿Cómo preferiría estar en este momento? Para la aceptabilidad la pregunta fue: ¿En este momento usted acepta térmicamente este ambiente? (Tabla 3). El cuestionario fue traducido al idioma Aymara (lengua originaria de los usuarios) para una mayor comprensión. Para el procesamiento de datos, se utilizó una hoja de cálculo Excel. Se empleó el método estadístico descriptivo de distribución de frecuencias, para mostrar las gráficas en ambos periodos de estudio.

Estrategias de ajustes personales

Las estrategias de ajustes personales se utilizaron para dos condiciones (frío y calor), tanto en varones como en mujeres. Se recogió información por medio de encuestas de escala de valoración de 9 puntos (ISO 10551, 1995) (Tabla 4). El procesamiento de información, se realizó en hoja de cálculo Excel. Se usó la estadística descriptiva de distribución de frecuencias para mostrar las gráficas. El propósito fue determinar cuál estrategia es la más frecuente en los usuarios y que modificaciones sugieren para mantenerse en un estado de confort.

Cálculo de temperatura neutra

La temperatura neutra de la vivienda, se calculó con la aplicación del método Griffiths (Griffiths, 1991). Para los cálculos, se aplicó la constante de regresión obtenida a partir de los datos de campo, éste se obtuvo

Tabla 4. Ajustes personales. Fuente: Elaboración de los autores.

En relación al frío, ¿Qué acciones realiza para mantenerse en una temperatura agradable?									En relación al calor, ¿Qué acciones realiza para mantenerse en una temperatura agradable?								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Au- men- tar la can- tidad de ropa.	Usar man- tas.	Be- ber be- bi- das ca- lien- tes.	Co- mer co- mida ca- lien- te.	Acos- tarse.	Cer- rar la pue- ta.	Ca- le- fac- tor eléc- trico.	Nin- gu- no.	o- tros	Usar ro- pas lige- ras.	Bañar- se o du- char- se.	Be- ber be- bi- das frías.	Co- mer co- mida frías.	Salir al aire li- bre.	Abrir la pue- ta.	Usar ven- tila- dor eléc- trico.	Nin- gu- no.	Otros.

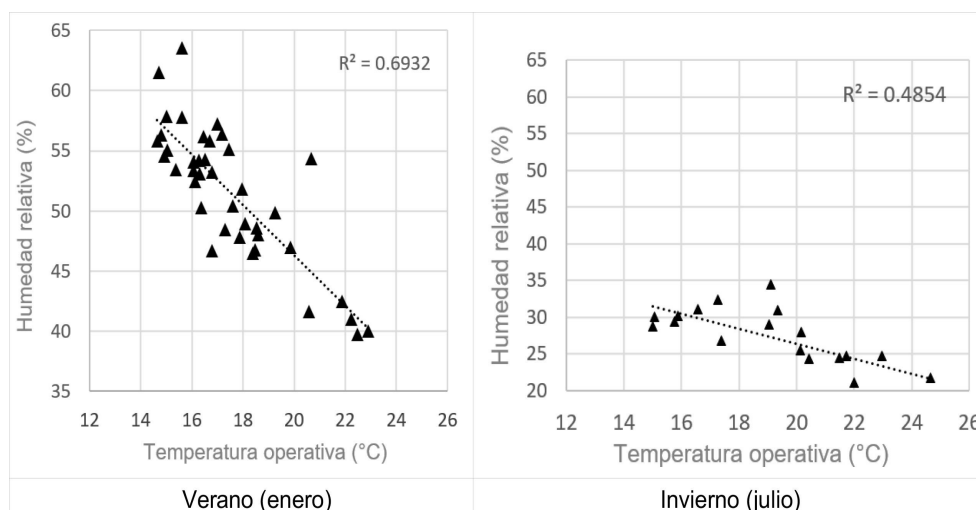


Figura 7. Diagrama de dispersión del desempeño térmico de la vivienda. Fuente: Elaboración de los autores.

correlacionando la variable temperatura operativa y los votos de sensación térmica, utilizando el estadístico de coeficiente de Pearson¹. Así también se empleó la constante 0.33 propuesto por (Fanger, 1970) y la constante universal de 0.50 propuesto por Humphreys y Nicol (Humphreys y Nicol, 1970). Se estimó la temperatura neutra para los usuarios de la vivienda, considerando el conjunto de datos recogidos de campo. Para ello, se empleó la (Ecuación 3) para realizar el cálculo.

$$T_n = T_o - \left(\frac{VST}{\alpha} \right) \quad (3)$$

Dónde: T_n es la temperatura neutra del ambiente (°C); T_o es la temperatura operativa interior (°C); VST es el voto de la sensación térmica (adimensional); α es la constante de Griffiths/sensibilidad térmica del ocupante (°C⁻¹).

RESULTADO

DESEMPEÑO TÉRMICO INTERNO DE LA VIVIENDA

El diagrama de dispersión, muestra el desempeño térmico de las viviendas en los periodos de estudio, para invierno la correlación es baja y para verano es media, lo que sugiere una tendencia a dispersión alta (Figura 7). Se observó en el periodo de verano, una temperatura operativa (TO) de 17.50 °C y humedad relativa predominante en 51.5 %. Por otra parte, en el periodo de invierno, una TO en torno a los 19.20 °C y humedad relativa en 27.16 %.

SUPERFICIE CORPORAL Y AISLAMIENTO DE ROPA DE LOS USUARIOS

La superficie corporal calculada promedio para para mujeres fue de 1.80 m² y para varones fue de 2.01 m². El valor medio del aislamiento indica 1.25 clo para mujeres

1 Coeficiente que mide la correlación entre 2 variables (temperatura operativa y votos de sensación térmica)

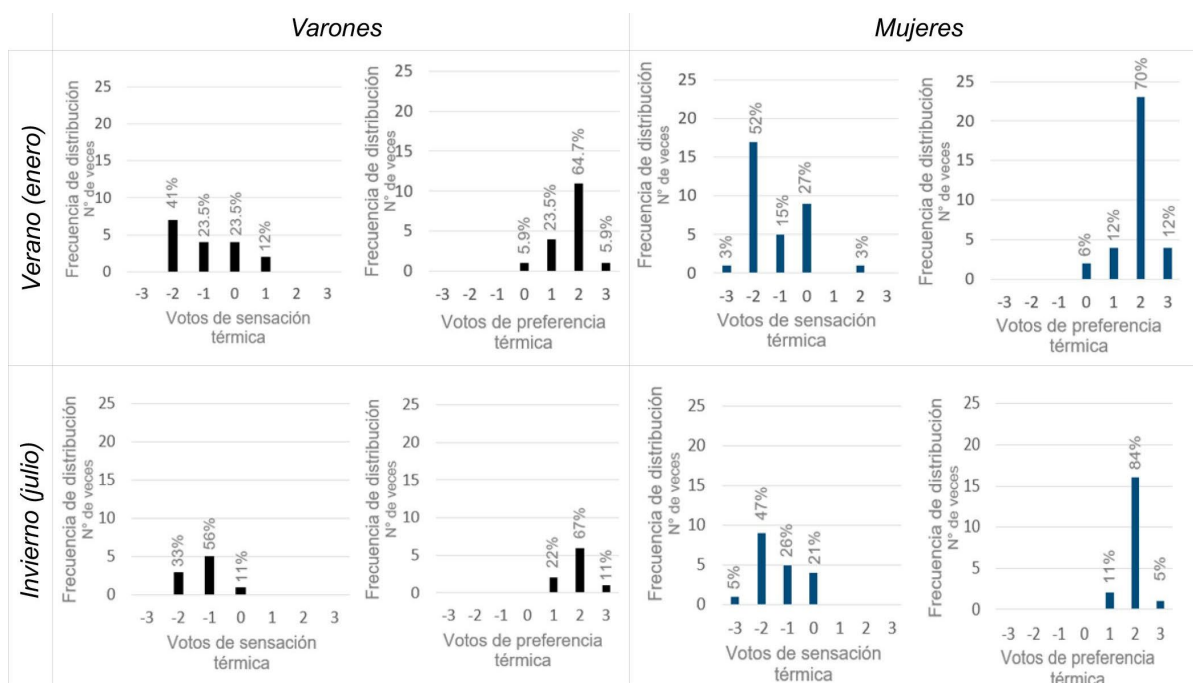


Figura 8. Frecuencia de los votos de sensación y preferencia térmica. Fuente: Elaboración de los autores.

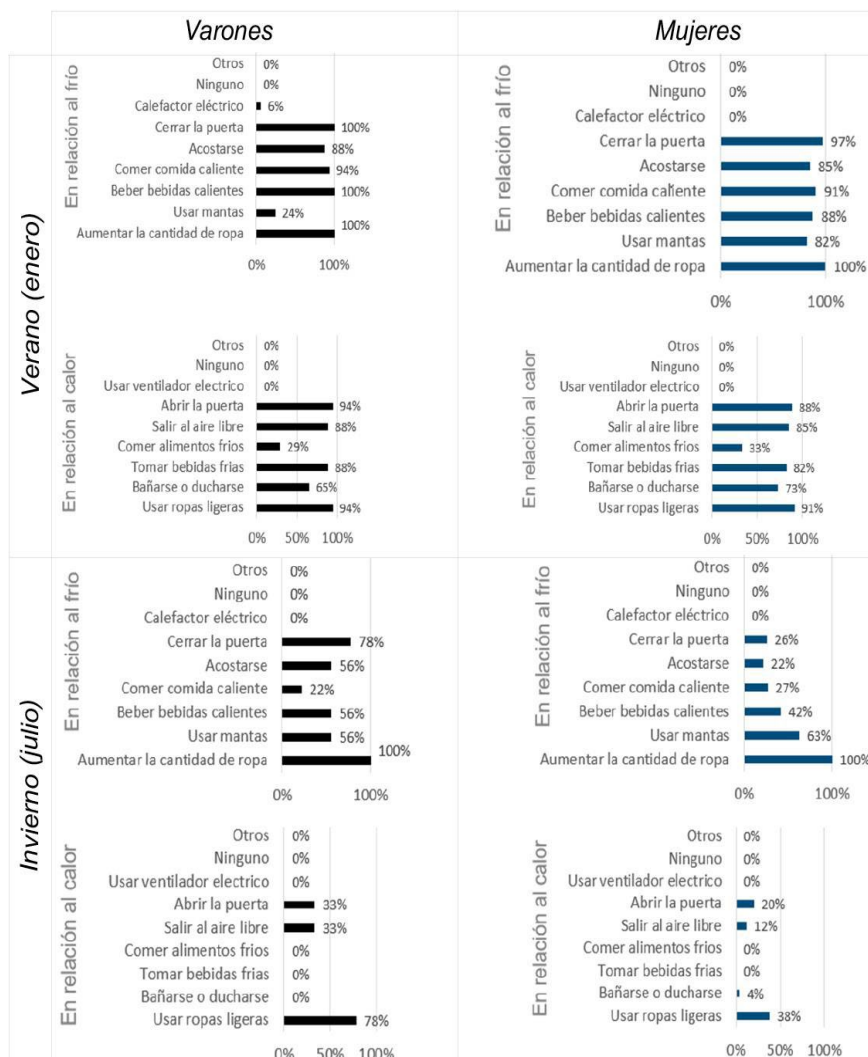


Figura 9. Estrategias de ajustes personales. Fuente: Elaboración de los autores

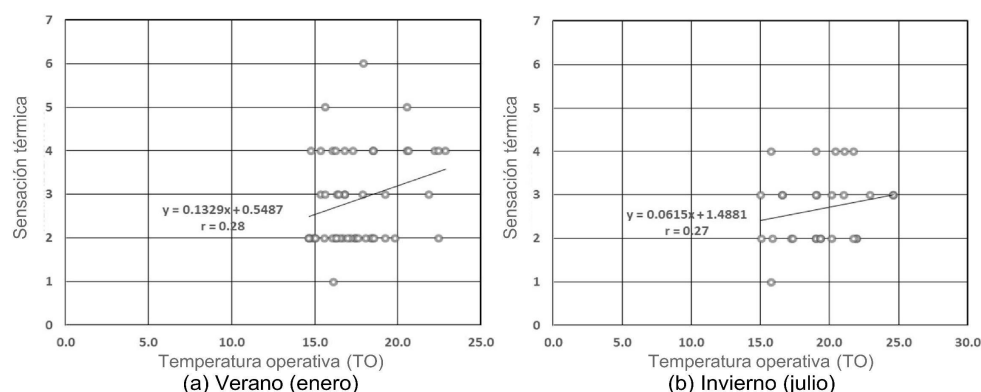


Figura 10. Correlación entre la temperatura operativa y la sensación térmica. Fuente: Elaboración de los autores

Tabla 5. Temperatura neutra y constante de Griffiths, DS= Desviación estándar, r= coeficiente de correlación. Fuente: Elaboración de los autores.

Estación	Temperatura operativa (°C)	Griffiths (°C)			
	Mean	0.13	0.06	0.33	0.50
Verano	17.55	25.54	34.87	20.69	19.62
DS		9.97	10.13	4.04	2.96
Invierno	19.34	29.50	41.36	23.34	21.98
DS		5.89	6.33	3.29	2.88

y 0.86 clo para varones en la estación de verano, 1.01 clo para mujeres y 0.90 clo para varones en la estación de invierno, esto significa que en verano los habitantes usan más ropa que en invierno, esto podría darse a que, en la época de verano se presentan precipitaciones pluviales intensas en la zona de estudio y las personas necesitan abrigarse.

SENSACIÓN, PREFERENCIA Y ACEPTABILIDAD TÉRMICA

Se asumió como zona de confort, a las tres escalas de valoración centrales de la sensación térmica (Humphreys et al., 2016, citado por Mino-Rodríguez et al., 2018, p. 9), las que consideran que una persona se siente en confort cuando las respuestas de la percepción térmica son: (-1) "ligeramente fríos", (0), neutrales, o (+1) "ligeramente calientes".

Los usuarios, tanto mujeres como varones, concentran sus respuestas en la categoría: Frio -2, Ligeramente frío -1, lo que sugiere la incomodidad térmica, debido a que la valoración - frío - está fuera de la zona de confort. Así también se muestra que existe la tendencia de los votos de preferencia térmica hacia la categoría: Sin cambio 0, Ligeramente más caliente +1, Más caliente +2, Mucho más caliente +3 en ambos periodos de estudio, por lo que se observa una tendencia hacia ambientes más cálidos (Figura 8).

Respecto a la aceptabilidad, en la estación de verano, un 36% de los encuestados indicó que sí, y un 64% que

no acepta el ambiente térmicamente. Para la estación de invierno un 28.6% indicó que sí y un 71.4% que no.

ESTRATEGIAS DE AJUSTES PERSONALES

La estrategia en relación al frío más resaltante, es aumentar la cantidad de ropa, en este aspecto coincidieron tanto varones como mujeres en las dos estaciones estudiadas. Las estrategias descritas para mantenerse en una temperatura más fresca, en ambas estaciones tanto para varones como mujeres han sido; usar ropas ligeras y abrir la puerta, (Figura 9). Los ajustes personales en relación al verano e invierno, son bastante similares en varones como en mujeres. Los ocupantes señalan que, es necesario hacer reformas a la vivienda, indicando que preferirían que las viviendas sean más abrigadas, que ingrese menos viento al interior, pues no todas las casas poseen la misma cantidad de mantas de Totora.

TEMPERATURA NEUTRA

Los resultados calculados de la constante Griffiths, de sensibilidad térmica de los usuarios de la vivienda para el periodo de verano fue 0.13 y para invierno 0.06, estos valores, son muy pequeños en comparación con valores encontrados en estudios previos de campo (Figura 10). Se utilizaron constantes de 0.33 y 0.50 ampliamente usados en estudios especializados sobre confort térmico. La temperatura neutra calculada con la constante 0.50 para el periodo de verano fue de 19.62 °C y para invierno 21.98 °C y una desviación estándar baja, por lo que el estudio asume estos valores calculados como temperatura neutra (Tabla 5).

DISCUSIÓN

El desempeño térmico interno de la vivienda, se situó en una temperatura operativa promedio de 17.50 °C en verano y 19.20°C en invierno. La temperatura exterior promedio registrada en verano fue de 3.50 °C y en invierno de -1.60 °C. Las diferencias son significativas, lo que sugiere adoptar estrategias de aislamiento de la envolvente con el exterior.

La sensibilidad térmica indica que, los usuarios se encuentran en incomodidad, la razón puede deberse a la influencia de las condiciones climáticas externas. Más del 60% de usuarios no aceptan el ambiente, lo que sugiere un deseo natural de ambientes más cálidos. Según Xiong et al. (2019), en zonas frías la gente tiene que permanecer en el interior con equipos de calefacción. Sin embargo, la comunidad Uro no cuenta con los recursos para obtener estos sistemas mecánicos, por lo que recurren a usar ropa gruesa tanto de día como de noche. Durante el día, el ambiente sirve de cocina, lo que es parte de la tradición de la comunidad, lo que puede mejorar el confort del ambiente.

Debido a la inaceptabilidad térmica, se hace necesario adoptar estrategias que mejoren el confort térmico de la vivienda. En climas fríos de acuerdo a Nie et al. (2019), la calefacción solar pasiva puede aminorar el efecto del frío y mejorar la eficiencia energética y de esta forma mejorar la temperatura del ambiente. Por otro lado Qiao et al. (2019) señala como estrategias adaptativas para climas fríos, el aislamiento de muros y techos con materiales con gran almacenamiento térmico. Por lo que se sugiere el uso de la energía solar, estrategias que involucren la mejora de la envolvente térmica y hermeticidad. Tales como: 1) Utilización de espacios de amortiguación como pasillos, invernaderos adosados, etc. 2) Adoptar materiales con gran capacidad de almacenamiento térmico, (3) Utilización dinámica de la vivienda en las diferentes estaciones para aprovechar el clima.

Los cálculos muestran una temperatura neutra de 19.62 °C para verano y 21.98 °C para invierno, determinándose temperaturas neutras en estudios similares. Rijal et al. (2010), encontró temperaturas de 21.10 °C y 15.30 °C para verano e invierno respectivamente; comparativamente la temperatura neutra para verano, no presenta diferencias significativas, no obstante, para invierno la temperatura encontrada en este estudio es superior, debido a la alta radiación solar durante el día 5.9 KWh/m², lo que hace posible que las viviendas se calienten en el horario diurno. Así también Mino-Rodríguez et al., (2018), encontró una temperatura neutra media de 23.40 °C, este valor es cercano a este estudio y da consistencia a los resultados. Por otro lado, las temperaturas neutras encontradas, son cercanas a la temperatura de diseño de 22 °C según el estándar ASHRAE 55-2017. Sin embargo, es importante indicar que el registro de levantamiento de información del estudio corresponde al horario diurno, donde la radiación solar es alta sobre todo en invierno, si se tomaran

los registros nocturnos, las temperaturas podrían bajar significativamente. Lo que sugiere que la neutralidad térmica puede no ser suficiente para identificar las necesidades de confort térmico de los usuarios.

El confort térmico en ambientes interiores tiene un rol importante en el consumo energético, sin embargo, muchas veces no es tomado en cuenta por las políticas de estado. Este trabajo permite tener una mejor comprensión del confort térmico de los usuarios de las viviendas vernáculas en la comunidad Uro, lo que ayudaría a adoptar estrategias para mejorar las viviendas.

La principal limitación de la investigación, tuvo que ver con la cantidad de personas encuestadas, esto se debió principalmente a que no disponían de tiempo y no estaban predispuestos a responder la encuesta. Por otro lado, los tiempos de recolección de datos también fue un impedimento, debido que, sólo se pudo recolectar información en horario diurno.

CONCLUSIONES

El presente estudio destaca la percepción térmica de los usuarios. La vivienda vernácula se encuentra en un estado de vulnerabilidad térmica, la forma debe retomar los conocimientos utilizados de antaño, en donde se tenía en cuenta la compacidad, ofreciendo una mejor respuesta al clima. La materialidad actual no satisface las necesidades de los usuarios pese a las respuestas adaptativas para encontrarse en confort, como la constante renovación del material. En respuesta, los ocupantes no aceptan térmicamente las viviendas en el horario diurno, tanto en la estación de verano como de invierno. En el horario nocturno, los usuarios tienen que tomar medidas adicionales para aislar la vivienda, siendo la envolvente un punto clave a tratar y mejorar. El valor de temperatura neutral en invierno, se encuentra por encima del periodo de verano.

Las mejoras apuntan hacia el aislamiento de la envolvente térmica, para lograr ambientes más cálidos y secos, la mejora de la hermeticidad con mayor número de mantas de Totorá y mejores técnicas de trenzado. El presente estudio se puede considerar un estudio previo para posteriormente ahondar en mayores estudios orientados a la mejora térmica de la vivienda, profundizando en simulaciones y mejoras tecnológicas que impliquen el aprovechamiento del material de Totorá, propio de la comunidad Uro.

AGRADECIMIENTOS

Investigación financiada por el grupo de docentes de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno y la Universidade de Brasília

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdollahzadeh, S. M., Heidari, S., y Einifar, A. (2023). Evaluating thermal comfort and neutral temperature in residential apartments in hot and dry climate: A case study in Shiraz, Iran. *Journal of Building Engineering*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107161>

ANSI/ASHRAE 55. (2017). ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE Inc., 2017, 66. <https://doi.org/ISSN 1041-2336>

Aza-Medina, L. C., Palumbo, M., Lacasta, A. M., y González-Lezcano, R. A. (2023). Characterization of the thermal behavior, mechanical resistance, and reaction to fire of totora (*Schoenoplectus californicus* (C.A. Mey.) Sojak) panels and their potential use as a sustainable construction material. *Journal of Building Engineering*, 69, 105984. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105984>

Camuffo, D. (2019). Temperature: A Key Variable in Conservation and Thermal Comfort. *Microclimate for Cultural Heritage*, (3)15–42. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64106-9.00002-x>

Chang, S., He, W., Yan, H., Yang, L., y Song, C. (2021). Influences of vernacular building spaces on human thermal comfort in China's arid climate areas. *Energy and Buildings*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110978>

Costa-Carrapiço, I., González, J. N., Raslan, R., y Sánchez-Guevara, C. (2022). Understanding the challenges of determining thermal comfort in vernacular dwellings: A meta-analysis. *Journal of Cultural Heritage*, 58, 57–73. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.09.019>

Fanger, P. (1970). *Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering: Vol. I*. En McGraw-Hill Book Company, (1ª ed., Vol. 1). R.E. Krieger Pub. Co. <https://www.abebooks.com/9780070199156/Thermal-comfort-analysis-applications-environmental-0070199159/plp>

Griffiths, I. D. (1991). *Thermal comfort in buildings with passive solar features: field studies: Vol. I (Commission of the European Communities, Ed.; 1 Volume)*. Commission of the European Communities.

Hidalgo-Cordero, J. F., y Aza-Medina, L. C. (2023). Analysis of the thermal performance of elements made with totora using different production processes. *Journal of Building Engineering*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105777>

Hidalgo-Cordero, J. F., Němec, M., Castro, P. H., Hájková, K., Castro, A. O., y Hýsek, Š. (2023). Macromolecular Composition of Totora (*Schoenoplectus californicus* C.A. Mey, Sojak) Stem and Its Correlation with Stem Mechanical Properties. *Journal of Natural Fibers*, 20(2). <https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2282049>

Humphreys, M. A., y Nicol, J. F. (1970). An investigation into thermal comfort of office workers. *Journal of the Institute of Heating and Ventilating Engineers*, 38, 181–189.

Hýsková, P., Gaff, M., Hidalgo-Cordero, J. F., y Hýsek, Š. (2020). Composite materials from totora (*Schoenoplectus californicus* C.A. Mey, Sojak): Is it worth it? *Composite Structures*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111572>

ISO 7726 (1998). *Ergonomics of the Thermal Environment - Instruments for Measuring Physical Quantities*, 1998 Ergonomics. <https://www.iso.org/standard/14562.html>

ISO 7730. (2005). ISO 7730 - *Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. 1–28. <https://www.iso.org/standard/39155.html>

ISO 10551. (1995). ISO 10551 - *Ergonomics of the thermal environment-Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgment scales*. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/18636/dc297a9d7c6245d985cf8dd48e084fb5/ISO-10551-1995.pdf>

Malik, J., y Bardhan, R. (2022). Thermal comfort perception in naturally ventilated affordable housing of India. *Advances in Building Energy Research*, 16(3), 385–413. <https://doi.org/10.1080/17512549.2021.1907224>

Mino-Rodriguez, I., Korolija, I., y Altamirano, H. (2018). *Thermal comfort in dwellings in the subtropical highlands Case study in the Ecuadorian Andes*. [Archivo PDF] https://www.researchgate.net/publication/325012806_Thermal_comfort_in_dwellings_in_the_subtropical_highlands_-_Case_study_in_the_Ecuadorian_Andes

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

Nie, Q., Zhao, S., Zhang, Q., Liu, P., y Yu, Z. (2019). An investigation on the climate-responsive design strategies of vernacular dwellings in Khams. *Building and Environment*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106248>

Qiao, Y., Yang, L., Bao, J., Liu, Y., y Liu, J. (2019). Reduced-scale experiments on the thermal performance of phase change material wallboard in different climate conditions. *Building and Environment*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106191>

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

Steffens, F., Steffens, H., y Oliveira, F. R. (2017). Applications of Natural Fibers on Architecture. *Procedia Engineering*, 200, 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.045>

Widera, B. (2021). Comparative analysis of user comfort and thermal performance of six types of vernacular dwellings as the first step towards climate resilient, sustainable and bioclimatic architecture in western sub-Saharan Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140. [Archivo PDF] <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110736>

Xiong, Y., Liu, J., y Kim, J. (2019). *Understanding differences in thermal comfort between urban and rural residents in hot summer and cold winter climate*. *Building and Environment*, 165. [Archivo PDF] <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106393>

MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN FACHADAS DE VIDRIO MEDIANTE ESTRATEGIAS DE DISEÑO BIOMIMÉTICO

ENHANCING ENERGY EFFICIENCY IN GLASS FACADES THROUGH BIOMIMETIC DESIGN STRATEGIES

MELHORANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FACHADAS DE VIDRO POR MEIO DE ESTRATÉGIAS DE DESIGN BIOMIMÉTICO

Büşra Öztürk

Master in Architecture
Research Assistant, Department of Architecture
Selçuk University, Konya, Turkey
<https://orcid.org/0000-0001-8177-0653>
busra.ozturk@selcuk.edu.tr (Correspondence Author)

Güneş Mutlu-Avinç

Doctor in Architecture
Assistant Professor of what Department or faculty?
Muş Alparslan University, Muş, Turkey
<https://orcid.org/0000-0003-1049-2689>
gunesavinc@gmail.com

Semra Arslan-Selçuk

Doctor in Architecture
Associate professor and researcher, Department of Architecture
Gazi University, Ankara, Turkey
<https://orcid.org/0000-0002-2128-2858>
semraselcuk@gazi.edu.tr



RESUMEN

La industria de la construcción, responsable de una gran proporción del consumo de energía, está buscando soluciones para reducir el consumo de energía. Este estudio propone fachadas biomiméticas para garantizar el confort térmico. En primer lugar, examinó los sistemas de fachadas biomiméticas en la literatura. Luego, analizó los métodos de termorregulación de la naturaleza, el nivel de biomimética y las estrategias desarrolladas por los seres vivos. Como resultado de los análisis, se amplió la información biológica relativa a los tres fenómenos seleccionados y se determinó cómo transferir el método de biomimética que podría estar en la envoltura del edificio. Se realizaron simulaciones de energía en la fachada de vidrio del baño Süleyman Pasha para evaluar la eficiencia energética de la envoltura. Se encontró que los métodos inspirados en la naturaleza contribuyeron significativamente al consumo de energía del edificio cuando se diseñaron los resultados de simulación de la fachada.

Palabras clave

biomímesis, diseño de fachadas, eficiencia energética, termorregulación.

ABSTRACT

The building industry, responsible for a large proportion of energy consumption, is looking for solutions to reduce energy consumption. This study proposes biomimetic facades to ensure thermal comfort. Firstly, it examined biomimetic façade systems in the literature. Then, it analyzed the thermoregulation methods of nature, the level of biomimicry, and the strategies used by living things. As a result of the analyses, biological information regarding the three selected phenomena was expanded upon, determining how to transfer the biomimicry method to a building envelope. Energy simulations were conducted on the glass façade of the Süleyman Pasha Bath to evaluate the envelope's energy efficiency. It was found that nature-inspired methods significantly contributed to the building's energy consumption when examining the simulation results of the façade designed.

Keywords

biomimicry, facade design, energy efficiency, thermoregulation.

RESUMO

A indústria da construção, responsável por grande parte do consumo de energia, procura soluções para reduzir o consumo de energia. Este estudo propõe fachadas biomiméticas para garantir conforto térmico. Primeiramente, examinou sistemas de fachadas biomiméticos na literatura. Em seguida, analisou os métodos de termorregulação da natureza, o nível de biomimética e as estratégias desenvolvidas pelos seres vivos. Como resultado das análises, a informação biológica sobre os três fenômenos selecionados foi ampliada e determinada como transferir o método de biomimética que poderia ser para a envoltura do edifício. Simulações energéticas foram realizadas na fachada de vidro do Süleyman Pasha Bath para avaliar a eficiência energética do envelope. Verificou-se que os métodos inspirados na natureza contribuíram significativamente para o consumo de energia do edifício quando os resultados da simulação da fachada projetada.

Palavras-chave:

biomimética, design de fachadas, eficiência energética, termorregulação.

INTRODUCCIÓN

El aumento del consumo mundial de energía y las cambiantes condiciones climáticas han estado recientemente en la agenda de muchos sectores, en particular el sector de la construcción. Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), el sector de la construcción representa un tercio del consumo total de energía (International Energy Agency, 2019), y la mayor parte de la energía consumida en la construcción proviene de sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación (HVAC, por sus siglas en inglés) (Engin, 2012). En particular, cuando se utilizan grandes áreas vidriadas en fachadas, la carga de refrigeración aumenta durante el día y la carga de calefacción aumenta por la noche. Esta situación conduce a altos niveles de consumo de energía. Por esta razón, el sector de la construcción se está enfocando en métodos que utilizan fuentes de energía renovables para reducir el consumo de energía y las emisiones de gases nocivos y llamar la atención sobre el diseño de edificios energéticamente eficientes. En esta línea, el diseño de edificios energéticamente eficientes tiene como objetivo proporcionar ventilación natural dirigiendo la luz del día y reduciendo la carga de calefacción y refrigeración requerida (Pacheco ve diğ., 2012). A este respecto, el confort térmico en los edificios se proporciona aumentando la eficiencia obtenida de los recursos naturales como el calor, la luz, la lluvia y el viento con métodos pasivos de eficiencia energética y creando un diseño sensible al clima (Kim ve Torres, 2021).

Se puede decir que la naturaleza también tiene mucho que ofrecer en términos de desarrollo de propuestas de eficiencia energética, como la regulación térmica y el diseño sensible al clima, para aumentar la eficiencia de los recursos naturales como el calor, la luz, la lluvia y el viento. En este contexto, se están analizando y aplicando a la arquitectura los métodos de regulación térmica que utilizan los seres vivos en la naturaleza para garantizar la eficiencia energética. En la naturaleza, la regulación térmica se conoce como termorregulación, que protege la temperatura corporal de un organismo de los cambios de factores externos y garantiza que permanezca dentro de un rango apropiado (Farchi Nachman, 2009). En este contexto, se están desarrollando diseños/materiales biomiméticos examinando ejemplos de termorregulación, aprendiendo de la naturaleza y beneficiándose mediante el desarrollo de tecnología. Al examinar la fisiología, morfología y comportamiento de los seres vivos en la naturaleza, se han desarrollado muchos métodos y se pueden encontrar soluciones a los problemas encontrados en las estructuras.

El hecho de que la naturaleza responda a los problemas que encuentra, hallando las soluciones más adecuadas, ha llevado al ser humano a estudiar la naturaleza a lo largo de la historia. Se ofrecen soluciones prácticas a muchos problemas de la vida diaria aprendiendo de la naturaleza. Este método, denominado diseño bioinformado/biomímesis/biomimética/biodiseño, se centra en asimilar el papel de la naturaleza y producir soluciones funcionales con la información obtenida. Este enfoque está en camino de convertirse en una rama de la ciencia que respalda el proceso de aprender, adaptarse y aplicar las cualidades de los organismos vivos o inertes. Aunque este método se define como "emular estrategias" (Zari, 2007), se está desarrollando como un campo que produce diseños innovadores que contienen soluciones para los problemas de la humanidad, recurriendo a soluciones biológicas (Mutlu Avinç y Arslan Selçuk, 2019).

Las fachadas son componentes importantes, reguladores de

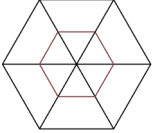

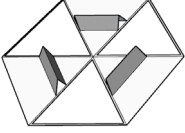
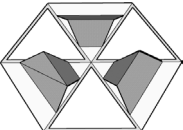
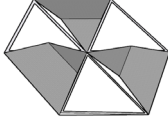
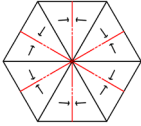
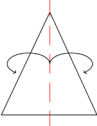
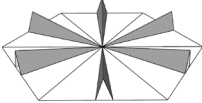
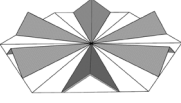

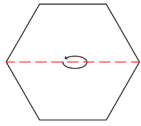

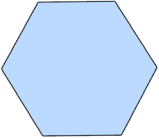
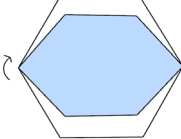
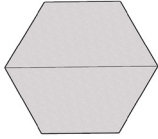
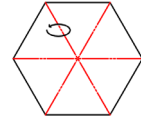
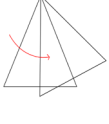
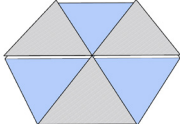
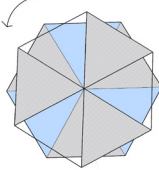
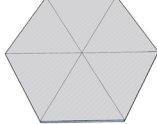
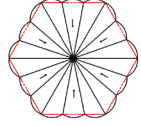
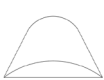
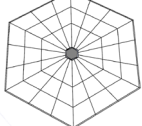
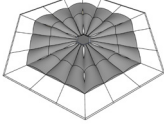


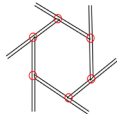
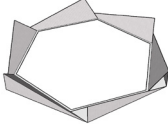
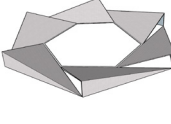
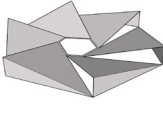
energía directamente expuestos a factores externos y en contacto con fuentes de energía renovables (Tabadkani et al., 2021). Por esta razón, la literatura ha discutido amplia y recientemente propuestas de diseño de edificios energéticamente eficientes, que pueden termorregular el diseño de fachadas con enfoques biomiméticos. Por ejemplo, Badarnah et al. (2010) diseñaron el ladrillo estoma como material de fachada, considerándolo como una barrera térmica para proteger a la fachada del calor y distribuirlo adecuadamente. Este diseño propone un envolvente del edificio con un sistema de refrigeración para regiones de clima árido y cálido. Kim et al. (2023) diseñaron una fachada cinética utilizando materiales innovadores y sensibles a la luz del día (aleaciones con memoria de forma y actuadores) en un sistema neumático. El diseño biomimético de la fachada, inspirado en un módulo de hexagonal y una característica de estoma de planta, se analizó probando los resultados de la simulación y un prototipo.

Por otro lado, el estudio de fachadas desarrollado por Kalatha (2016) presenta propuestas para mejorar el confort interior y la ventilación. En el diseño de la fachada, que se basa en un principio de funcionamiento de las estomas, se han propuesto paneles sensibles que pueden cambiar de forma según la temperatura y los factores físicos. En el estudio de Aly et al. (2021) se desarrolló un prototipo de fachada utilizando la capacidad de retención de agua con el efecto capilar que se encuentra en las pieles de lagartos diablo espinosos que viven en el clima desértico. En un estudio de López et al. (2017), se propone un enfoque biomimético para fachadas de vidrio con altas pérdidas energéticas, considerando la relación entre la arquitectura y la biología. Mediante la creación de un conjunto de datos de adaptaciones de plantas, se propone una metodología que refleja la adaptación de los principios biológicos a los recursos arquitectónicos y a las nuevas tecnologías. En su estudio, Sheikh y Asghar (2019) presentan un diseño de fachada adaptativa biomimética para mejorar la eficiencia energética de fachadas de vidrio de gran altura en regiones con climas cálidos y húmedos, reduciendo la carga energética en un 32%. En un estudio de Paar y Petutschnigg (2016), el tema del enverdecimiento de la fachada se abordó considerando el crecimiento modular de las madrigueras de los perritos de la pradera y las colonias de mejillones. Para dar solución al efecto isla de calor urbano, al aumento del consumo energético debido al calentamiento global y al aumento del calentamiento de las ciudades, se ha desarrollado un concepto de diseño de fachadas con funciones de ventilación y refrigeración natural basado en principios biomiméticos.

Otro estudio de Faragalla y Asadi (2022) presenta una metodología que incluye diferentes tipologías, métodos y marcos conceptuales para el diseño de fachadas adaptativas, centrándose en los principios biomiméticos. Esta investigación destaca la importancia de la eficiencia energética en las primeras etapas del diseño. Mientras tanto, Kuru et al. (2019) abordaron la importancia de las envolventes biomiméticas adaptativas de los edificios para la eficiencia energética y, a través de la caracterización y las estrategias, examinaron las tecnologías actuales a través de un análisis comparativo. En su estudio, Sommese et al. (2022) investigaron envolventes de edificios sensibles e inteligentes. El objetivo de este estudio es llamar la atención sobre el potencial de la vasta base de datos de la naturaleza al examinar críticamente la tecnología actual en términos de eficiencia energética.

El estudio abordado en este artículo se basó en la hipótesis de que "las plantas y los animales que se encuentran en la

Tabla 1. Mecanismos del sistema de módulos de fachada – Alternativas

Module Form	Movement Axis	Movement Direction and Type	System Status - On	System Status - Half Open	System Status - Off	Structure Reference Sample
		Opening to the sides Folding system				CJ Blossom Park
		Folding along the axis Folding system				Kiefer Technic Showroom / Al-Bahr Towers
		Rotation around center Rotation				ThyssenKrupp Quartier Essen Q1
		Rotation around center Rotation				RMIT Design Hub
		Gathering Toward the Center Pneumatic System				Media-TIC Building
		Shift along axis Sliding System				Institut du Monde Arabe

naturaleza pueden proponer una solución biomimética al problema del confort térmico interior y el consumo excesivo de energía provocado por el uso de fachadas de vidrio, y se pueden lograr mejoras en el consumo de energía". Para este fin, el estudio analizó los principios y estrategias de termorregulación natural para prevenir el sobrecalentamiento (durante el día) y el sobreenfriamiento (en la noche). Los seres vivos se revisaron utilizando las palabras clave "refracción, prevención del calor, absorción de radiación, reducción de la irradiación, sobrecalentamiento, regulación del calor" en la base de datos AskNature, y los principios se han derivado del estudio de los métodos termorreguladores y mecanismos de trabajo de estos seres vivos. En base a estos principios, se han buscado soluciones para evitar el sobrecalentamiento y el sobreenfriamiento provocados por los cambios de temperatura en los sistemas de fachadas de vidrio. Para ello, se discutieron cinco plantas y cinco animales con métodos de termorregulación para la distribución y ganancia de calor, y se diseñó un sistema de vidrio de doble fachada para ser sostenible y eficiente energéticamente, inspirándose en los seres vivos. El estudio se analizó mediante un programa de simulación energética, un módulo innovador en el sistema de fachada de vidrio diseñado aprendiendo de la naturaleza.

MECANISMOS DEL SISTEMA DE MÓDULOS DE FACHADA – ALTERNATIVAS

En las cambiantes condiciones tecnológicas actuales, se han logrado avances esenciales en materiales y técnicas. Gracias a estos desarrollos, los diseños cinéticos de fachadas, que se adaptan a esta y cambian según las condiciones ambientales, están cobrando protagonismo. Antes de decidirse por el diseño del sistema, este estudio analizó el módulo de fachada cinética utilizando técnicas desarrolladas en el módulo de fachada hexagonal regular, uno de los diagramas de Voronoi. Se determinaron alternativas para mecanismos de apertura y cierre sensibles a la luz del día utilizando el módulo de fachada hexagonal. Para decidir estas alternativas, se examinaron los diseños de fachadas cinéticas en la literatura y en los edificios con envoltentes adaptativas. Se puede observar que técnicas específicas como el deslizamiento, plegado, giro y operación neumática son ampliamente utilizadas como mecanismos de apertura y cierre en módulos de fachada. Estas técnicas modelan y expresan los estados completamente cerrados, semiabiertos y completamente abiertos de los módulos de fachada diseñados para diferentes sistemas. Se espera que la fachada cinética, diseñada de acuerdo con principios biomiméticos y utilizando

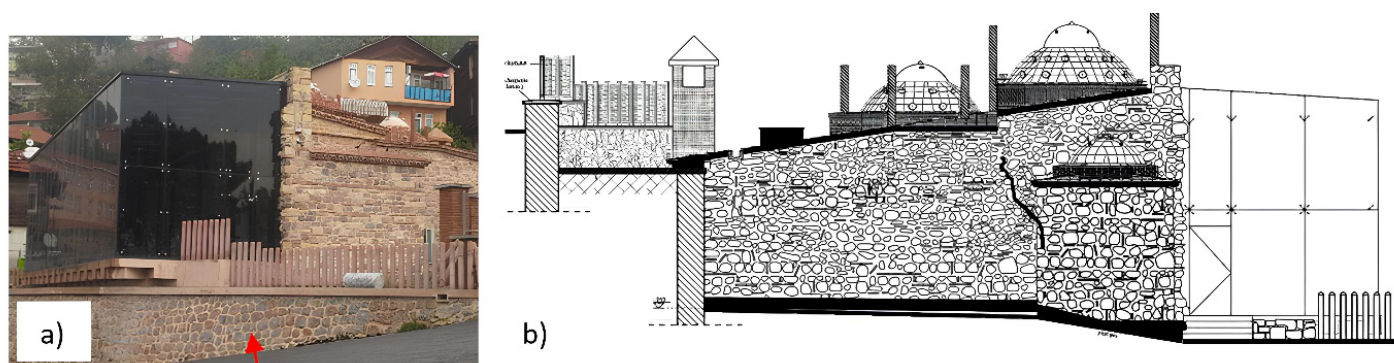


Figura 1. a) Secciones de baño Suleyman Pasha después de la reparación; b) Fachada noroeste del baño Suleyman Pasha (Güner Design - Arquitecto

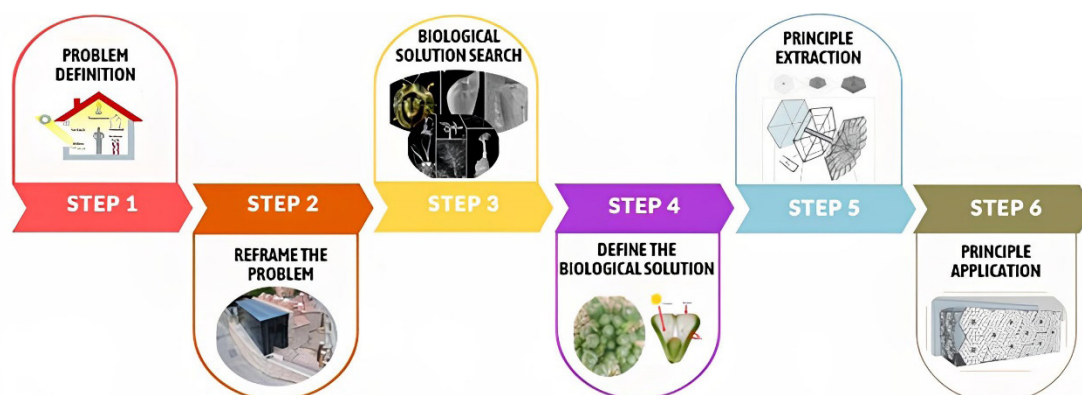


Figura 2. Enfoque orientado al problema utilizado en la investigación biomimética (Helms, Vattam y Goel, 2009, editado por el autor)

materiales técnicamente avanzados, resuelva los problemas de sobrecalentamiento y enfriamiento al controlar el acceso de la luz del día hacia el interior (Tabla 1).

MATERIALES Y MÉTODOS

El baño Suleyman Pasha en el distrito Akçaova de Izmit, el estudio de caso, fue construido durante el período otomano. El baño Suleyman Pasha es la estructura otomana más antigua que se conserva en Izmit. Aunque parte de la estructura ha sido demolida recientemente, la mayoría de los baños han sobrevivido hasta la actualidad. El derecho a evaluar y utilizar el baño con fines socioculturales se ha transferido a la Dirección General de Fundaciones, con el acuerdo del Municipio Metropolitano de Kocaeli. Se ha trabajado para garantizar que el baño en ruinas, que permaneció sin restaurar durante muchos años, recupere su función y se vuelva a utilizar (Polat et al., 2010). Construido a principios del período otomano, el baño tiene un área de baño doble tradicional diseñada por separado para hombres y mujeres. Como característica arquitectónica, el baño consta de vestuarios, salas cálidas y salas calientes. Sin embargo, desde que se demoló el vestuario, este ha sido reconstruido y convertido en una cafetería (Kocaeli Cultural Envanteri, 2011) (Figura 1).

La fachada de vidrio del área de la cafetería en el baño Suleyman Pasha, a la que se le ha dado una adición contemporánea como parte del proyecto de restauración, fue evaluada como

parte de este estudio. La cafetería está ubicada en el lado sur y experimenta sobrecalentamiento en verano y problemas de sobreenfriamiento en invierno, lo que requiere un alto consumo de energía para garantizar el confort interior. Tiene un problema esencial, que es que los sistemas de climatización provocan un consumo excesivo de energía para proporcionar las condiciones de confort necesarias para el espacio. Este estudio propone un sistema biomimético de fachada de vidrio que reducirá el consumo de energía, a la vez que aumentará las condiciones de confort interior, y se puede aplicar como una piel secundaria a la fachada existente.

Dentro del alcance de este estudio, se investigaron soluciones biomiméticas para aumentar el nivel de confort de la fachada de vidrio del área de la cafetería para el baño Suleyman Pasha, y así reducir la energía consumida. Ya que todos los organismos vivos pueden controlar las pérdidas y ganancias de energía termorregulando sus sistemas, se buscó una solución al problema identificado utilizando métodos aprendidos de la naturaleza. En este proceso, se utilizó el método de aproximación orientada a problemas, uno de los enfoques de biomimesis. Primero, se completó el proceso de identificación del problema. Luego, se buscaron soluciones al problema identificado desde la naturaleza, se derivaron ciertos principios y se propuso una solución. Además, la fachada diseñada en el estudio fue analizada en un programa de simulación energética (Design Builder), para ver los cambios en la carga de calefacción y refrigeración según las cualidades de los materiales. Finalmente, se propuso una solución para el problema, que era una solución

Tabla 2. Examen de las soluciones biomiméticas utilizadas en el diseño.

Referencia						
	Cactus Kingdom (n.d.)	Asknature (n.d.)	(Çağlar, 2020)			
Método	Prevención del calor Preservación del calor	Ganancia de calor Preservación del calor	Ganancia de calor			
	Adaptación conductual	Adaptación física	Adaptación morfológica			

de fachada arquitectónica para la extensión contemporánea del baño histórico en Kocaeli (Figura 2).

ESTUDIO DE CASO: DISEÑO BIOMIMÉTICO DE SISTEMAS DE FACHADAS DE VIDRIO

Se han estudiado métodos de termorregulación en seres vivos para abordar los problemas de sobrecalentamiento y sobreenfriamiento en los sistemas de fachadas de vidrio. Los seres vivos utilizan tres enfoques para lograr la termorregulación: conservación del calor, ganancia de calor y prevención del calor. Este estudio buscó palabras clave relacionadas con plantas y animales en la base de datos AskNature. Como resultado de la investigación, se examinaron criaturas con un método para prevenir el sobrecalentamiento y las ganancias de calor. Los seres vivos en climas áridos y desérticos han desarrollado diferentes estrategias para evitar el sobrecalentamiento. Estas estrategias generalmente se ven en las plantas como adaptaciones que regulan la pérdida de calor, abriendo y cerrando estomas, o como características morfológicas. Por otro lado, en animales se ha observado termorregulación regulando los cambios de color y las proporciones de área superficial de acuerdo con las características de la piel. En la segunda parte del estudio se analizaron las estrategias termorreguladoras de plantas y animales. Se encontraron plantas como la *fenestraria aurantiaca*, la hiedra inglesa, el pasto gigante, el edelweiss alpino y la planta kukumakranka, al igual que animales como el escarabajo tortuga, el camaleón, la mariposa morfo, el abejorro y la cucaracha silbante.

En la búsqueda de una solución biomimética al problema del estudio, se discutieron las adaptaciones tanto para la ganancia de calor como para la prevención del calor. Si bien se requiere una función de prevención del calor en los sistemas de fachadas de vidrio en edificios durante el día, se necesita una función de ganancia de calor cuando la temperatura desciende por la noche. El objetivo es diseñar una fachada de doble piel que refleje gran parte de la luz del día durante el día y actúe como capa aislante durante la noche. La *fenestraria* y las plantas marmota gigantes fueron consideradas como soluciones entre diez criaturas cuyos métodos de termorregulación fueron estudiados. Se cree que la *fenestraria* es una solución al problema del exceso de luz solar a la que está expuesto el edificio durante el día, ya que captura y corta el exceso de luz en el clima desértico y actúa como un lente. También se ha sugerido que el pasto gigante protege sus hojas internas cerrándose cuando baja la temperatura en las partes altas de las montañas, actuando como una capa aislante. El hecho de que esta planta se abra y se cierre en función de la temperatura

ha dado lugar a un diseño de fachada que actuaría como aislante cerrando las fachadas sensibles al calor de un edificio. Además, los módulos que se diseñarán están inspirados en el patrón Voronoi que se ve en las superficies del caparazón y la piel de las criaturas que se encuentran morfológicamente en la matemática de la naturaleza. Kahramanoğlu y Alp (2021), como resultado del análisis de la luz de día de los sistemas de fachada diseñados en formas alternativas, mostraron en su estudio que cuando se utiliza el diagrama de Voronoi, la incidencia de la luz en la fachada es mayor y se puede controlar al nivel deseado ajustando el grosor de las líneas. Por esta razón, se decidió utilizar los hexágonos regulares de los diagramas de Voronoi en el módulo de fachada de vidrio que se diseñará en el estudio (Tabla 2).

El proceso de diseño examinó los mecanismos estudiados en la naturaleza y sus métodos aplicados a la fachada. El método de dirigir y controlar el exceso de luz de la planta *fenestraria*, utilizado en el diseño de la fachada, se usó para resolver el problema de sobrecalentamiento en el módulo de la fachada. Además, en el diseño se consideró la capacidad de la planta de pasto gigante para cerrarse cuando baja la temperatura y proteger su sistema de los efectos de las heladas. De acuerdo con los principios aprendidos de estos dos proyectos, se decidió utilizar vidrio electrocrómico para dirigir el exceso de luz de día. Además, el sistema neumático, fabricado en material ETFE que se cierra a bajas temperaturas por la noche, está integrado a modo de doble fachada. Entre los módulos de fachada alternativos que se muestran en la Tabla 1 se diseñó un sistema neumático, con un actuador que se cierra por la noche a bajas temperaturas y recolecta calor durante el día (Figura 3).

Como parte del estudio, se diseñó un sistema de fachada que se comporta como la *fenestraria* y los pastos gigantes, adoptando principios termorreguladores. El diseño de este sistema tiene como objetivo reducir las cargas de calefacción y refrigeración causadas por los sistemas de fachada de vidrio. El sistema neumático, que está cerrado durante el día, se activa por la noche y actúa como una segunda fachada cubriendo la superficie de esta, protegiéndola de un enfriamiento excesivo. Además, el vidrio electrocrómico utilizado en la fachada durante el día asegurará que se refleje la luz por encima de una longitud de onda específica, evitando el sobrecalentamiento. El sistema de fachada de doble piel, de diseño biomimético, se aplicó al sistema de fachada de vidrio en el anexo contemporáneo ("espacio de la cafetería") del baño histórico Suleyman Pasha, y se llevaron a cabo los análisis de simulación energética (Figura 4). En los cálculos de

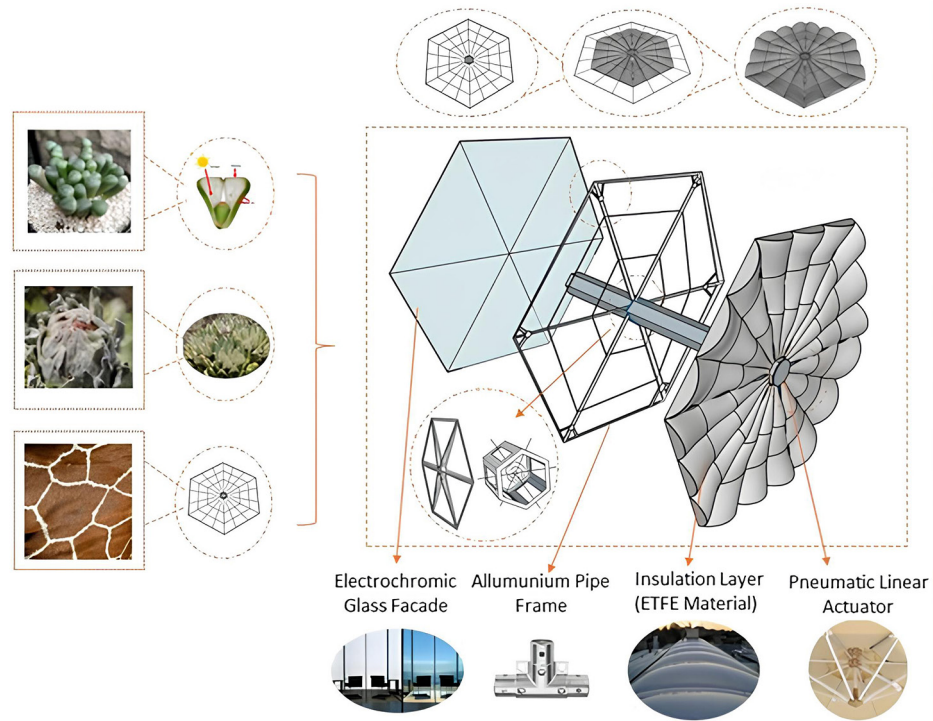


Figura 3. El módulo de fachada de doble piel se diseñó utilizando un enfoque biomimético.

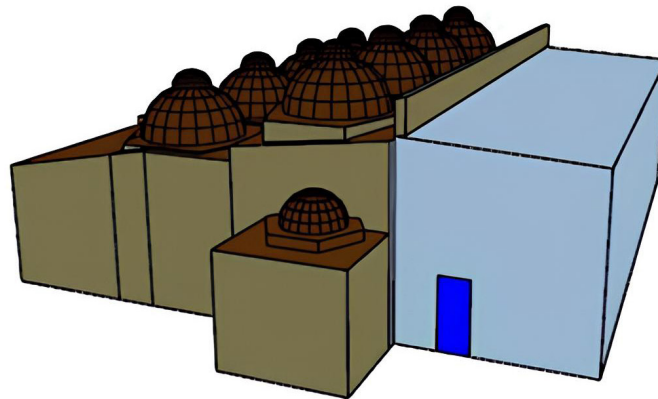


Figura 4. El modelo del baño Suleyman Pasha creado en el programa Design-Build (Öztürk ,2023).

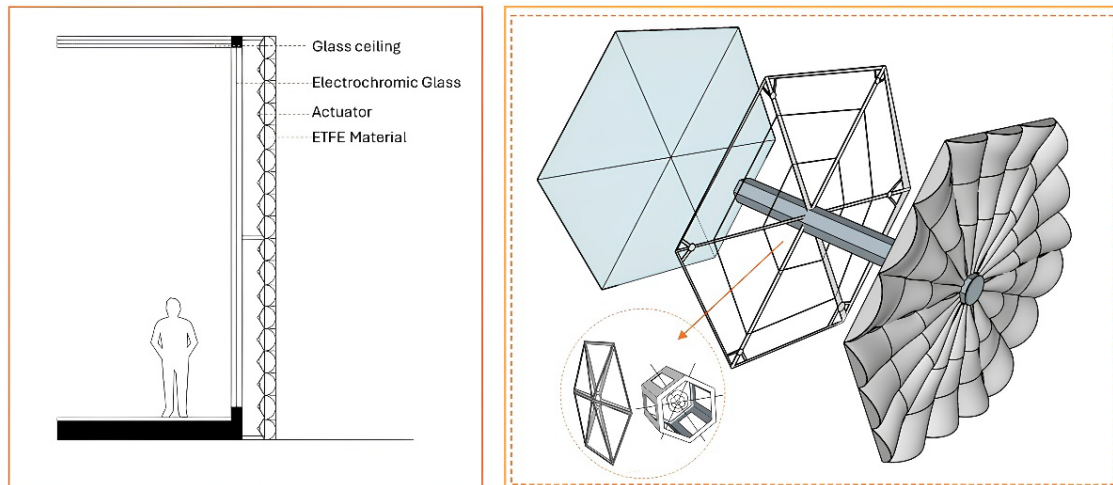


Figura 5. Aplicación del sistema de fachada de vidrio al espacio de la cafetería del baño Suleyman Pasha.

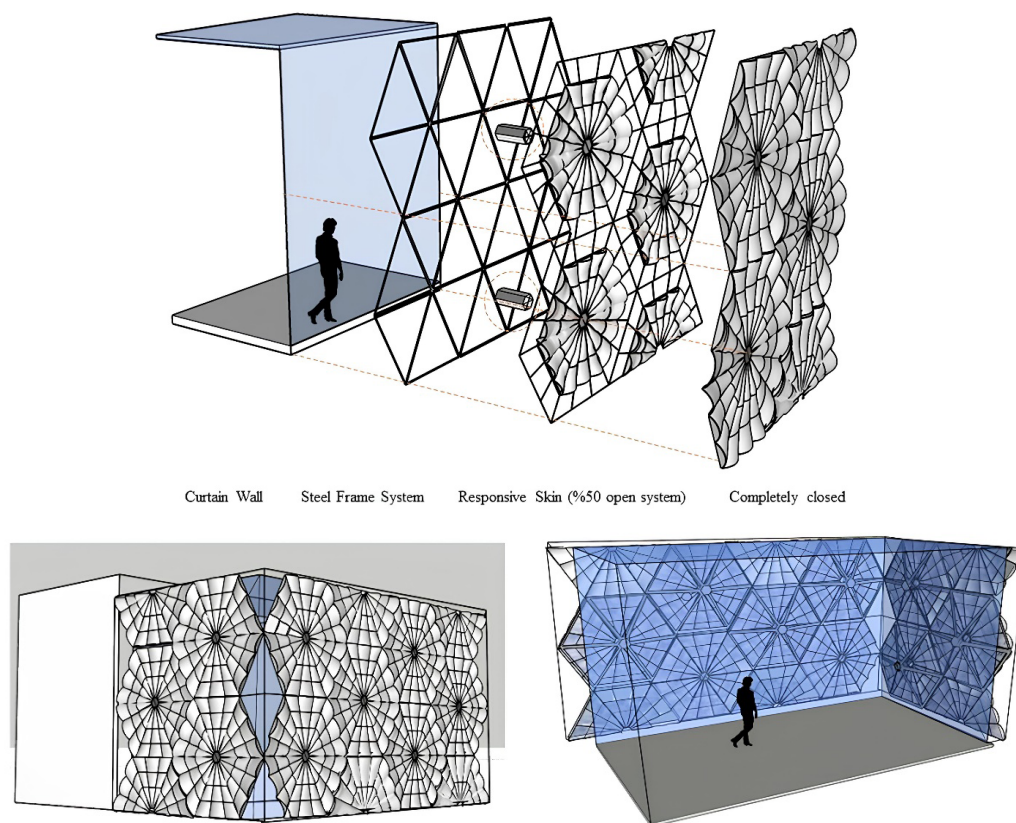


Figura 6. Aplicación del sistema de fachada de vidrio a la zona de la cafetería del baño Süleyman Pasha.

simulación energética, se ingresó al programa la información del sistema de fachada, que consta de tres escenarios diferentes, y se evaluó su efecto en los resultados de la carga de calefacción y refrigeración. El primer escenario se calculó utilizando las propiedades materiales existentes del edificio (Öztürk, 2023). Los resultados de la simulación se obtuvieron incorporando el sistema de vidrio electrocrómico de una sola capa en la información del material de la segunda y la doble fachada de vidrio electrocrómico en el tercer escenario (Figura 5 y Figura 6). Las propiedades del material del sistema de fachada de vidrio electrocrómico se obtuvieron del estudio de Lee y Tavit (2007) sobre el rendimiento del material de vidrio electrocrómico, y se definieron en el programa Design-Build. Los valores totales de consumo de energía del edificio de los baños se compararon utilizando las propiedades del material determinadas y logradas en el programa Design-Build e ingresando los datos climáticos de Kocaeli (Tabla 1 y Tabla 2).

Las propiedades térmicas de los materiales utilizados en el sistema de la fachada de vidrio existente del baño Suleyman Pasha, y los valores térmicos del sistema alternativo de fachada de vidrio electrocrómico de uno y dos pisos propuesto, se muestran en la Tabla 3 a continuación. Se obtuvieron tres resultados diferentes al ingresar los datos climáticos de la provincia de Kocaeli utilizando tres materiales diferentes en el programa de Design-Build. El caso 1 de estos tres escenarios es el análisis de carga de energía total de calefacción, refrigeración y energía obtenido al definir las propiedades del material existente de la estructura del baño. En el caso 2, se definieron en el programa las propiedades térmicas del material de vidrio electrocrómico de una sola capa en el material de vidrio del espacio de la cafetería del edificio, y se realizaron análisis energéticos. En el caso 3, la

simulación se realizó definiendo las propiedades del material de vidrio electrocrómico revestido de doble capa y reflectante, para el sistema de fachada de vidrio. Los tipos de material de vidrio electrocrómico y las propiedades térmicas recomendadas en el estudio fueron tomados del estudio de Lee y Tavit (2007). Se definieron en el programa agregando las propiedades materiales del edificio y los datos climáticos (Tabla 3).

DISCUSIÓN

El alza de la demanda energética del sector de la construcción y la energía de los sistemas utilizados para el confort de los ocupantes aumentan significativamente el consumo de energía. Por esta razón, están aumentando los intentos de reducir el consumo energético del edificio y garantizar el confort térmico en interiores. Este estudio aborda el problema del sobrecalentamiento y enfriamiento en fachadas de vidrio.

El sistema de fachada de vidrio de doble piel propuesto en el estudio se diseñó con un sistema neumático sensible a la temperatura. Se recomendó el vidrio electrocrómico para reducir los efectos adversos del exceso de luz en el interior durante el día. Los análisis de simulación se realizaron en dos tipos de vidrio electrocrómico utilizados en el diseño: una sola capa y doble capa. Se espera que el sistema de fachada de vidrio biomimético diseñado proporcione una solución al problema de sobrecalentamiento diurno del área de la cafetería del baño Suleyman Pasha. También se espera que el sistema neumático, que forma la segunda capa del sistema de la fachada, se cierre por la noche y actúe como aislante del

Tabla 3. Propiedades térmicas de los sistemas de fachada de vidrio y valores definidos en el programa.

Edificios	Materiales	Grosor (cm)	Conductividad térmica λ (W/mK)	Valor U (W/ m²K)
Análisis de la pared del espacio de la cafetería del edificio (CASO 1) (Öztürk, 2023)	Gris plateado templado	0,8 cm de ancho	0,052	U: 1,70
	Espacio de aire	0,05 cm	R: 0,11	
	Vidrio laminado templado	0,8 cm de ancho	0,052	
Análisis de paredes de sistemas de vidrio alternativos (CASO 2)	Vidrio electrocrómico	1 cm	0,010	U: 1,07
	Vidrio transparente de una sola capa	Coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC): 0,69 Transmitancia del vidrio (VT): 0,71 (Lee y Tavil, 2007)		
Análisis de pared del sistema de vidrio recomendado (CASO 3)	Vidrio electrocrómico	2 cm	0,011	U: 0,57
	Revestimiento reflectante de doble capa	SHGC: 0,17 VT: 0,10 (Lee y Tavil, 2007)		

Tabla 4. Valores totales de carga de calefacción y refrigeración según los resultados de la simulación energética.

	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Carga de calefacción (kWh)	23.357,71	19.549,33	15.876,61
Carga de refrigeración (kWh)	13.849,10	12.347,49	9.476,18

material de vidrio, evitando un enfriamiento excesivo en el interior. Para ver el efecto del sistema de fachada diseñado para este propósito en la carga anual total de calefacción y refrigeración de la estructura del baño, esto se modeló en el programa Design-Builder, y las definiciones de materiales y equipos utilizados para la calefacción de espacios se procesaron en el programa. Las cargas energéticas anuales se obtuvieron creando tres escenarios a través del modelo. De acuerdo con los resultados de la simulación, la carga de calefacción y refrigeración más alta se logra en el Caso 1. En el Caso 2 se observaron mejoras significativas tanto en las cargas de calefacción como de refrigeración, usando material de vidrio electrocrómico de una sola capa. La carga energética anual total del espacio disminuyó un 16% en comparación con el Caso 1. Cuando se examinan los resultados de la simulación, se observa una disminución en el consumo total de energía del edificio de aproximadamente un 32% entre el Caso 1 y el Caso 3 (Tabla 4).

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Para reducir el consumo de energía en el sector de la construcción a escala mundial, es fundamental centrarse en diseños energéticamente eficientes y llevar a cabo estudios interdisciplinarios en esta dirección. Los estudios de diseño de fachadas, particularmente aquellos inspirados en sistemas naturales, han alcanzado un punto crítico en la eficiencia energética de la envolvente del edificio. Dado que la envolvente del edificio actúa como un amortiguador entre los espacios interiores y exteriores, se pueden lograr ganancias significativas de energía aprendiendo de la naturaleza y diseñando sistemas que respondan con sensibilidad a la luz del día. En este estudio, se ha confirmado la hipótesis de que las soluciones biomiméticas podrían resolver el problema de las cargas de calefacción y refrigeración en los sistemas de fachadas de vidrio de los edificios

como resultado de investigaciones y análisis de simulación. Este estudio investigó plantas y animales para abordar los problemas de sobrecalentamiento y sobreenfriamiento en sistemas de fachadas de vidrio en ubicaciones con grandes diferencias de temperatura. Se propuso una solución de fachada arquitectónica basada en el principio termorregulador de las dos plantas seleccionadas como solución para el sistema de fachada. Se han llevado a cabo estudios sobre el diseño de la fachada utilizando plantas que responden a un calentamiento y enfriamiento excesivos. El sistema de fachada propuesto podría reflejar el exceso de luz durante las altas temperaturas diurnas. También reduciría la demanda de carga de refrigeración al disminuir el uso de aire acondicionado en el interior. Además, el sistema se apagaría por la noche y actuaría como capa aislante en la fachada durante las inclemencias meteorológicas cuando baje la temperatura. Si bien se recomienda el material de vidrio electrocrómico para solucionar el sobrecalentamiento en el sistema de doble fachada, el diseño del sistema neumático con material ETFE, que se activa a bajas temperaturas, formará la capa aislante.

Como parte del estudio, se llevó a cabo un análisis de simulación para probar el sistema de fachada diseñado y ver la tasa de consumo de energía. La fachada diseñada se analizó en un edificio ubicado en la provincia de Kocaeli, que recibió un espacio de cafetería (adición contemporánea) en el sistema de fachada de vidrio en la fachada sur después de la restauración. Dado que la adición contemporánea al edificio se encuentra en el lado sur, la comodidad interior en verano se ve afectada negativamente, lo que provoca un sobrecalentamiento. Cuando se examinaron los resultados de la simulación en tres situaciones diferentes en función de las propiedades del vidrio, se observó una mejora del 32% en la carga energética total utilizando una fachada de vidrio electrocrómico de doble capa. La búsqueda de soluciones a problemas arquitectónicos mediante el análisis de la naturaleza conduce, en este punto, al estudio de diseños innovadores de materiales biomiméticos. De esta manera, se pueden ofrecer soluciones sostenibles y energéticamente eficientes con un enfoque interdisciplinario.

REFERENCIAS

Aly, Z., Ibrahim, A., & Abdelmohsen, S. (2021). Augmenting passive actuation of hygromorphic skins in desert climates: learning from thorny devil lizard skins. In *9th International Conference of the Arab Society for Computer Aided Architectural Design*, American University in Cairo, Egypt.

Asknature (n.d.). <https://asknature.org/strategy/leaves-protect-from-freezing/>

Badarnah, L., Farchi, Y. N., & Knaack, U. (2010). Solutions from nature for building envelope thermoregulation. *Design & Nature V: Comparing Design in Nature with Science and Engineering*, 5, 251. <https://doi.org/10.2495/DN100221>

Cactus Kingdom (n.d.). <https://cactuskingdom.ca/product/fenestraria-aurantiaca-baby-toes-seed/>

Çağlar, S. (2020). Voronoi Diyagramları Dünyayı Anlamamızı Nasıl Sağlar? <https://www.matematiksel.org/voronoi-diyagramlari-dunyayi-anlamamizi-nasil-saglar/>

Engin, N. (2012). Enerji Etkin Tasarımda Pasif İklimlendirme: Doğal Havalandırma. *Tesisat Mühendisliği*, 129, 62-70. https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/c8aa7c541085a2b_ek.pdf

Faragalla, A. M., & Asadi, S. (2022). Biomimetic design for adaptive building façades: a paradigm shift towards environmentally conscious architecture. *Energies*, 15(15), 5390. <https://doi.org/10.3390/en15155390>

Farchi Nachman, Y. (2009). Learning from nature: Thermoregulation envelope, in Department of Building Technology. Delft University of Technology: Façade Design.

Helms, M., Vattam, S. S., & Goel, A. K. (2009). Biologically inspired design: process and products. *Design Studies*, 30(5), 606–622. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2009.04.003>

International Energy Agency. Energy Efficiency (2019). Buildings, The global exchange for energy efficiency policies, data and analysis.

Kahramanoğlu, B., & Alp, N. Ç. (2021). Kinetik Sistemli Bina Cephelerinin Modellleme Yöntemlerinin İncelenmesi. *AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture*, 5(1), 119-138. <https://doi.org/10.53600/ajesa.861479>

Kalatha, A. (2016). The water wall: A bio-inspired thermoregulative facade system. [Unpublished master thesis], Delft University of Technology, Netherlands.

Kim, K., & Torres, A. (2021). Integrated Façades for Building Energy Conservation; IC-AIRES, Lecture Notes in Networks and Systems; Springer: Cham, Switzerland; 361.

Kuru, A., Oldfield, P., Bonser, S., & Fiorito, F. (2019). Biomimetic adaptive building skins: Energy and environmental regulation in buildings. *Energy and Buildings*, 205, 109544. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109544>

Lee, E. S., & Taval, A. (2007). Energy and visual comfort performance of electrochromic windows with overhangs. *Building and Environment*, 42(6), 2439-2449. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.04.016>

Mutlu Avinç, G., & Arslan Selçuk, S. (2019). Mimari Tasarımda Biyomimetik Yaklaşımlar: Pavilyonlar Üzerine Bir Araştırma. *Online Journal Of Art & Design*, 7(2), 92-107. <http://www.adjournal.net/articles/72/728.pdf>

Öztürk, Büşra., (2023). Çağdaş eklerin tarihi yapının enerji performansına etkisinin incelenmesi [MSc thesis]. Konya Teknik University, Institute of Graduate Education, Konya.

Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (2012). Energy efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3559-3573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>

Sheikh, W. T., & Asghar, Q. (2019). Adaptive biomimetic facades: Enhancing energy efficiency of highly glazed buildings. *Frontiers of Architectural Research*, 8(3), 319-331. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.06.001>

Sommese, F., Badarnah, L., & Ausiello, G. (2022). A critical review of biomimetic building envelopes: Towards a bio-adaptive model from nature to architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112850. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112850>

Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X. & Tsangrassoulis, A. (2021). Design approaches and typologies of adaptive façades: A review. *Automation in Construction*. 121, 103450. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103450>

Paar, M. J., & Petutschnigg, A. (2016). Biomimetic inspired, natural ventilated facade—A conceptual study. *Journal of Facade Design and Engineering*, 4(3-4), 131-142. <https://doi.org/10.3233/FDE-171645>

Zari, M. P. (2007). Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability. In The SB07 New Zealand Sustainable Building Conference, 33-42. <https://www.semanticscholar.org/paper/BIOMIMETIC-APPROACHES-TO-ARCHITECTURAL-DESIGN-FOR-Zari/1a7b024096491c64beafc4d9b243f84a321cd697>

OPTIMIZACIONES EN EL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO PARA LA SOSTENIBILIDAD DE UN ÁREA METROPOLITANA DE SUDAMÉRICA IMPLEMENTANDO ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE MATERIALES

OPTIMIZATION IN THE DESIGN OF CONCRETE MIXES FOR THE SUSTAINABILITY OF A SOUTH AMERICAN METROPOLITAN AREA BY IMPLEMENTING MATERIAL LIFE CYCLE ANALYSIS

OTIMIZAÇÕES NO PLANEJAMENTO DE MISTURAS DE CONCRETO PARA A SUSTENTABILIDADE DE UMA ÁREA METROPOLITANA NA AMÉRICA DO SUL, IMPLEMENTANDO A ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DOS MATERIAIS

Andrés Felipe Restrepo-Ramírez

Magíster en Construcción
 Profesor auxiliar, Escuela de Construcción, Facultad de Arquitectura
 Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-1178-7780>
anfrestrepورا@unal.edu.co (Autor de Correspondencia)

Carlos Andrés Rúa-Machado

Master Business Administration
 Profesor Asistente, Escuela de Construcción, Facultad de Arquitectura
 Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-4174-5087>
caruama@unal.edu.co

Yhan Paul Arias-Jaramillo

Magíster en Ingeniería de Materiales y Procesos
 Profesor Asociado, Escuela de Construcción, Facultad de Arquitectura
 Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-8988-6295>
ypariasj@unal.edu.co



RESUMEN

El análisis de Ciclo de Vida ACV, es una metodología que identifica los aspectos ambientales y los impactos potenciales asociados con un producto mediante la compilación de un inventario de las entradas y salidas del sistema para su optimización, planificación estratégica e implementación de políticas sostenibles. En el ámbito de la producción de concretos, se han utilizado diversas técnicas de optimización y su impacto en el diseño de mezclas como análisis multicriterio, modelos estadísticos, materiales cementantes suplementarios y algoritmos de optimización. Este trabajo aplica el ACV a la producción de concreto el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Colombia, con la hipótesis de optimizar las proporciones, sin agregar aditivos ni adiciones especiales, se puede reducir las emisiones de CO₂ y el consumo de energía. Utilizando la metodología ACI 211, se diseñaron mezclas de concreto y se evaluaron sus impactos ambientales. Los resultados muestran que el uso de agregados gruesos de mayor tamaño reduce el consumo de cemento, disminuyendo las emisiones de CO₂ hasta un 15%. La mezcla óptima no sólo es más económica, sino también de menor impacto ambiental. Las conclusiones indican que es posible compatibilizar la eficiencia económica, promoviendo la disminución en la huella de carbono.

Palabras clave

análisis de ciclo de vida ACV, sostenibilidad, optimización de agregados, producción de concreto

ABSTRACT

Life Cycle Assessment (LCA) is a methodology that identifies a product's environmental aspects and potential impacts by compiling an inventory of system inputs and outputs for optimization, strategic planning, and implementing sustainable policies. Several optimization techniques and their impact on mix design have been used in concrete production, such as multi-criteria analysis, statistical models, supplementary cementitious materials, and optimization algorithms. This work applies LCA to concrete production in the Metropolitan Area of the Aburrá Valley, Colombia, with the hypothesis that optimizing proportions without adding special additives can reduce CO₂ emissions and energy consumption. Concrete mixes were designed using the ACI 211 methodology, and their environmental impacts were evaluated. The results show that using larger coarse aggregates reduces cement consumption, decreasing CO₂ emissions by up to 15%. The optimal mix is not only cheaper but also has a lower environmental impact. The conclusions indicate that it is possible to make economic efficiency compatible with promoting a lower carbon footprint.

Keywords

life cycle assessment LCA, sustainability, aggregate optimization, concrete production

RESUMO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que identifica os aspectos ambientais e os possíveis impactos associados a um produto por meio da compilação de um levantamento das entradas e saídas do sistema para otimização, planejamento estratégico e implementação de políticas sustentáveis. No campo da produção de concreto, várias técnicas de otimização têm sido usadas e seu impacto no projeto de mistura, como análise multicritério, modelagem estatística, materiais cimentícios suplementares e algoritmos de otimização. Este trabalho aplica a ACV à produção de concreto na Área Metropolitana do Vale de Aburrá, na Colômbia, com a hipótese de que a otimização das proporções, sem a adição de aditivos ou aditivos especiais, pode reduzir as emissões de CO₂ e o consumo de energia. Usando a metodologia ACI 211, as misturas de concreto foram projetadas e seus impactos ambientais foram avaliados. Os resultados mostram que o uso de agregados grossos maiores reduz o consumo de cimento, reduzindo as emissões de CO₂ em até 15%. A mistura ideal não é apenas mais econômica, mas também tem um impacto ambiental menor. As conclusões indicam que é possível compatibilizar a eficiência econômica e, ao mesmo tempo, promover uma redução na pegada de carbono.

Palavras-chave:

análise do ciclo de vida ACV, sustentabilidade, otimização de agregados, produção de concreto

INTRODUCCIÓN

La producción de concreto es parte fundamental del sector industrial de la construcción, pero su impacto ambiental ha sido objeto de creciente preocupación en un mundo en busca de prácticas sostenibles debido a la sobreexplotación de recursos y el daño de múltiples ecosistemas. Diversas investigaciones han demostrado que el concreto es uno de los principales generadores de GEI (Belaïd, 2022a; Das et al., 2023; Mocová et al., 2019; Watari et al., 2023). La demanda mundial de este material se ha cuadruplicado en las últimas tres décadas, lo que ha provocado un aumento de las emisiones de CO₂ exacerbando la escasez de arena y el conflicto social (Watari et al., 2023). En este contexto, ACV se convierte en una herramienta esencial para evaluar y desarrollar criterios que ayudan a mitigar los impactos ambientales negativos que genera la producción de mezclas de concreto. Aunque existen desafíos y discrepancias en la medición del impacto ambiental del concreto por la ausencia de una metodología estandarizada de ACV, los estudios proporcionan criterios para avanzar en este marco (Jayasuriya et al., 2023). Estas discrepancias surgen de factores como la definición del alcance, los datos del inventario, la evaluación del impacto y la interpretación (Hafez et al., 2019), sin embargo, existen algunos estándares como la norma NTC-ISO 14044 (ICONTEC, 2021) que se implementa en algunos países de Latinoamérica, especialmente en Colombia, la que establece un enfoque sistemático y holístico para evaluar

los impactos ambientales de procesos y productos de forma estructurada.

La ISO 14044, define este proceso como la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos potenciales de un sistema de producción de un producto, a través de su ciclo de vida lo que convierte el ACV. de forma complementaria vincular otros enfoques, por ejemplo, Lean Construction (Koskela et al., 2019), abren las posibilidades de comprensión y articulación. La tabla 1, sintetiza algunos aportes orientados a la búsqueda de implementaciones basadas en ISO 14044.

Estas herramientas, a través de sus modelos metodológicos y numéricos aportan elementos clave para los desafíos ambientales que enfrenta la humanidad (Boccia y Sarnacchiaro, 2018; Crowther y Seifi, 2022), además, sirven como base para revertir los hallazgos del Foro Económico Mundial sobre el comportamiento de muchas empresas y organizaciones que, a menudo subestiman o pasan por alto los riesgos ambientales asociados a su cadena de valor y la falta de incorporación de criterios sostenibles en sus proyectos y actividades comerciales (WEF, 2020).

En este sentido se hace necesario, a través de lineamientos de ISO 14044, medir los impactos por emisiones de CO₂, desde los procesos tradicionales del diseño de mezclas de concreto en obra que permitan identificar estrategias que contribuyan a los retos de mitigación

Tabla 1. Modelos de análisis ACV basados en NTC-ISO 14044. Fuente: Elaboración de los autores.

Región	Herramienta	Descripción
EEUU	TRACI (Tool for Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts) (Henderson, Niblick y Golden, 2021)	Evaluar los impactos ambientales. Proporciona una base de datos de impactos ambientales que se puede utilizar en análisis de ciclo de vida.
	BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability) (Kneifel et al., 2019)	Permite a actores AECO seleccionar productos de construcción rentables y ambientalmente basados en estándares de consenso.
España	UNE-EN 15804:2012+A1:2014	Proporciona un marco para la declaración ambiental de productos y evalúa su ACV centrada en edificaciones.
Unión Europea	PEF (Product Environmental Footprint) (European Commission, 2021)	Evalúan el impacto ambiental multicriterio de productos y organizaciones. Siguen los principios de la ISO 14040 y 14044.
	OEF (Organizational Environmental Footprint) (Damiani et al., 2022)	
	EW-MFA (Material flow account) (Europäische Kommission Statistisches Amt, 2018)	
Global	SimaPro (Speck et al., 2016)	Software de análisis ACV. Sigue los principios de la ISO.
	EIO-LCA (Azari, 2019)	Evalúa las interconexiones económicas y ambientales en una escala nacional o regional.
	SFA (Substance Flow Analysis) (Chertow, 2004)	Evalúa los flujos de sustancias en una zona determinada durante un tiempo determinado (generalmente un año).

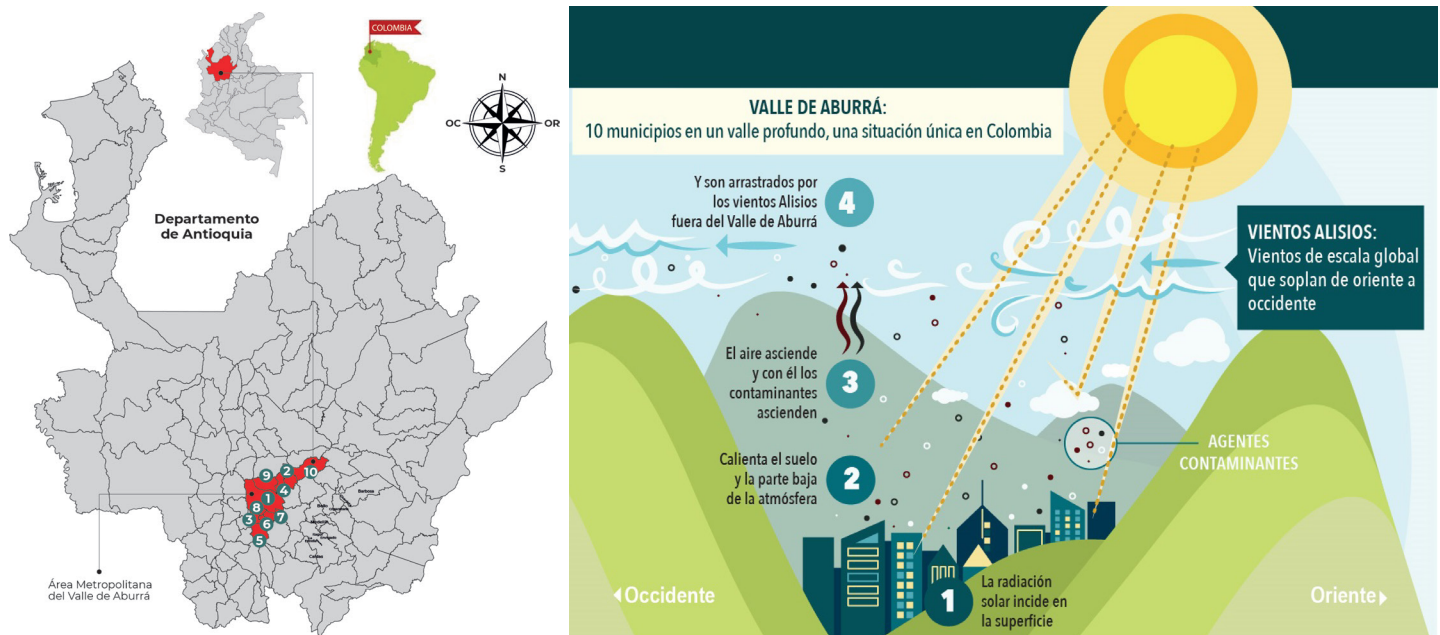


Figura 1. Escenario Valle de Aburrá. Fuente: Mapa (Asoareas, 2021), Imagen (SIATA, 2016).

de GEI en la región, de manera que pueda ir en sintonía con las políticas públicas de cambio climático, en el caso particular se ha seleccionado la ciudad de Medellín – Colombia, teniendo como referente el Plan de Acción Climática PAC 2020 -2050, (Alcaldía de Medellín, 2020), núcleo metropolitano del Valle de Aburrá.

La fase actual del proyecto de investigación reúne un levantamiento de datos asociados a las propiedades de los áridos de diferentes canteras distribuidas en el área metropolitana del Valle de Aburrá en el departamento de Antioquia, Colombia. Debido a las características topográficas y climatológicas, este territorio, se define como una cuenca atmosférica (AMVA, 2015), ya que su espacio está delimitado por montañas y en él se propicia la concentración y reacción de gases y partículas contaminantes del aire que no son desplazadas completamente por los vientos (Figura 1).

El perímetro montañoso condiciona los movimientos de distribución que genera el sistema de vientos alisios y por ello el fenómeno se agrava en algunas temporadas del año. (Agusti-Panareda et al., 2019; B. Liu et al., 2023; SIATA, 2016). Un estudio local (AMVA, 2017), señala que este tipo de condiciones generan un efecto de concentración que se caracteriza por un límite atmosférico de baja altura y alta nubosidad, limitando la penetración de radiación solar y provocando enfriamiento del aire. Esto sumado a los vientos débiles, limita la dispersión de material particulado y otros contaminantes. Esta situación que se agudiza con una creciente densidad poblacional de 3557 habitantes/km², que demanda la construcción edificaciones típicas, con promedio de 30 niveles, que emplean sistemas estructurales basados en muros en concreto reforzado, dando como resultado un

aumento acelerado en la producción de concreto y por consiguiente, en la explotación de las materias primas que lo componen.

En este escenario, se generan episodios de contaminación que son acentuados en gran medida por la carga que genera el parque automotor, El PAC 2020-2050 indica que: “la proporción de aporte a la contaminación por fuentes industriales es cercana al 30 %, mientras las fuentes móviles generan cerca del 69 % de las emisiones atmosféricas evaluadas y, en particular, son responsables del 91 % de las emisiones de PM 2,5” (Alcaldía de Medellín, 2021). La incidencia del parque automotor constituye una de las variables fundamentales de GEI para la región y particularmente para las actividades de producción de concreto, ya que el uso intensivo de áridos (arena/grava) y su transporte, desde las canteras, implica una circulación constante de vehículos de carga necesarios para la producción in situ del mismo.

El reconocimiento y reflexión sobre esta situación en el entorno debe favorecer, en cualquier actividad económica vinculada a la cadena de valor de la construcción, al desarrollo de una conciencia sostenible y uno de los beneficios clave de ello reside en los procesos de formación, donde la sensibilización permite a los educandos desarrollar un pensamiento sistémico que los conduzca a evaluar el impacto de su toma de decisiones y la habilidad para la gestión del carbono (CLC , 2016) a través de las adquisiciones de los recursos en todo su ciclo de vida (Bohvalovs et al., 2023; Martinsone et al., 2023). Esto, para el sector económico de la construcción, puede representar un progreso hacia el desarrollo sostenible de las edificaciones y la divulgación de información relevante relacionada con la sostenibilidad.

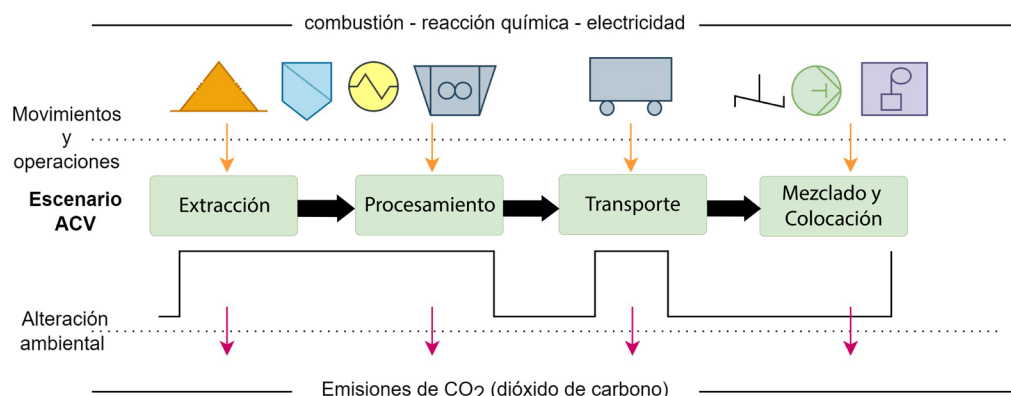


Figura 2. Contexto holístico del ciclo de emisiones del concreto. Fuente: Elaboración de los autores.

RELACIÓN CONCRETO Y MEDIO AMBIENTE

El concreto es el material artificial más utilizado en el mundo, con más de 25 Gt/año (De Andrade Salgado y De Andrade Silva, 2022; Gursel et al., 2014), está compuesto por cuatro ingredientes básicos: agua, cemento, grava como agregado grueso AG y arena como agregado fino AF. Estas materias primas constituyen uno de los recursos minerales más extraídos del planeta (Del Rey Castillo et al., 2020), además, este producto incluye etapas en su proceso de manufactura con alto consumo de energía y operaciones, convirtiéndose en el responsable de gran parte de la emisión de gases de efecto invernadero. La industria global del cemento presenta una producción de 4,1 billones de toneladas al año, lo que representa del 8-10% de las emisiones antropogénicas de CO₂ en el mundo (Poudyal y Adhikari, 2021; Vázquez-Calle et al., 2022). Además, los estudios indican que por cada kilogramo de cemento producido se liberan (0,80-0,90) kilogramos de dióxido de carbono al ambiente, convirtiendo a la producción de cemento en la principal líder de GEI después de las plantas de producción eléctrica (Ajayi y Babafemi, 2024). Según Duque (2020), un concreto típico con resistencia de 25 MPa genera 0,29 t CO₂ -eq/m³, en donde la producción del cemento representa 82% de esta cifra.

El significativo aumento en la tasa de uso de concreto en las últimas décadas como resultado del aumento de la población mundial y la correspondiente demanda de infraestructura, ha causado un gran problema para el medio ambiente (Yousf et al., 2024). La Figura 2, presenta una visión integral en la que se relacionan las etapas del ciclo de vida de la materia prima, desde su extracción hasta su procesamiento y colocación en obra. Debido a las restricciones de acceso, en este escenario el proyecto de investigación involucra sólo la caracterización de agregados gruesos y finos desde diferentes fuentes para generar un inventario de esta línea en particular. Los detalles de este proceso se describen en la metodología desarrollada.

En Colombia, estos recursos tienen una alta demanda y la tendencia del consumo es creciente. Los volúmenes de producción de concreto en el país alcanzaron una producción de 6,9 millones de m³ de junio 2022 a junio de 2023; un crecimiento del 3,7% en relación al mes de junio del año 2022. El 68,0% de la producción estuvo orientada a vivienda, 23,3% a obras civiles y 18,6% a edificaciones. Para este mismo periodo, el departamento de Antioquia región comprendida por 123 municipios, en el que se encuentra Medellín y su Área Metropolitana presenta el mayor crecimiento con un incremento del 17,6%, despacho de 179855 toneladas de cemento y una producción total de concreto de 89376 m³ (DANE, 2023).

Estas estadísticas subrayan la importancia que constituye el ACV en la elaboración de concretos, así como el monitoreo de la producción y transporte de los insumos como una vía para desarrollar datos y elaborar proyecciones de GEI asociados a estos volúmenes y cómo, desde etapas tempranas, interpretar los impactos para la definición de estrategias de mitigación.

En Colombia, actualmente el diseño de mezclas de concreto no contempla herramientas o prácticas que incluyan la cuantificación del impacto ambiental asociado a la generación de CO₂ y su repercusión en el cambio climático, pues se cuenta con metodologías desarticuladas para este fin. A partir de soluciones informáticas o herramientas como la Gestión del Ciclo de Vida del Producto o PLM (Product Life Management), pueden favorecerse los criterios de selección de cadenas de suministro más inteligentes y por ende, contribuir con medios tecnológicos al contexto de la industria 4.0 y por consiguiente, a la implementación explícita de políticas públicas (Stegmann, 2020). Estas políticas, orientadas al desarrollo sostenible del país, deberían enfocarse en incentivar la eficiencia energética y promover prácticas de construcción sostenible. De esta manera, se alineó con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), haciendo hincapié en la creación de ciudades y comunidades sostenibles, así como en modalidades de consumo y producción que tengan como meta la reducción del 20 % de gases de efecto invernadero (GEI).

Tabla 2. Enfoques relacionados a la mitigación GEI e impactos ambientales. Fuente: Elaboración de los autores.

Enfoque	Marco	Técnica	Fuente
Optimización De concretos	Técnicas de optimización	Modelos predictivos AI - ML	(Zandifaez et al., 2023)
		Optimización multiobjetivo	(Z. Liu et al., 2023)
		Asignación de inventario	
ACV	Life Cycle Assessment Environmental Impact Assessment	Selección de agregados	(Siamardi et al., 2023)
		Agregados artificiales	(Jamil et al., 2023)
		Calcáneos	(Ghadir et al., 2021)
		Análisis petrográfico	(Goyal et al., 2023)
		Contracción/reducción Materiales reciclados	(Bush et al., 2022)
		Estudios comparativos Estrategias de descarbonización	

Tabla 3. Estudios sobre técnicas de optimización para mitigar CO2 y GEI. Fuente: Elaboración de los autores.

Fuente	Estudio	Técnicas de Optimización	Parámetros de Sostenibilidad
Naseri et al., 2023 Norte América-Oceanía	A novel evolutionary learning to prepare sustainable concrete mixtures with supplementary cementitious materials	Algoritmos de aprendizaje evolutivo, programación de optimización	Reducción del potencial de calentamiento global, consumo de energía, consumo de materiales, CO ₂ incorporado
Wang et al., 2022 Asia	Energy Optimization Design of Limestone Hybrid Concrete in Consideration of Stress Levels and Carbonation Resistance	Algoritmo genético, algoritmo del ciclo del agua	Resistencia mecánica, resistencia a la carbonatación, impacto ambiental, energía incorporada
Naseri et al., 2020 Asia-Norte América	Designing sustainable concrete mixture by developing a new machine learning technique	Algoritmos de aprendizaje automático, modelado estadístico	Reducción de CO ₂ incorporado, consumo de energía, consumo de materiales
Khan, Do y Kim, 2016 Asia	Cost effective optimal mix proportioning of high strength self-compacting concrete using response surface methodology	Metodología de superficie de respuesta (RSM)	Costos, impacto ambiental, resistencia a la compresión, durabilidad
Ibe et al., 2022 África	Optimization and Simulation of Saw Dust Ash Concrete Using Extreme Vertex Design Method	Diseño de vértice extremo	Reducción de CO ₂ incorporado, durabilidad, propiedades mecánicas
Ewa et al., 2023 África	Optimization of saw dust ash and quarry dust pervious concrete's compressive strength using Scheffe's simplex lattice method	Método de red simplex de Scheffe	Resistencia a la compresión, impacto ambiental, sostenibilidad de los materiales
Kim et al., 2022 Norteamérica	OpenConcrete: a tool for estimating the environmental impacts from concrete production	Análisis de escenarios de impactos para producir una mezcla de concreto representativa en los Estados Unidos	Emisiones de GEI, óxido de nitrógeno, óxido de azufre y compuestos orgánicos volátiles, energía embebida, consumo de agua y emisiones de partículas menores a 2,5 micrones (PM2,5).
Berkeley, s.f.	Green Concrete LCA Web Tool	Cuantificación de los impactos ambientales de la producción de concreto y sus componentes (como cemento, agregados, aditivos y materiales cementosos suplementarios).	Emisiones de GEI, energía embebida.

Los estudios más recientes abordan marcos combinados y exploran propiedades de materiales tradicionales y nuevas incorporaciones buscando eficiencias y optimizaciones que contribuyen a menores tasas de consumo de material cementante (cemento Portland) y con ello una menor huella de carbono (Tabla 2).

Desde el punto de vista de la protección ambiental, estas investigaciones están asociadas al diseño sostenible y contribuyen a la mitigación de impactos. Este trabajo se enmarca en la misma línea de la optimización y dosificación eficiente del concreto para promover mejores prácticas y criterios de valor que aminoren los efectos que genera

la actividad humana en torno a la construcción como lo propone (Oladazimi et al., 2020). Aunque los esfuerzos aún no están integrados y los desafíos ambientales de la producción de cemento y concreto persisten (Belaïd, 2022b) los procesos de investigación y los modelos análisis fundamentados en ISO 14044 continúan la contribución al conocimiento para aproximarse a criterios estandarizados para la toma de decisiones anticipada. La tabla 3 registra estudios específicos orientados a la optimización y mitigación de GEI. Además, se ha observado que las herramientas informáticas desarrolladas permiten cuantificar los impactos ambientales asociados a mezclas de concreto. Sin embargo, estas herramientas presentan limitaciones al no integrar fases como el diseño de las mezclas en función de las propiedades de los materiales propios del lugar y la utilización de contenidos de cemento establecidos.

Además, estos estudios suelen enfocarse únicamente en la cuantificación de gases de efecto invernadero y energía embebida. Sin embargo, no se evidencia de manera clara el efecto que pueden tener variables como el porcentaje de humedad, los tamaños de agregados y otras propiedades físicas de los materiales. Estas variables, debido a su naturaleza estocástica, pueden influir en los resultados de las herramientas desarrolladas.

Por tanto, este estudio se centra en la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) al diseño de mezclas de concreto en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Colombia. Su propósito es demostrar que la identificación, caracterización, elección correcta y optimización de las proporciones de las mezclas de concreto pueden reducir las emisiones de CO₂, el consumo de energía y otros impactos ambientales. Lo que es especialmente relevante en un sector que presenta alta informalidad en Colombia, donde existen vacíos en los criterios objetivos para definir las fuentes de materias primas para la elaboración de mezclas de concreto. Además, la falta de una selección con criterio ambiental desde el punto de vista metodológico dificulta una respuesta ágil a la ejecución de obras de infraestructura. Con esto se busca concienciar y guiar a los tomadores de decisiones en la ejecución y diseño de los procesos constructivos, al seleccionar las materias primas utilizadas en la confección de mezclas de concreto en distintas edificaciones. Para contribuir a la solución se plantea una metodología que; a partir de la identificación de las fuentes, la caracterización de los materiales y su declaración ambiental, junto con la articulación de técnicas de diseño de mezclas de concreto, pueda generar beneficios ambientales y económicos en la producción de concreto, además de destacar la necesidad de que el sector de la construcción implemente este tipo de prácticas e iniciativas.

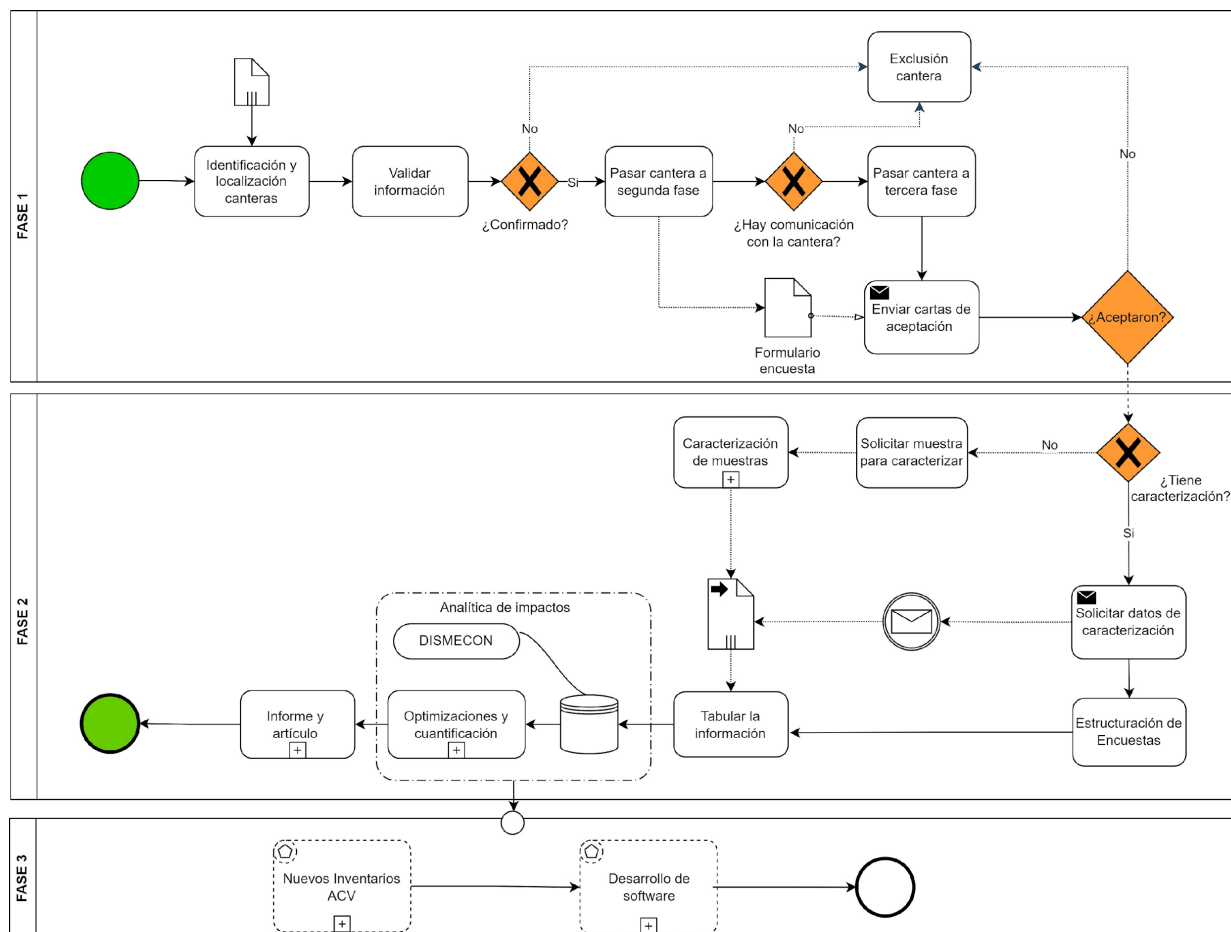


Figura 3. Fase del proceso metodológico. Fuente: Elaboración de los autores.

METODOLOGÍA

Esta investigación considera tres fases enmarcadas en el ACV. En su primera y segunda fase, se contempla el escenario de producción de concreto in situ y se enfoca en la gestión de áridos como primer inventario para la evaluación de emisiones GEI y su relación con el diseño de mezclas. Los inventarios asociados al concreto premezclado (producción en plantas industrializadas) no se abordan en este artículo, esto se propone para una futura fase 3.

Datos de la caracterización de los materiales producidos en canteras (n=13), ubicadas en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, tabla 2, son utilizados para determinar las dosificaciones de mezclas de concretos óptimas desde el punto de vista económico y ambiental. La figura 3, presenta el proceso metodológico propuesto, donde se destacan las dos primeras fases, avance de la investigación actual, y el escenario de la etapa 3 en la que se abordará el desarrollo de un software de estimación GEI para concretos in situ y premezclados.

La caracterización de los materiales de cantera, agregados finos y gruesos, se hizo bajo parámetros normativos (Normas Técnicas Colombianas NTC, y sus equivalentes a las normas ASTM) Figura 4 y Figura 5. La tabla 4 identifica la distribución de las fuentes de materia prima en los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Para un total de 13 canteras entre agregados finos y agregados gruesos.

Figura 4, Protocolos realizados para determinar los diferentes ensayos normativos y fuente de datos que componen la caracterización de los agregados gruesos AG.

Para asegurar las resistencias requeridas, los datos obtenidos mediante los ensayos de caracterización, permiten la parametrización de sus propiedades en función de la relación agua-cemento-árido. La calidad del concreto depende de varios factores, sin embargo, el diseño y la elección de materias primas como los agregados; constituyen elementos críticos en su durabilidad (Uthaman y Vishwakarma, 2023).

INVENTARIO AMBIENTAL DE LOS MATERIALES

El análisis de impacto se realizó desde el marco teórico que analiza los procesos relacionados a la producción de concreto en la zona del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Para el inventario de la declaración ambiental de los materiales que constituyen las mezclas de concreto, se consultó la base de datos (THE INTERNATIONAL EPD SYSTEM, 2024); y se buscaron las empresas proveedoras de cemento portland y de agregados finos y gruesos, del lugar geográfico objeto de estudio, de las que sólo

Tabla 4. Localización fuentes de los agregados (áridos). Fuente: Elaboración de los autores.

Municipio	N° de Canteras Evaluadas
Medellín (Dtto.)	4
Girardota	3
Caldas	3
Itagüí	1
Bello	2

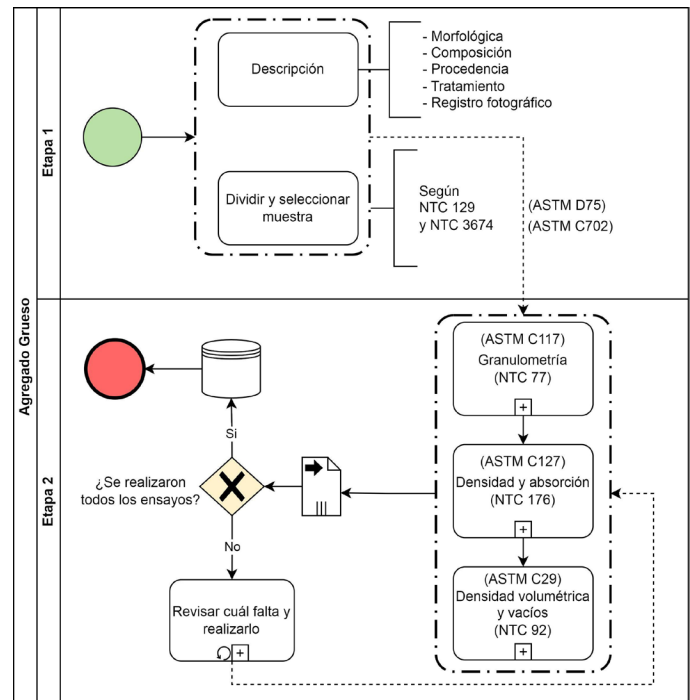


Figura 4. Proceso metodológico de caracterización AG. Fuente: Elaboración de los autores.

se identificaron dos empresas: Cemento Argos (Portland Cement Association, 2014) para el cemento y (Industrial Concreto S.A.S., 2019) para agregados finos y gruesos.

Para la constitución del inventario ambiental de los materiales, se plantea la siguiente hipótesis ambiental: "Respectivamente los materiales agregados finos y agregados gruesos del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, por su geología y forma de extracción, presentan un DAP (Declaración Ambiental de Producto) igual a los reportados por Industrial Concreto."

La unidad funcional declarada es una tonelada métrica para agregados finos y de igual manera para agregados gruesos, específicamente arena para concreto y agregado grueso de Tamaño máximo nominal de 19 mm y 25 mm. Los indicadores se presentan en la tabla 5.

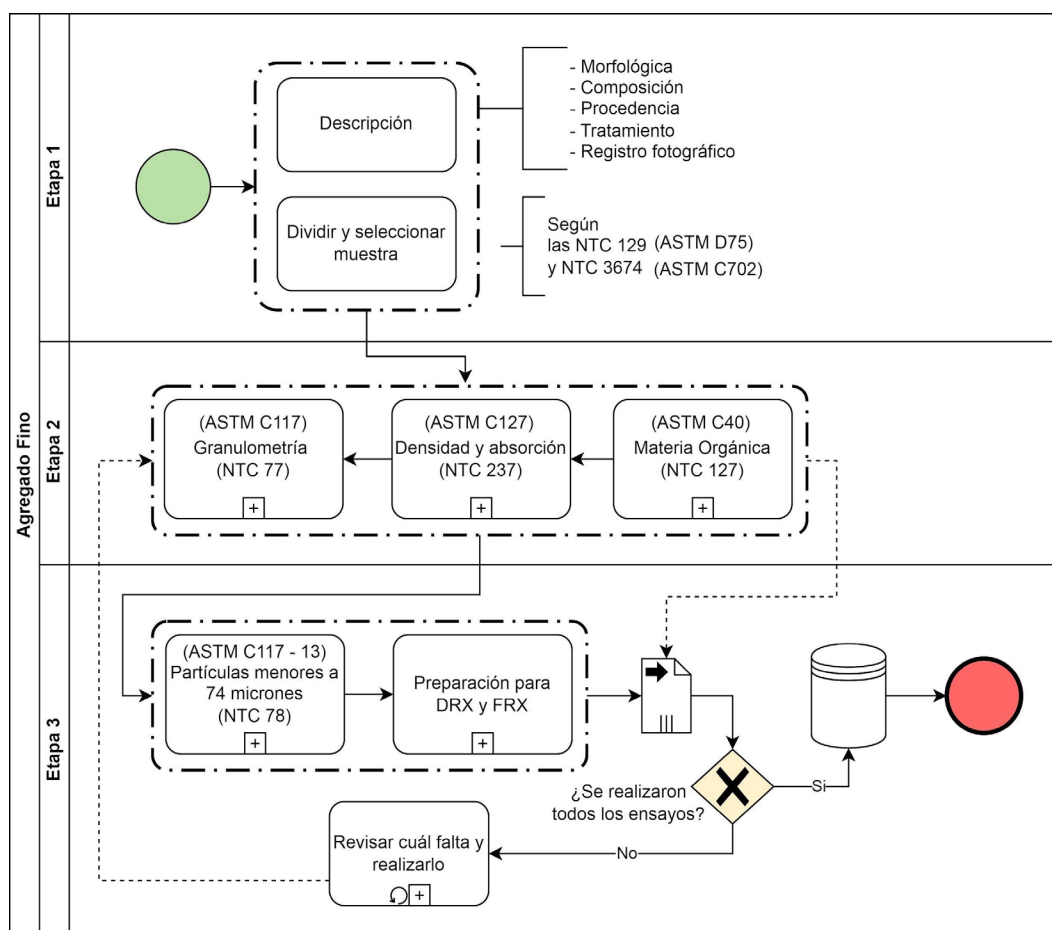


Figura 5. Proceso metodológico de caracterización AF. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 5. Indicadores de impacto ambiental cemento y agregados. Fuente: Adaptado de Industrial Conconcreto S.A.S. (2019) y Portland Cement Association (2014).

Indicador	Indicador Abreviatura	Unidad	Agregado Fino	Agregado grueso	Cemento
Potencial de Calentamiento Global (100 años)	IA1	kg CO ₂ -eq	3,34	2,70	892,00
Potencial de Eutrofización agua marina	IA2	kg N-eq	0,013	0,010	1,100
Potencial de Eutrofización agua dulce ion fosfato	IA3	kg PO ₄ ³⁻ - eq.	0,006	0,004	0,000
Potencial de Eutrofización agua dulce	IA4	kg P-eq.	0,00032	0,00025	0,00000
Potencial de eutrofización, excedencia acumulada	IA5	mol N-eq.	0,130	0,107	0,000
Energía Primaria No Renovable: Fósil	IA6	MJ	56,75	42,76	4660,00
Energía Primaria Renovable: Solar, Eólica, Hidro-eléctrica, Geotérmica	IA7	MJ	6,91	6,27	95,50
Energía embebida total	IA8	MJ	63,66	49,02	5243,40
Recursos Materiales No Renovables	IA9	kg	0	0	1240
Recursos Materiales Renovables	IA10	kg	0	0	3,42
Agua Dulce Neta	IA11	m ³	301,70	145,50	9240,00
Residuos No Peligrosos Generados	IA12	kg	111,30	51,50	10,50
Residuos Peligrosos Generados	IA13	kg	0,0012	0,0011	0,0511

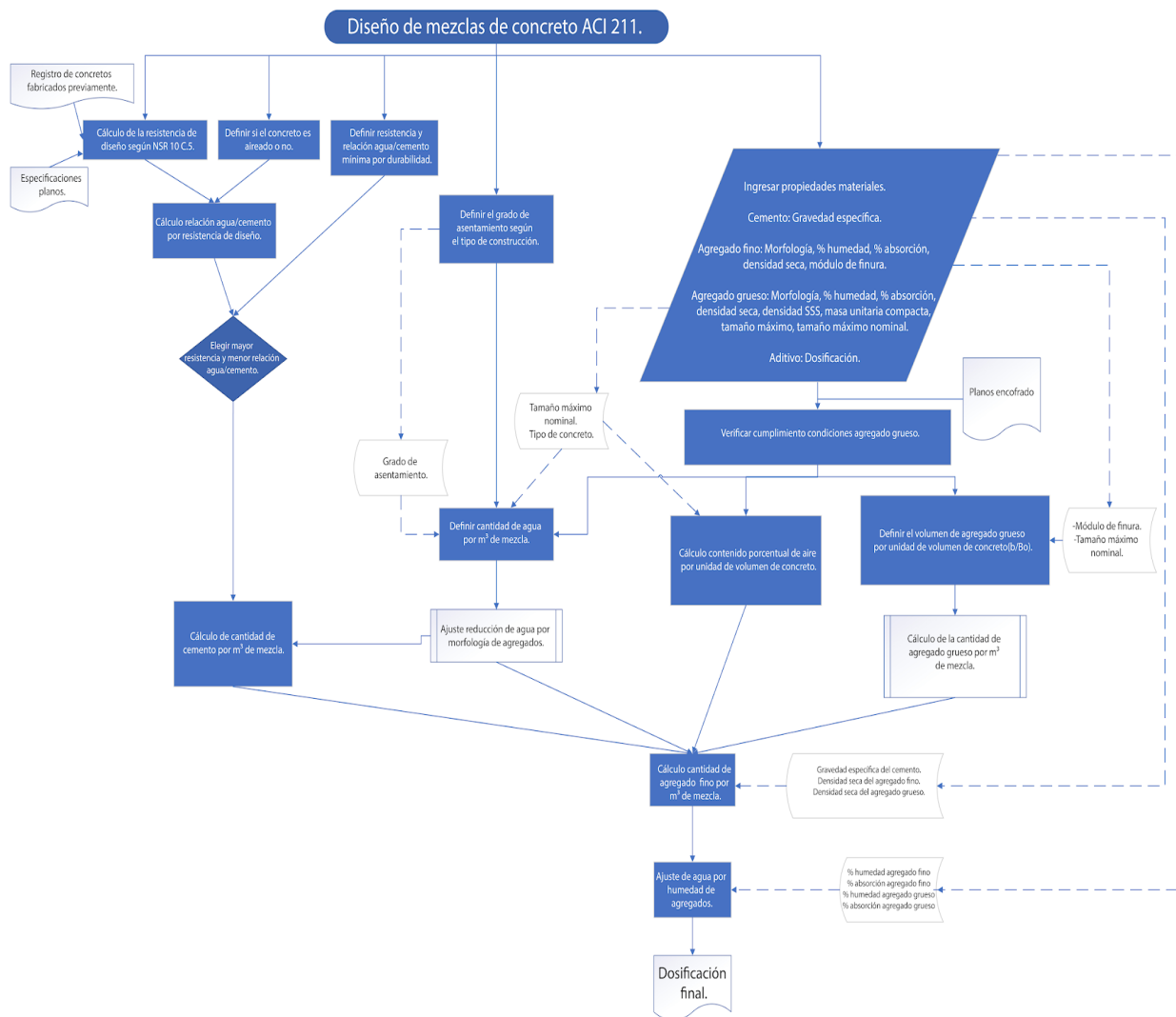


Figura 6. Esquema funcionamiento software DISMECON. Fuente: Elaboración de los autores.

CUANTIFICACIÓN AMBIENTAL Y OPTIMIZACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO.

Los datos obtenidos de la caracterización ambiental de los materiales se tabularon y se alojaron en el software de base DISMECON (Restrepo et al., 2020), una herramienta que puede ser usada de manera sencilla para realizar estimaciones o aproximaciones de las cantidades iniciales de materiales para el diseño de mezclas. El software, está basado en la metodología A.C.I 211 (American Concrete Institute) y permite calcular la dosificación de los materiales de acuerdo con las condiciones de desempeño (resistencia a la compresión, durabilidad, manejabilidad) que le sean exigidas al concreto, a partir de las propiedades físicas de los agregados como densidad, peso unitario, tamaño máximo nominal, módulo de finura, densidad y absorción, entre otros (Tabla 5 y Tabla 6), y datos de las mezclas como la consistencia deseada, la aplicación del concreto, condiciones de colocación y encofrado, las condiciones de exposición, la relación a/c o la resistencia. El funcionamiento del software puede verse en la figura 6.

La herramienta informática, se modifica en su programación para incluir los datos estructurados y procesar los indicadores de los inventarios ambientales conseguidos en la tabla 5. Con esta estructura se configura el marco propuesto por NTC-ISO 14044: a) Objetivo y alcance, b) Análisis del inventario de ciclo de vida, c) evaluación del impacto de ciclo de vida y d) interpretación.

Con relación a los escenarios de optimización, se diseña un plan de optimizaciones a partir de los agregados (AF/AG) para ello, se evaluaron 8 tipos de agregados finos (Tabla 6) y 4 tipos de agregados gruesos (Tabla 7). Para efectos de establecer una línea base en la simulación de los diseños de mezclas de concreto, se considera un concreto estructural de la menor resistencia posible de acuerdo con la norma sismo resistente del 2010 (NSR), y el menor asentamiento contemplado en la metodología de diseño de mezclas de concreto, parámetros que generan el escenario de menor demanda de cemento para este tipo de concretos y por consiguiente, las menores cargas ambientales. Los parámetros de diseño presentan la siguiente configuración:

Tabla 6. Relación tipos de optimización AF para la aplicación. Fuente: Elaboración de los autores.

Agregado Fino (AF)	Módulo de Finura [ASTM C117]	Densidad Aparente Seca (kg/m³) [ASTM C127]	Absorción (%) [ASTM C127]	Morfología
1F	3,00	2709	1,90	Triturado
2F	3,76	2620	0,87	Triturado
3F	2,70	2901	1,03	Triturado
4F	3,01	2602	2,40	Triturado
5F	3,00	2646	1,98	Triturado
6F	3,14	2550	1,21	Triturado
7F	4,00	2750	1,07	Triturado
8F	3,40	2786	0,99	Triturado

Tabla 7. Relación tipos de optimización AG para la aplicación. Fuente: Elaboración de los autores.

Agregado Grueso (AG)	Tamaño máximo (mm) [ASTM C117]	Tamaño máximo nominal (mm) [ASTM C117]	Densidad aparente seca (kg/m³) [ASTM C127]	Masa unitaria compacta (kg/m³) [ASTM C29]	Absorción (%) [ASTM C127]	Morfología
1G	50,0	37,5	2863	1499	0,24	Triturado
2G	37,5	25,0	2735	1635	1,50	Triturado
3G	25,0	19,0	2770	1610	0,86	Triturado
4G	25,0	19,0	2862	1707	0,92	Triturado

TIPO DE CONCRETO CONVENCIONAL

- Concreto no aireado.
- Resistencia de diseño 21 MPa.
- Tipo de construcción: Concreto en masa.
- Asentamiento: 50 mm.

No se incluye el análisis de los aditivos que modifican las propiedades en estado plástico, debido que el caso de estudio representa una mezcla de concreto con características mecánicas fácilmente logrables, adicionalmente los impactos reportados por la European Federation of Concrete Admixtures Associations Ltd (EFCA,2015) sólo incluyen las demandas de energía y no las cargas ambientales asociadas con los procesos químicos de los aditivos, limitando así el alcance.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CARACTERIZACIÓN AGREGADOS

Los resultados de la caracterización de los agregados provenientes de las canteras evaluadas en el Área

Metropolitana del Valle de Aburrá evidencian variación en las propiedades físicas con algunos datos atípicos que pueden estar asociados a cambios en los procesos de producción.

Para los agregados finos, se observa en la figura 7 que el valor medio del porcentaje de absorción es de 1,63 %, lo que es acorde con la metodología ACI 211, que establece un 2 % como la absorción máxima de los agregados; por otra parte, alrededor del 29 % de los datos presentan valores de absorción mayores al 2 %. Adicionalmente, los porcentajes de humedad varían entre 0 % -8 %, este rango de valores es aceptado para la elaboración de concretos. Los módulos de finura obtenidos entre 2,8 y 3,2 son valores ideales para arenas empleadas en la confección de concretos, sin embargo, se presenta el 50 % de los agregados con un Módulo de Finura (MF) entre 3,6 y 4,3, valores asociados con arenon, característicos de arenas muy gruesas que pueden inducir a mezclas de concreto muy ásperas y poco manejables. Finalmente, la Densidad Aparente Seca (DAS) presenta valores alrededor de 2100 kg/m³ y 2900 kg/m³.

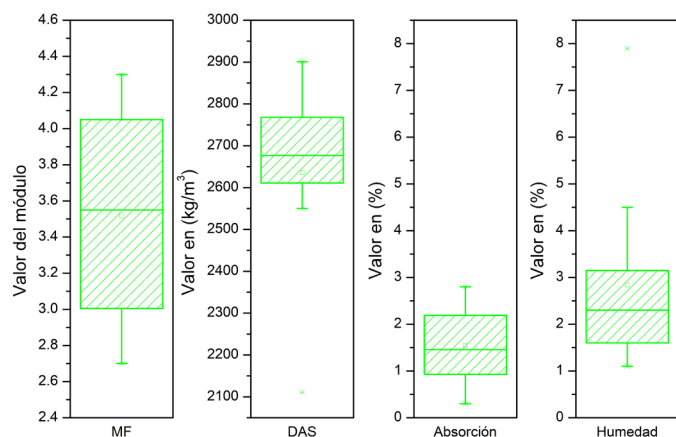


Figura 7. Caracterización propiedades Agregados Finos. Fuente: Elaboración de los autores.

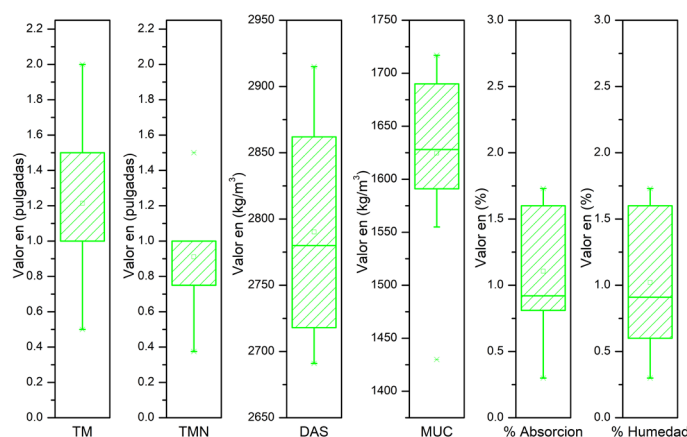


Figura 8. Caracterización propiedades Agregados Gruesos. Fuente: Elaboración de los autores.

Asimismo, se observa de la figura 8 que aproximadamente el 100 % de los agregados gruesos presentan porcentajes de absorción inferiores al 2 %, calificándolos como aptos para su utilización. El Tamaño Máximo (TM) y Tamaño Máximo Nominal (TMN) dan cuenta de la tendencia (75 %) a la producción de agregados gruesos con tamaños entre 1½" (38 mm) y 2" (50.8 mm) debido a la necesidad de cumplir, en los sistemas constructivos de concretos reforzados con acero, los requerimientos geométricos del encofrado y las distancias entre las barras de refuerzo. La Masa Unitaria Compacta (MUC), se ubicó entre 1425 kg/m³ y 1720 kg/m³ y el porcentaje de humedad entre 0 % y 1.8 %, éstos últimos en el rango de los valores aceptados para la elaboración de concretos. Al comparar la figura 7 y la figura 8, se observa para los agregados gruesos una mayor Densidad Aparente Seca (DAS) media (2790 kg/m³) respecto a los agregados finos (2628 kg/m³), lo que se asocia con la cantidad de vacíos entre las partículas de agregado fino, requiriendo en estos casos una mayor cantidad de pasta de mortero para lograr una adecuada trabajabilidad de la mezcla (Pérez et al., 2022).

DISEÑO DE MEZCLAS

El diseño del concreto, bajo las condiciones y materias primas especificadas, dio como resultado 32 posibles dosificaciones detalladas en la tabla 8. Se identificaron 3 tendencias en el consumo de cemento (266 kg, 290 kg, 316 kg), que se relacionan con el tamaño máximo del agregado grueso. Esto implica una reducción de hasta un 15,8 % en la demanda de cemento al comparar el valor máximo y mínimo, y un aumento en el consumo de agregados de hasta un 7,2 %. Además, se observa un aumento en el consumo de agua de hasta un 15,7 % al comparar el promedio de agua entre las mezclas con mayor y menor demanda de cemento. Al considerar el costo y el alto impacto ambiental del cemento, estos hallazgos sugieren la importancia de una toma de decisiones más informada por parte de los desarrolladores de proyectos de construcción, con el objetivo de optimizar tanto el costo como el impacto ambiental de las mezclas de concreto a producir.

Tabla 8. Dosificaciones de mezclas de concreto. Fuente: Elaboración de los autores.

Id Mezcla	Mezcla	Dosificación Concreto				Cantidades x 1 m³ de Concreto						
		Cemento (partes)	Agregado Fino (partes)	Agregado Grueso (partes)	Relación agua/cemento	Cemento (kg)	Agregado Fino (kg)	Agregado Grueso (kg)	Agregados Total (kg)	Promedio Agregados Total (kg)	Agua (L)	Promedio Agua (L)
1	3F1G	1	4,408	4,057	0,555	266	1172,6	1079,3	147,7	2165,1	157,1	152,8
2	8F1G	1	4,618	3,663	0,555	266	1228,3	974,4	147,5		145,7	
3	7F1G	1	4,883	3,325	0,56	266	1298,8	884,4	149		147,7	
4	1F1G	1	4,277	3,888	0,591	266	1137,6	1034,3	157,1		161,7	
5	5F1G	1	3,646	4,463	0,62	266	969,8	1187,2	164,9		164,9	
6	4F1G	1	4,113	3,883	0,608	266	1094	1032,8	161,7		148,6	
7	2F1G	1	4,528	3,46	0,548	266	1204,5	920,4	145,7		149	
8	6F1G	1	4,096	3,809	0,559	266	1089,5	1013,3	148,6		147,5	

Id Mezcla	Mezcla	Dosificación Concreto				Cantidades x 1 m³ de Concreto						
		Cemento (partes)	Agregado Fino (partes)	Agregado Grueso (partes)	Relación agua/cemento	Cemento (kg)	Agregado Fino (kg)	Agregado Grueso (kg)	Agregados Total (kg)	Promedio Agregados Total (kg)	Agua (L)	Promedio Agua (L)
9	3F2G	1	3,451	3,834	0,593	290	1000,7	1111,8	172	2040,0	179,6	174,6
10	8F2G	1	3,716	3,439	0,588	290	1077,6	997,4	170,6		168,4	
11	7F2G	1	4,008	3,101	0,589	290	1162,3	899,3	170,9		172	
12	1F2G	1	3,39	3,665	0,619	290	983	1062,8	179,6		183,6	
13	5F2G	1	3,311	3,665	0,621	290	960,2	1062,8	180		180	
14	4F2G	1	3,261	3,659	0,633	290	945,8	1061,1	183,6		172,1	
15	2F2G	1	3,689	3,24	0,581	290	1069,8	939,5	168,4		170,9	
16	6F2G	1	3,264	3,586	0,593	290	946,7	1039,9	172,1		170,6	
17	3F4G	1	3,253	3,403	0,565	316	1027,9	1075,4	178,5	2008,9	185,9	181,3
18	3F3G	1	3,341	3,21	0,562	316	1055,7	1014,3	177,6		175	
19	8F4G	1	3,492	3,025	0,562	316	1103,4	955,9	177,7		177,6	
20	1F4G	1	3,191	3,241	0,59	316	1008,3	1024,2	186,6		190,1	
21	7F4G	1	3,758	2,701	0,565	316	1187,6	853,5	178,6		186,2	
22	8F3G	1	3,567	2,872	0,56	316	1127,2	907,6	176,9		178,1	
23	5F4G	1	3,117	3,241	0,592	316	984,9	1024,2	186,9		177,9	
24	7F3G	1	3,824	2,547	0,563	316	1208,5	805	177,9		176,9	
25	1F3G	1	3,269	3,057	0,588	316	1033	966	185,9		186,6	
26	4F4G	1	3,07	3,236	0,603	316	970	1022,5	190,7		175,8	
27	2F4G	1	3,462	2,831	0,556	316	1093,9	894,5	175,8		178,5	
28	5F3G	1	3,193	3,057	0,589	316	1009	966	186,2		190,7	
29	6F4G	1	3,071	3,166	0,566	316	970,4	1000,3	178,9		186,9	
30	4F3G	1	3,145	3,052	0,602	316	993,7	964,4	190,1		178,9	
31	2F3G	1	3,528	2,67	0,554	316	1114,8	843,6	175		178,6	
32	6F3G	1	3,143	2,986	0,564	316	993,1	943,5	178,1		177,7	

La figura 9. ilustra el comportamiento de los consumos de materiales de las distintas dosificaciones para un concreto de 21 MPa, de la tabla 8. Se evidencia una reducción en la demanda del agua promedio de hasta un 15,7 %, al disminuir el consumo de cemento de éstas. Adicionalmente, las mezclas con una misma cantidad de consumo de cemento pueden llegar a optimizarse al reducir el consumo promedio de agregados en hasta un 6,6 %. Evidenciándose de esta manera que, la correcta elección y combinación de los materiales para elaborar mezclas de concreto puede generar economías y sus respectivos beneficios sin requerir mayores esfuerzos.

CUANTIFICACIÓN ECONÓMICA

El costo por metro cúbico de cada proporción de mezcla de concreto de 21 MPa se calculó utilizando los valores unitarios expresados en USD/kg de las materias primas usadas en cada mezcla. Los valores

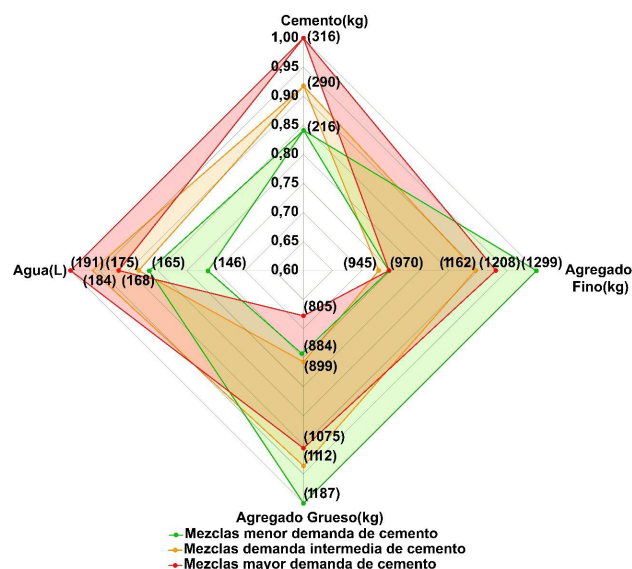


Figura 9. Relación consumo de materiales de diferentes mezclas para un mismo objetivo de resistencia 21 MPa. Fuente: Elaboración de los autores.

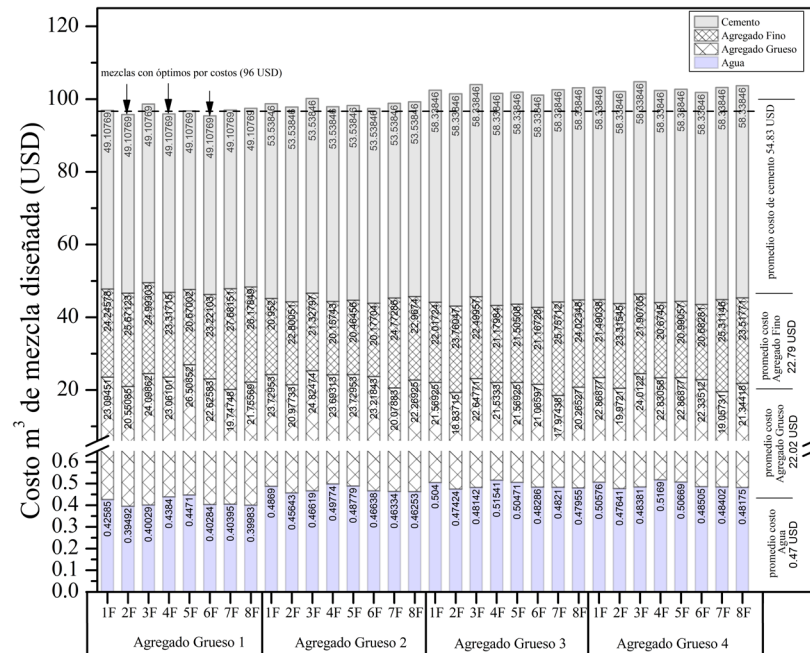


Figura 10. Costo mezclas de concreto. Fuente: Elaboración de los autores.

comerciales, a marzo del año 2024, de los insumos primarios en Colombia se convirtieron mediante un factor de equivalencia de 3900 pesos colombianos por dólar americano. Al analizar la eficiencia económica de las distintas mezclas de concreto propuestas, como se observa en la Figura 10, el costo de la materia prima para 1 m³ de concreto varía entre 95,36 USD y 104,74 USD, lo que representa una optimización económica de hasta un 9 %. Se evidencia que esta reducción está directamente asociada a la disminución en la demanda de cemento, que constituye el componente más costoso. Además, se observa que la mezcla 6F1G, que tiene el menor costo, logra un equilibrio en los costos de los agregados y presenta el menor consumo entre las mezclas que comparten el mismo índice de consumo de cemento.

CUANTIFICACIÓN AMBIENTAL

La mezcla de menor costo de producción (6F1G) exhibe, en su mayoría, menores impactos ambientales en términos de emisiones de CO₂-eq, O₃-eq, energía embebida y consumo de agua dulce. Lo anterior se evidencia en la figura 11, construida a partir de la evaluación de los impactos ambientales de las 32 mezclas diseñadas y utilizando el inventario ambiental de los materiales (cemento y agregados). En contraste, dado al incremento en la demanda de agregados en esta mezcla y al proceso de producción de éstos, el análisis demuestra mayores niveles de contaminación del agua en lagos, balsas, ríos y embalses, registrándose impactos más significativos en términos de eutrofización y generación de residuos no peligrosos.

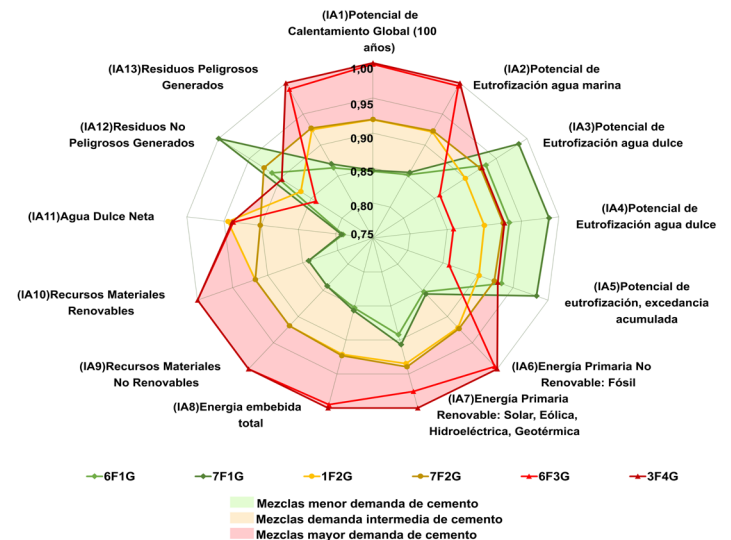


Figura 11. Relación impactos ambientales mezclas de concreto. Fuente: Elaboración de los autores.

En la figura 12, se presenta la cuantificación de los impactos ambientales asociados a la producción de 1 m³ de concreto de acuerdo con las especificaciones del tipo de concreto convencional planteadas (21 MPa). Se resaltan las emisiones de CO₂-eq, que oscilan entre 243,7 kg y 288,2 kg, la energía total embebida, variando de 1513,8 MJ a 1775,1 MJ, y el consumo de agua dulce, que se sitúa entre 156,8 L y 200 L. Estos valores sugieren la posibilidad de lograr reducciones del 15,4 % en las emisiones de CO₂, del 14,7 % en la energía embebida y del 21,5 % en el consumo de agua dulce.

Mezcla	IA 1	IA 2	IA 3	IA 4	IA 5	IA 6	IA 7	IA 8	IA 9	IA 10	IA 11	IA 12	IA 13		
	kg CO2-eq	Promedio kg CO2-eq	kg N-eq	kg PO43-eq.	kg P eq.	mol N eq.	MJ	MJ	MJ	Promedio MJ	kg	kg	L	kg	kg
1F1G	243,9	243,9	0,320	0,0109	0,0006	0,3	1348,3	39,7	1517,9	1517,7	329,8	0,9	166,8	182,7	0,016
2F1G	243,8		0,320	0,0108	0,0006	0,3	1347,3	39,5	1516,5		329,8	0,9	155,4	184,2	0,016
3F1G	244,1		0,321	0,0113	0,0006	0,3	1352,3	40,3	1522,3		329,8	0,9	157,4	188,9	0,016
4F1G	243,7		0,319	0,0107	0,0006	0,3	1345,8	39,4	1515,0		329,8	0,9	171,4	177,7	0,016
5F1G	243,7		0,319	0,0107	0,0006	0,3	1345,4	39,5	1514,7		329,8	0,9	174,6	171,9	0,016
6F1G	243,7		0,319	0,0106	0,0006	0,3	1344,7	39,3	1513,8		329,8	0,9	158,3	176,2	0,016
7F1G	244,0		0,321	0,0112	0,0006	0,3	1351,1	39,9	1520,8		329,8	0,9	158,7	192,9	0,016
8F1G	244,0		0,321	0,0112	0,0006	0,3	1350,9	40,0	1520,7		329,8	0,9	157,2	189,7	0,016
1F2G	264,8	264,8	0,345	0,0102	0,0006	0,2	1452,6	41,1	1635,3	1635,5	359,6	1,0	189,3	167,2	0,017
2F2G	264,8		0,345	0,0101	0,0006	0,2	1452,3	41,0	1634,7		359,6	1,0	178,1	170,5	0,017
3F2G	265,0		0,346	0,0105	0,0006	0,2	1455,7	41,6	1638,8		359,6	1,0	181,7	171,7	0,017
4F2G	264,7		0,345	0,0100	0,0006	0,2	1450,4	40,9	1632,8		359,6	1,0	193,3	163,0	0,017
5F2G	264,8		0,345	0,0101	0,0006	0,2	1451,3	41,0	1633,8		359,6	1,0	189,6	164,6	0,017
6F2G	264,7		0,344	0,0099	0,0006	0,2	1449,6	40,8	1631,8		359,6	1,0	181,7	162,0	0,017
7F2G	265,0		0,346	0,0105	0,0006	0,2	1455,8	41,4	1638,7		359,6	1,0	180,6	178,7	0,017
8F2G	265,0		0,346	0,0104	0,0006	0,2	1455,2	41,4	1638,1		359,6	1,0	180,3	174,3	0,017
1F3G	287,9	288,0	0,374	0,0100	0,0006	0,2	1572,5	43,4	1770,0	1770,8	391,8	1,1	195,6	168,0	0,019
2F3G	287,9		0,373	0,0100	0,0006	0,2	1571,9	43,2	1769,2		391,8	1,1	184,6	170,8	0,018
3F3G	288,1		0,374	0,0104	0,0006	0,2	1575,8	43,8	1773,8		391,8	1,1	187,3	173,0	0,019
4F3G	287,8		0,373	0,0098	0,0006	0,2	1570,2	43,1	1767,5		391,8	1,1	199,8	163,6	0,018
5F3G	287,9		0,373	0,0099	0,0006	0,2	1571,1	43,2	1768,5		391,8	1,1	195,9	165,4	0,018
6F3G	287,7		0,373	0,0097	0,0006	0,2	1569,3	43,0	1766,4		391,8	1,1	187,8	162,4	0,018
7F3G	288,1		0,374	0,0103	0,0006	0,2	1575,6	43,6	1773,3		391,8	1,1	187,5	179,3	0,019
8F3G	288,1		0,374	0,0103	0,0006	0,2	1575,3	43,7	1773,2		391,8	1,1	186,6	175,5	0,019
1F4G	288,0	288,0	0,374	0,0102	0,0006	0,2	1573,6	43,6	1771,3	1770,8	391,8	1,1	196,3	168,3	0,019
2F4G	287,9		0,374	0,0101	0,0006	0,2	1572,9	43,3	1770,4		391,8	1,1	185,4	171,1	0,019
3F4G	288,2		0,375	0,0105	0,0006	0,2	1576,9	44,0	1775,1		391,8	1,1	188,2	173,1	0,019
4F4G	287,9		0,373	0,0099	0,0006	0,2	1571,3	43,3	1768,8		391,8	1,1	200,4	163,9	0,018
5F4G	287,9		0,374	0,0100	0,0006	0,2	1572,2	43,4	1769,8		391,8	1,1	196,6	165,7	0,019
6F4G	287,8		0,373	0,0098	0,0006	0,2	1570,4	43,2	1767,7		391,8	1,1	188,6	162,8	0,018
7F4G	288,1		0,374	0,0104	0,0006	0,2	1576,4	43,7	1774,4		391,8	1,1	188,2	179,4	0,019
8F4G	288,1		0,374	0,0104	0,0006	0,2	1576,0	43,8	1774,0		391,8	1,1	187,4	175,4	0,019
Escala impactos: Menor				Intermedio				Mayor							

Escala impactos: Menor Intermedio Mayor

Figura 12. Cuantificación de impactos ambientales en mezclas de concreto. Fuente: Elaboración de los autores.

Asimismo, en la Figura 13 se puede observar la relación entre la disminución del costo de producción en la mezcla de concreto con la disminución en las emisiones de CO₂, energía embebida y agua dulce. Adicionalmente, los valores de ecoindicadores se determinaron en función del costo de producción respecto de las categorías de impacto Potencial de Calentamiento Global y Energía Total Embebida, como se evidencia en la Figura 14, donde el mejor desempeño en las mezclas, son precisamente las más económicas y las que requieren menos cemento Portland para lograr la misma resistencia mecánica. Esto demuestra, no sólo por factores ambientales, sino también por factores económicos, el beneficio que tiene este tipo de iniciativas a la hora de elegir los agregados para la elaboración del concreto en las obras. Si bien, el trabajo desarrollado establece una metodología que muestra una cuantificación

de impactos ambientales para aplicar a mezclas de concreto diseñadas para 21 MPa, es posible utilizarla en distintas resistencias y especificaciones, permitiendo establecer indicadores de impacto ambiental más coherentes con la realidad local y cuyo potencial uso puede escalarse a otras latitudes que dispongan de la declaración ambiental de producto (DAP) de materiales y usen la metodología A.C.I para el diseño de mezclas de concreto.

Teniendo en cuenta que sólo en el año 2023 se produjeron alrededor de 89376 m³ de concreto premezclado en el Área Metropolitana del Valle de Aburra (DANE, 2023), si esta cantidad de concreto se optimiza utilizando la metodología empleada, comparando el caso más desfavorable con el más favorable, se podría lograr un ahorro estimado de alrededor de \$838346,88 dólares americanos. Además, se podrían evitar emisiones de

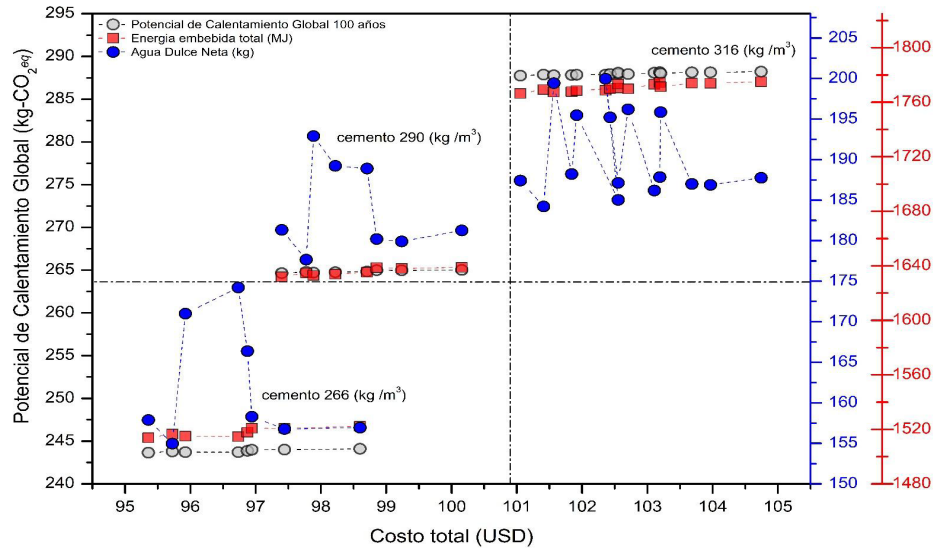


Figura 13. Relación costo-impacto ambiental en mezclas de concreto de 21 MPa. Fuente: Elaboración de los autores.

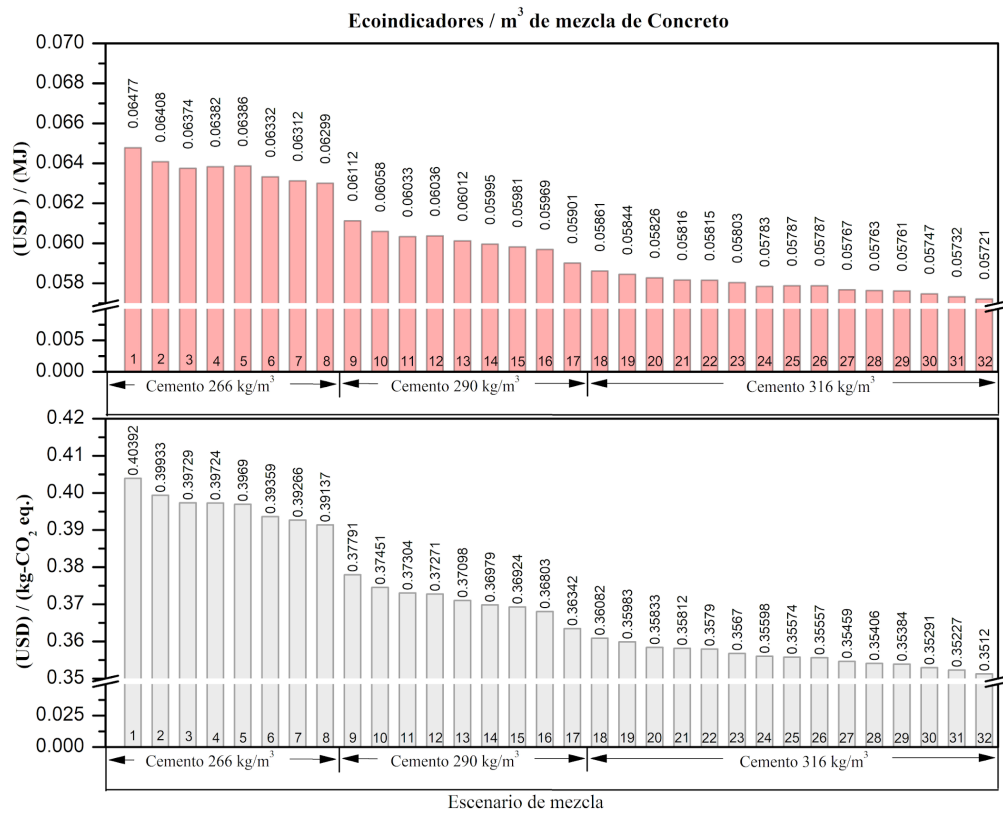


Figura 14. Gráfico ecoeficiencia mezclas de concreto de 21 MPa. Fuente: Elaboración de los autores.

aproximadamente 3977 toneladas de CO₂, ahorrar 23354 GJ de energía y conservar 4022 toneladas de agua dulce. Este enfoque no sólo beneficiaría al sector de la construcción, sino que proporcionaría una ruta alternativa para la mitigación de los impactos ambientales asociados con esta industria.

DISCUSIÓN

La presente investigación, pone de manifiesto la posibilidad de cuantificar y optimizar económica y ambientalmente algunos procesos de producción en la industria de la construcción. Para lograrlo, se requiere la integración de todos los actores involucrados en ella. Esto incluye a los productores de materia prima, su nivel de formalización y la adopción de buenas prácticas, como las declaraciones ambientales de sus productos (DAP). También el gremio transportista y las características de su parque automotor. Asimismo, los diseñadores, tanto arquitectónicos como estructurales, con las implicaciones técnicas de los requerimientos geométricos del encofrado y las distancias entre las barras de refuerzo, estipulan el tamaño máximo del agregado grueso a emplear en la mezcla de concreto. Este parámetro, toma relevancia ya que, determina la cantidad de cemento requerida y su impacto ambiental correspondiente. Además, se deben presentar aspectos de sostenibilidad en los comités de obra, que permita a los gerentes de obra desempeñar un papel crucial en la correcta planificación y selección de proveedores de materia prima, teniendo en cuenta estudios como los propuestos en el presente trabajo, mientras que los constructores tienen la responsabilidad de materializar lo planificado y programado.

De esta manera, bajo el contexto de la metodología A.C.I en el diseño de mezcla de concreto, pudo integrarse el ACV para desarrollar una herramienta que permita optimizar la selección de materiales, sin embargo, existen normativas y metodologías de diseño de mezclas de concreto de otros continentes que pueden acoplarse e implementar iniciativas de este tipo. El proceso de optimización implementado permitió identificar las mejores condiciones económicas y ambientales para el diseño de una mezcla para un concreto de 21 MPa, definiendo la selección de agregados finos y gruesos procedentes de cantera. Si bien, se encuentra la mejor ruta, esto limita la implementación futura a una o dos fuentes de cantera, lo que obliga a las demás canteras a mejorar el proceso productivo implementando tecnologías innovadoras que conlleven a definir las DAP y disminuir los impactos ambientales desde la cuna. Adicionalmente de acuerdo con el A.C.I para una resistencia específica del concreto, las mezclas que presentan mayor TM del agregado grueso

requieren menor dosificación de cemento. Este es un factor para tener en cuenta en los sistemas de producción de concreto, ya que la literatura técnica evidencia que el cemento es el indicador que más eleva costos y genera impactos ambientales. Así los constructores están llamados a analizar cada uno de los componentes técnicos, económicos y ambientales en función del proyecto a ejecutar.

Tanto la energía embebida como el calentamiento global muestran respuestas similares en cada una de las tres familias de mezclas debido a la demanda de cemento. En muchos casos, se observa una relación inversa entre el agua y los indicadores de calentamiento global y energía embebida, este patrón está asociado a la alta dependencia de las características intrínsecas de los agregados, como su morfología y su grado de absorción. Además, los resultados demuestran la mayor eutrofización y generación de residuos peligrosos provenientes de los agregados para las mezclas más óptimas, esto puede estar asociado a la puesta a punto de los agregados, ya que principalmente el lavado del material elimina partículas de tamaño inferior a 75 µm como limos y arcillas. Este proceso, es requerido en los agregados como un parámetro de control de calidad y en la mayoría de los casos este material particulado es llevado a los afluentes en forma de lodo. Lo anterior puede ser un foco de investigación para recuperar lodos y desarrollar procesos de aprovechamiento.

Aunque la hipótesis ambiental planteada permitió el desarrollo de la herramienta de optimización, los campos asociados al DAP de todos los materiales debe ser validado, lo que evidencia un esfuerzo amplio por parte de las empresas privadas y el sector público con la responsabilidad civil, social y natural que implica la explotación de minería para los materiales de construcción.

De acuerdo con la tabla 9, los resultados obtenidos en esta investigación son acordes con los resultados alcanzados con otras herramientas desarrolladas para la cuantificación del impacto ambiental de mezclas de concreto. Al comparar los resultados de energía embebida obtenidos en este estudio con los resultados de la simulación en la herramienta *"Green Concrete LCA web tool"* (Berkeley, s.f.), se evidencia una diferencia inferior al 0.85% para todas las mezclas evaluadas. Estos resultados son muy similares, debido a que las DAP del cemento reportadas por los productores en Colombia, son equivalentes a las DAP de la PCA (Portland Cement Association, 2014). Sin embargo, en la comparación de las emisiones de CO₂ se evidencia una diferencia aproximada del 13%. Si bien, esta diferencia entre los resultados de ambas herramientas puede catalogarse como pequeña,

Tipo de mezcla (kg cemento portland / m ³ de mezcla de concreto)	Herramienta de cálculo			
	Desarrollada por Autores - Fase 2 (Figura 3)		Green Concrete LCA web Tool *	
	GWP: Promedio (kg CO ₂ -eq)	NRE: Promedio (MJ)	GWP: Promedio (kg CO ₂ -eq)	NRE: Promedio (MJ)
266	243,90	1517,70	280,74	1512,53
290	264,80	1635,50	304,79	1629,23
316	288,00	1770,80	330,97	1755,45

* Simulación mayo 26 de 2024, sin transporte y haciendo uso de cemento Portland tipo I.

Tabla 9. Comparativo cuantificación impacto ambiental otras herramientas. Fuente: Elaboración de los autores.

es resultado de una carga ambiental sitio-específica que puede depender de los procesos de extracción y producción de agregados en la región de estudio.

Para determinar modelos de sistemas con miradas más holísticas, es necesario incorporar tres aspectos: i) Uso de equipos y la tecnología asociada al diseño de mezclas de concreto en obra, ya que los consumos de energía y la obsolescencia tecnológica pueden ir en detrimento de la optimización de las mezclas. ii) Uso de aditivos para modificar propiedades reológicas de las mezclas y disminuir consumos de cemento y uso de adiciones activas que mejoran el desempeño del cemento. iii) Transporte asociado a los materiales desde la fuente hasta la obra, lo cual podría modificar en gran medida los valores obtenidos del costo e impactos por mezcla evaluada. Esto debido a la tendencia de un parque automotor antiguo con prevalencia del uso de diésel, que resulta menos eficiente, generando mayores emisiones de CO₂. Además se deben analizar variables como las cargas transportadas y la relación entre la densidad y el esfuerzo por kilómetro transportado. Finalmente, es necesario implementar el análisis propuesto en mezclas de concreto con requerimientos de resistencia y durabilidad mayores. De esta manera, es posible evaluar el gran potencial y cuantificar los posibles beneficios económicos y ambientales que se pueden obtener al llevar a cabo este tipo de análisis mediante la programación de herramientas informáticas que permiten la creación de inventarios e interacción de gran flujo de datos.

CONCLUSIONES

La implementación e integración de herramientas que empleen datos parametrizados permiten

identificar un gran potencial de innovación en los distintos programas de dosificación de mezclas de concreto como el software DISMECON la sinergia entre estos conocimientos permite establecer un nuevo programa para cuantificar las emisiones de CO₂ y otras categorías de impacto ambiental.

A partir del diseño de mezclas y la consideración de los datos de ubicación de las fuentes de origen de los agregados, junto con las correlaciones de optimización según sus características, permiten proyectar no sólo los potenciales impactos en cada una de las categorías de los DAP utilizados, sino también realizar estimaciones en cuanto al costo de la producción del concreto. Estas estimaciones se basan en las distintas combinaciones de estos materiales, lo que hace que el proceso sea muy atractivo para la eficiencia económica en la producción de mezclas de concreto. Además, promueve la toma adecuada de decisiones sobre las necesidades de resistencia y consumo de cemento.

El modelado permitió identificar procesos de optimización en el uso de agregados para la fabricación de mezclas de concreto y establecer los efectos de las cargas ambientales al usar agregados con diferentes tamaños. Se encuentran mayores impactos de emisiones de CO₂ y demanda de energía embebida asociados a los consumos incrementales de cemento en las mezclas, éste a su vez, es más demandado en los diseños de mezclas que utilizan agregado grueso de menor tamaño máximo, lo que implica mayores costos y emisiones de CO₂ hasta un 15% mayores que si utilizan agregados gruesos inmediatamente de mayor tamaño máximo.

Las mezclas de concreto con menor impacto ambiental son a su vez las más económicas, dado que se realiza un análisis de propiedades (caracterizaciones) de los agregados y en función de

éstos una mejor proporcionalidad de cemento, lo que demuestra que la sostenibilidad y la eficiencia económica son compatibles y tienen un alto valor agregado para el sector de la construcción.

Se espera que el desarrollo presentado en esta investigación contribuya a promover estrategias para la mitigación de los gases de efecto invernadero (GEI) en el sector de la construcción. Además de, evidenciar la necesidad de adoptar metodologías de trabajo colaborativo entre todos los actores del sector de la construcción, resaltando su potencial y los beneficios que pueden generar.

La investigación evidencia que, es posible disminuir los impactos ambientales a partir de que los Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se basen en evaluaciones a nivel de la utilización y optimización adecuada de los materiales, como los concretos, de manera que sean escalables y comparables, en lugar de depender exclusivamente de la implementación de tecnologías y materiales innovadores en el futuro; contribuyendo de manera efectiva en la reducción de emisiones y al avance hacia un entorno construido más sostenible, más acorde con las conclusiones de Olsson et al.(2024) sobre la necesidad de fortalecer los procesos, para incluir posteriormente materiales innovadores de bajas emisiones.

TRABAJOS FUTUROS

En los trabajos futuros, se deberá incluir el transporte para tener en cuenta las cargas ambientales sitio-específicas, dado que, en el presente trabajo no se exploraron distintas opciones de transporte ni se determinó cuánto representa su impacto en el ciclo de vida respecto al total de los impactos. Además, será fundamental incorporar residuos de construcción y demolición en los procesos, adoptando una perspectiva de ingeniería circular para maximizar la reutilización de materiales y minimizar los residuos. Se deberán desarrollar ecoindicadores específicos para el sector de la construcción que sean complementarios y faciliten procesos de normalización, permitiendo la comparación e implementación de éstos en otras latitudes. La herramienta tendrá que llevarse a nivel de producción, integrando estos trabajos futuros para ofrecer una solución más completa y sostenible en la industria de la construcción.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Facultad de Arquitectura y el Laboratorio de Construcción de la

Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín bajo los proyectos de investigación HERMES 57148 y 56944. También agradecemos a las empresas productoras de agregados que se hicieron parte del proyecto, al equipo de trabajo del grupo de investigación en Innovación y Gestión de la Construcción (IGC) y al Semillero Investigación en Gestión de la Construcción (SIGCON).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agusti-Panareda, A., Diamantakis, M., Massart, S., Chevallier, F., Muñoz Sabater, J., Barré, J., Curcoll, R., Engelen, R., Langerock, B., Law, R., Loh, Z., Morgu, J., Parrington, M., Peuch, V.-H., Ramonet, M., Roehl, C., Vermeulen, A., Warneke, T., y Wunch, D. (2019). Modelling CO2 weather – why horizontal resolution matters. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(11), 7347-7376. <https://doi.org/10.5194/acp-19-7347-2019>

Ajayi, B. L., y Babafemi, A. J. (2024). Effects of Waste Plastic and Glass Aggregates on the Strength Properties of Ambient-Cured One-Part Metakaolin-Based Geopolymer Concrete. *Applied Sciences*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/app14051856>

Alcaldía de Medellín. (2020). PLAN DE ACCIÓN CLIMÁTICA MEDELLÍN 2020-2050. <https://www.medellin.gov.co/es/secretaria-medio-ambiente/cambio-climatico/#:~:text=El%20Plan%20de%20Acci%C3%B3n%20Clim%C3%A1tica,aporte%20al%20logro%20de%20la>

Alcaldía de Medellín. (2021). Plan de Acción Climática (PAC) 2020-2050. <https://www.medellin.gov.co/es/secretaria-medio-ambiente/cambio-climatico/#:~:text=El%20Plan%20de%20Acci%C3%B3n%20Clim%C3%A1tica,aporte%20al%20logro%20de%20la>

AMVA. (2015). Política Pública de Construcción Sostenible 1. Línea Base. https://www.metropol.gov.co/ambiental/Documents/Construccion_sostenible/PPCSILineaBase27112015.pdf

AMVA. (2017). Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (PIGECA 2017-2030). <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Gestion-integral/PIGECA.aspx>

Asoareas. (2021). Mapa general localización Área Metropolitana del Valle de Aburrá. <https://Asoareas.Com.Co/Alianzas-Estrategicas/Area-Metropolitana-Del-Valle-de-Aburra/>

Azari, R. (2019). Life Cycle Energy Consumption of Buildings; Embodied + Operational. *Sustainable Construction Technologies: Life-Cycle Assessment*, 123-144. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811749-1.00004-3>

Belaïd, F. (2022a). How does concrete and cement industry transformation contribute to mitigating climate change challenges? *Resources, Conservation y Recycling Advances*, 15, 200084. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200084>

Belaïd, F. (2022b). Implications of poorly designed climate policy on energy poverty: Global reflections on the current surge in energy prices. *Energy Research & Social Science*, 92, 102790. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102790>

Berkeley. (s.f.). Green Concrete LCA Web Tool. <https://greenconcrete.berkeley.edu/>

Boccia, F., y Sarnacchiaro, P. (2018). The Impact of Corporate Social Responsibility on Consumer Preference: A Structural Equation Analysis. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 25(2), 151–163. <https://doi.org/10.1002/csr.1446>

Bohvalovs, G., Kalnbalkīte, A., Vanaga, R., Kirsanovs, V., Lauka, D., Pakere, I., Prodanuks, T., Laktuka, K., Dolge, K., Zundāns, Z., Brēmane, I., Blumberga, D., y Blumberga, A. (2023). Increasing Sustainability in Vocational Education System: Latvia Case Study. *CONNECT. International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies*, 0, 32. <https://doi.org/10.7250/CONNECT.2023.014>

Bush, E., Flato, C., Gillett, J., Greenan, N., James, B. J. W., y Kirchmeier-Young. (2022). Canada's Changing Climate Report in Light of the Latest Global Science Assessment. <https://www.nrcan.gc.ca/environment/impacts->

Construction Leadership Council (CLC). (2016). Guidance Document for PAS 2080.

Chertow, M. R. (2004). Industrial Symbiosis. *Encyclopedia of Energy*, 407–415. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00557-X>

Crowther, D., y Seifi, S. (2022). The Equal Pillars of Sustainability. Emerald Publishing Limited. <https://books.google.com.co/books?id=G8C3zgEACAAJ>

Damiani, M., Ferrara, M., y Ardente, F. (2022). Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods. <https://doi.org/10.2760/11564>

DANE. (2023). Boletín técnico.

Das, A., Kumar, S., Sharma, P., y Sharma, N. (2023). Environmental Effects of Cement Production: A Review. In A. K. Shukla, B. P. Sharma, A. Arabkoohsar, y P. Kumar (Eds.), *Recent Advances in Mechanical Engineering* (pp. 597–608). Springer Nature Singapore.

De Andrade Salgado, F., y De Andrade Silva, F. (2022). Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 52, 104452. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104452>

Del Rey Castillo, E., Almesfer, N., Saggi, O., y Ingham, J. (2020). Light-weight concrete with artificial aggregate manufactured from plastic waste. *Construction and Building Materials*, 265, 120199. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120199>

Duque, J. A. (2020). Medición del impacto ambiental de bloques de suelo-cemento, bloques cerámicos y bloques de concreto por el método de análisis de ciclo de vida. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79160>

EFCA. (2015). Environmental Product Declaration: Concrete Admixtures—Plasticizers and Superplasticizers (Berlin,

Germany: European Federation of Concrete Admixtures Association Ltd)

European Commission. (2021). *Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods*. https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods_en

Europaäische Kommission Statistisches Amt. (2018). Economy-wide material flow accounts handbook. 2018 edition, Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2785/158567>

Ghadir, P., Zamanian, M., Mahbubi Motlagh, N., Saberian, M., Li, J., y Ranjbar, N. (2021). Shear strength and LCA of volcanic ash-based geopolymer and cement stabilized soil: a comparative study. *Transportation Geotechnics*, 31, 100639. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100639>

Goyal, H., Kumar, R., y Mondal, P. (2023). Life cycle analysis of paver block production using waste plastics: Comparative assessment with concrete paver blocks. *Journal of Cleaner Production*, 402, 136857. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136857>

Gursel, A., Masanet, E., Horvath, A., y Stadel, A. (2014). Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005>

Hafez, H., Kurda, R., Cheung, W., y Nagaratnam, B. (2019). A Systematic Review of the Discrepancies in Life Cycle Assessments of Green Concrete. *Applied Sciences*, 9(22), 4803. <https://doi.org/10.3390/app9224803>

Henderson, A.D., Niblick, B., Golden, H.E. y Bare, J.C. (2021). Modeling spatially resolved characterization factors for eutrophication potential in life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 1832–1846. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01956-4>

ICONTEC. (2021). NTC-ISO 14044:2021. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y Directrices. Requisitos Del Ciclo de Vida.

Industrial Conconcreto S.A.S. (2019). Declaración Ambiental de Producto ARENA, TRITURADO 1" Y 3/8".

Jamil, S., Shi, J., y Idrees, M. (2023). Effect of various parameters on carbonation treatment of recycled concrete aggregate using the design of experiment method. *Construction and Building Materials*, 382, 131339. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131339>

Jayasuriya, J., Basavaraj, A. S., Singh, S., y Gettu, R. (2023). Sustainability Assessment of Concrete Pavements with Recycled Concrete Aggregate. In J. I. Escalante-Garcia, P. Castro Borges, y A. Duran-Herrera (Eds.), *Proceedings of the 75th RILEM Annual Week 2021* (pp. 363–371). Springer International Publishing.

Kim, A., Cunningham, P., Kamau-Devers, K., y Miller, S. (2022). OpenConcrete: a tool for estimating the environmental impacts from concrete production. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 2(4). <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac8a6d>

Kneifel, J., Lavappa, P., Polidoro, B., y Greig, A. L. (2019). Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES) Online 2.1 technical manual. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2032r>.

Koskela, L., Ferrantelli, A., Niiranen, J., Pikas, E., y Dave, B. (2019). Epistemological Explanation of Lean Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001597](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001597)

Liu, B., Martre, P., Ewert, F., Webber, H., Waha, K., Thorburn, P., Ruane, A., Aggarwal, P. K., Ahmed, M., Balkovič, J., Basso, B., Biernath, C., Bindi, M., Cammarano, D., Cao, W., Challinor, A., De Sanctis, G., Dumont, B., Espadafor, M., y Pakistan, R. (2023). AgMIP-Wheat multi-model simulations on climate change impact and adaptation for global wheat. *Open Data Journal for Agricultural Research*, 9, 10-25. <https://doi.org/10.18174/odjar.v9i0.18092>

Liu, Z., Niu, Y., Guo, C., y Jia, S. (2023). A Vehicle Routing Optimization Model for Community Group Buying Considering Carbon Emissions and Total Distribution Costs. *Energies*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/en16020931>

Martinsone, B., Di Sano, S., D'Elia, P., y Salle-Finley, T. (2023). A Conceptual Framework for Sustainable Promotion of a Positive School Climate: Context, Challenges, and Solutions. *Journal of Teacher Education for Sustainability*, 25, 64-85. <https://doi.org/10.2478/jtes-2023-0005>

Mocová, K. A., Sackey, L. N. A., y Renkerová, P. (2019). Environmental Impact of Concrete and Concrete-Based Construction Waste Leachates. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 290(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012023>

Oladazimi, A., Mansour, S., y Hosseinijou, seyed abbas. (2020). Comparative Life Cycle Assessment of Steel and Concrete Construction Frames: A Case Study of Two Residential Buildings in Iran. *Buildings*, 10, 54. <https://doi.org/10.3390/buildings10030054>

Olsson, J. A., Miller, S. A., y Kneifel, J. D. (2024). A review of current practice for life cycle assessment of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 206, 107619. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107619>

Pérez, O., Pino, J., Dios, M., y Ciro, S. (2022). Factores de emisión de concretos modificados con residuos de vidrio en reemplazo de los agregados finos. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 30(2), 368-377. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052022000200368>

Portland Cement Association. (2014). Declaración Ambiental de Producto Cementos adicionales (según ASTM C595, ASTM C1157, AASHTOM240, o CSA A3001). www.astm.org

Poudyal, L., y Adhikari, K. (2021). Environmental sustainability in cement industry: An integrated approach for green and economical cement production. *Resources, Environment*

and Sustainability, 4, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100024>

Restrepo, A., Jaramillo, Y., y Ochoa, J. (2020). DISMECON.

Siamardi, K., Shabani, S., y Mansourian, A. (2023). Optimization of concrete mixes using mixture approach for slip-formed concrete pavement incorporating blends of limestone aggregates. *Construction and Building Materials*, 397, 132377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132377>

SIATA. (2016). ¿Qué está pasando hoy? Calidad del aire. Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá. https://Siata.Gov.Co/Sitio_web/Index.Php/Noticia12

Speck, R., Selke, S., Auras, R., y Fitzsimmons, J. (2016). Life Cycle Assessment Software: Selection Can Impact Results. *Journal of Industrial Ecology*, 20(1), 18-28. <https://doi.org/10.1111/jiec.12245>

Stegmann, P., Londo, M., y Junginger, M. (2020). The Circular Bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters. *Resources, Conservation & Recycling: X*, 6, 100029. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100029>

THE INTERNATIONAL EPD SYSTEM. (2 de febrero de 2024). <https://environdec.com/library>

UNE-EN 15804:2012+A2:2020. Sustainability in construction. Environmental product declarations. Basic product category rules for construction products. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0063508>

Uthaman, S., y Vishwakarma, V. (2023). Assessment of causes and consequences of concrete deterioration and its remediation. *Journal of Building Engineering*, 79, 107790. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107790>

Vázquez-Calle, K., Guillén-Mena, V., y Quesada-Molina, F. (2022). Analysis of the Embodied Energy and CO2 Emissions of Ready-Mixed Concrete: A Case Study in Cuenca, Ecuador. *Materials*, 15, 4896. <https://doi.org/10.3390/ma15144896>

Watari, T., Hata, S., Nakajima, K., y Nansai, K. (2023). Limited quantity and quality of steel supply in a zero-emission future. *Nature Sustainability*, 6(3), 336-343. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01025-0>

WEF. (2020). The Global Risks Report 2020. www.weforum.org

Youssif, O., Roychand, R., Elchalakani, M., y Tahwia, A. M. (2024). Assessment of the Efficiency of Eco-Friendly Lightweight Concrete as Simulated Repair Material in Concrete Joints. *Buildings*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/buildings14010037>

Zandifaez, P., Asadi Shamsabadi, E., Nezhad, A., Zhou, H., y Dias-da-Costa, D. (2023). AI-Assisted optimisation of green concrete mixes incorporating recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 391, 131851. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131851>

UN ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA CERTIFICACIÓN EDGE EN EDIFICACIONES: EL CASO DE PERÚ

ANALYSIS OF THE IMPACT OF EDGE CERTIFICATION ON BUILDINGS: THE CASE OF PERU

ANÁLISE DO IMPACTO DA CERTIFICAÇÃO EDGE EM EDIFÍCIOS: O CASO DO PERU

Mónica J. Condezo-Solano

Arquitecta
Investigadora Facultad de Arquitectura
Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú
<https://orcid.org/0009-0004-2275-5057>
mcondezozos@uni.pe

Andrews A. Erazo-Rondinel

Ingeniero Civil
Investigador Facultad de Ingeniería
Universidad Continental, Huancayo, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-5639-573X>
aerazo@continental.edu.pe (Autor de Correspondencia)

Lorena Milagros Barrozo-Bojorquez

Estudiante - Investigadora, Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú
<https://orcid.org/0009-0002-9700-8764>
lorena.barrozo.b@uni.pe

Coraima Chantal Rivera-Nalvarte

Estudiante - Investigadora, Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú
<https://orcid.org/0009-0008-3629-0288>
coraima.rivera.n@uni.pe

Areli Zaraida García-Puclla

Estudiante - Investigadora, Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú
<https://orcid.org/0009-0002-5750-3760>
areli.garcia.p@uni.pe



RESUMEN

Las certificaciones ambientales, se han implementado en el sector de la construcción por los beneficios de reducción del impacto ambiental, mejora de la eficiencia energética, uso de agua, entre otros. En ese sentido, en los últimos años se ha adoptado en más de ciento cuarenta países la certificación EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies). Sin embargo, pese a su popularidad; la literatura sobre los impactos en el medio ambiente, es escasa a nivel mundial y latinoamericano. Por ello, el siguiente artículo analizará el uso de EDGE en proyectos de vivienda en el Perú y mostrará las estrategias empleadas en los casos de estudio para disminuir el impacto ambiental. Para ello, se realiza una revisión literaria de EDGE y un análisis de dieciocho proyectos de edificaciones peruanos, los principales ahorros promedio obtenidos, son: 27.6% en Energía, 41.2% en Agua y 51.81% en Carbono Incorporado en Materiales. El siguiente estudio significa un aporte a los profesionales del sector construcción interesados en implementar la certificación EDGE en sus proyectos, ya que se evidencian los impactos ambientales que genera este tipo de certificación.

Palabras clave

EDGE, edificaciones verdes, eficiencia energética, sustentabilidad

ABSTRACT

Environmental certifications have been implemented in the construction sector because of the benefits of reduced environmental impact, improved energy efficiency, and water use, among others. In recent years, the EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies) certification has been adopted in more than 140 countries. However, despite its popularity, the literature on its environmental impacts worldwide and in Latin America is scarce. Therefore, the following article will analyze the use of EDGE in housing projects in Peru and show the strategies employed in the case studies to reduce the environmental impact. The main average savings obtained were 27.6% in energy, 41.2% in water, and 51.81% in embodied carbon in materials. The following study aids professionals in the construction sector interested in implementing EDGE certification in their projects, as it will show the environmental impacts generated by this certification.

Keywords

EDGE, green buildings, energy efficiency, sustainability

RESUMO

As certificações ambientais foram implementadas no setor de construção pelos benefícios da redução do impacto ambiental, da melhoria da eficiência energética e do uso da água, entre outros. Nesse sentido, a certificação EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies) foi adotada em mais de 140 países nos últimos anos. Entretanto, apesar de sua popularidade, a literatura sobre os impactos no meio ambiente é escassa em nível global e latino-americano. Portanto, o artigo a seguir analisará o uso do EDGE em projetos habitacionais no Peru e mostrará as estratégias empregadas nos estudos de caso para reduzir o impacto ambiental. Para isso, é realizada uma revisão da literatura sobre EDGE e uma análise de dezoito projetos de construção peruanos, sendo que as principais economias médias obtidas são: 27,6% em energia, 41,2% em água e 51,81% em carbono incorporado em materiais. O estudo a seguir é uma contribuição para os profissionais do setor de construção interessados em implementar a certificação EDGE em seus projetos, pois mostra os impactos ambientais gerados por esse tipo de certificação.

Palavras-chave:

EDGE, edifícios verdes, eficiência energética, sustentabilidade

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción es una de las principales fuentes de consumo energético (Aini y Taringa, 2023) y de contaminación atmosférica en la mayoría de los países (Li et al., 2019) y contribuye significativamente al 38% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) (ONU, 2021). En el sentido de controlar el impacto de los proyectos de construcción, se han desarrollado diversos sistemas de certificación. El primer sistema de certificación desarrollado fue BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology) en Reino Unido y es bastante empleado en distintas partes del mundo, donde Europa involucra el 80% de proyectos certificados. Si bien BREEAM evalúa la sostenibilidad de las construcciones, a lo largo de su ciclo de vida, el factor ambiental es predominante en la certificación (Doan et al., 2017). Así también, BREEAM ha influenciado el desarrollo de otros sistemas de certificación como LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), que es un sistema de certificación, desarrollado por la USGBC (US Green Building Council) y es considerado el sistema de certificación más adoptado puesto que, se ha implementado en más de 160 países y al igual que BREEAM está enfocado principalmente en los factores ambientales (Doan et al., 2017). LEED es un sistema de certificación basado en puntuaciones, y categorías, las que llevan a cuatro niveles de certificación para los edificios (Certificado, Plata, Oro y Platino) (Marzouk, 2023). Así también LEED trae consigo beneficios al medio ambiente, salud humana y beneficios económicos (Chavez-Finol et al., 2021; Elkhapery et al., 2021). Otra certificación empleada es DGNB, que consiste en un sistema desarrollado por el GSBC (German Sustainable Building Council) en el año 2007 y cuenta con más de 5900 proyectos en más de 30 países, esta certificación busca evaluar y certificar la sostenibilidad de edificios en Alemania e internacionalmente ya que tiene la capacidad de adaptarse al clima, estructura, variaciones legales y culturales, y cuenta con cuatro tipos de certificaciones: platino, oro, plata y bronce (Samamé-Zegarra, 2021).

En Latinoamérica, LEED y EDGE se han mostrado como las certificaciones con mayor admisión, así también los países han adoptado otras certificaciones locales como: CASA (Colombia), Punto Verde (Ecuador), EcoCasa (México), Programa Mivivienda Sostenible (Perú), entre otros (Villaseñor, 2021). De acuerdo al Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS, 2024), en el último análisis LEED para Latinoamérica, el 75% de los proyectos están concentrados en los siguientes países: Brasil, México, Colombia y Chile y más del 50% de proyectos son oro y platino. LEED ha presentado beneficios como: mejora de la salud y bienestar de los ocupantes, así como menores costos de operación de los edificios. Si bien, LEED es un sistema de certificación riguroso y exigente, enfrenta limitada aceptación en países en vía de desarrollo, debido a su costo y complejidad (Beltrán-Méndez y Nik-Bakht, 2018). La Corporación Financiera Internacional (IFC), del

Banco Mundial, ha respondido a esta necesidad con el desarrollo de EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies), una herramienta de certificación ambiental para edificaciones disponible en más de 140 mercados emergentes (Isimbi y Park, 2022). Además de ello, EDGE se enfoca en brindar soluciones técnicas, tanto para reducir gastos operativos, reducción de emisiones de carbono y mitigar el impacto ambiental, en edificios nuevos como existentes (Villaseñor, 2021).

Para cumplir con la certificación EDGE, un edificio debe lograr un ahorro del 20% como mínimo en cada una de sus tres categorías: energía, agua y carbono incorporado en materiales respecto a las prácticas locales habituales (Aini y Taringa, 2023). EDGE abarca diversos tipos de edificaciones, como casas, apartamentos, hoteles, comercios, industrias, oficinas, centros de salud, almacenes, hospitales, aeropuertos y de uso mixto (Kapoor et al., 2019; Marzouk, 2023), además puede aplicarse en cualquier fase del ciclo de vida del edificio, desde el diseño conceptual hasta nuevas construcciones, edificios existentes y renovaciones.

La guía EDGE v3 (IFC, 2021) menciona que, las medidas a evaluar para lograr los ahorros del 20%, dependen de la tipología del proyecto. En el caso de la presente investigación, en relación a la categoría de energía, se pueden evaluar 34 medidas que propone la guía y el software EDGE, de las cuales 6 son obligatorias y el resto son opcionales, esto dependerá de si los resultados de la simulación energética en el software EDGE son mayores al 20%; en relación a la categoría agua se pueden evaluar de 17 medidas, de las cuales 6 son obligatorias y el resto son opcionales y dependerá de si los resultados de la simulación energética en el software EDGE y finalmente en el caso de materiales se evalúan 11 medidas de las que todas son obligatorias.

La evaluación bajo la tipología Casas y Apartamentos, en el que se enfoca el presente estudio, se basa principalmente en la eficiencia energética e hídrica a nivel residencial, con énfasis en sistemas domésticos como iluminación, calefacción, y electrodomésticos, así como en el consumo de agua en baños y cocinas. También se considera el uso de materiales sostenibles y la eficiencia en el aislamiento térmico para mejorar la eficiencia energética en la unidad de vivienda. Por otro lado, la evaluación del resto de tipologías como Industrias, se centra en la eficiencia de maquinaria y procesos de producción, optimización del uso de agua en procesos industriales, y selección de materiales de baja energía incorporada con gestión eficiente de residuos., en el aspecto denominado Comercios, se orienta en la eficiencia energética de iluminación, HVAC y refrigeración, reducción del consumo de agua en áreas comunes y uso de materiales sostenibles y reciclados (IFC, 2021).

Marzouk (2023) menciona que, las ventajas de EDGE respecto a LEED son: la aplicación web gratuita de EDGE que permite realizar una autoevaluación del edificio a certificar de manera informal, antes del proceso de certificación

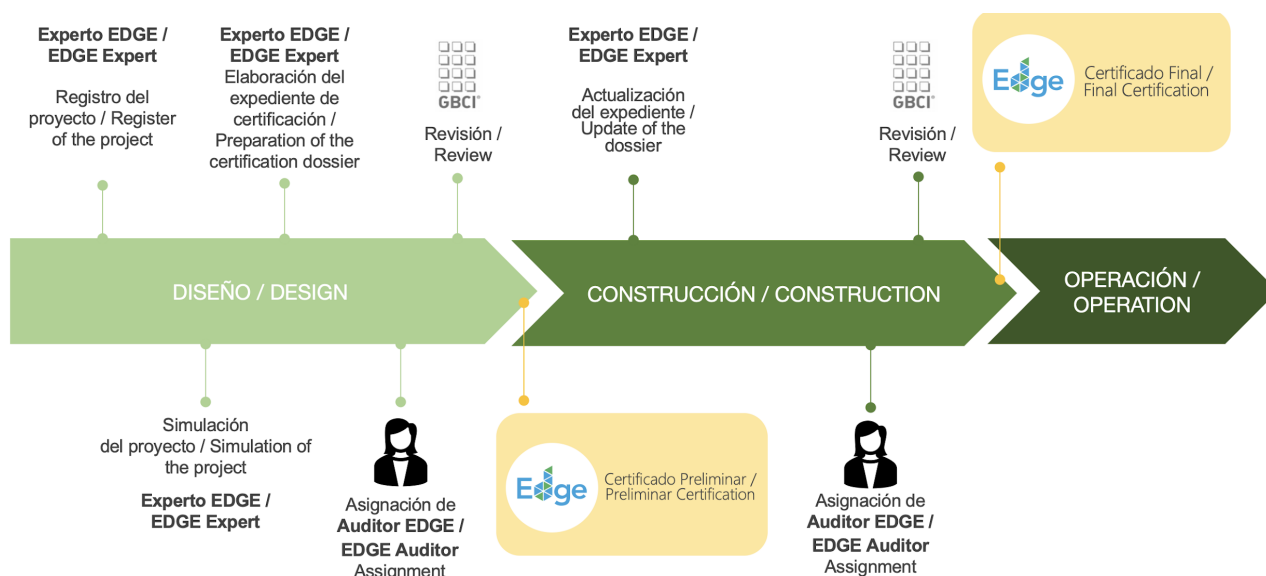


Figura 1. Línea de tiempo de la Certificación EDGE. Fuente: Elaboración de los autores.

inicial, sin incurrir en algún costo. La segunda, es su facilidad para entender los criterios de certificación y lograrlos. Y el tercero es que EDGE cuenta con una base de datos que permite adaptarse al lugar determinado por el usuario para el proyecto que será diseñado y construido, con ello no se requiere recopilar datos adicionales como precios e información climática para el diseño. La última ventaja es la rápida respuesta interactiva que se puede obtener al hacer uso del software EDGE online, durante el diseño, además de mostrar rápidamente los cambios en agua o energía u optimizar el uso de materiales de construcción. Así también Samamé-Zegarra (2021) menciona que, la herramienta web de cálculo de agua de EDGE, permite hacer el proceso de análisis de agua más sencillo que otras certificaciones como LEED, BREEAM o DGNB.

EDGE ha sido ampliamente adoptado en distintos países; sin embargo, la investigación sobre sus beneficios e impactos es limitada, en especial en Latinoamérica. En Latinoamérica, EDGE cuenta con más de 400 proyectos certificados; donde Colombia, cuenta con 200 certificaciones y es la región con mayor cantidad de proyectos certificados (Villaseñor, 2021), donde el 81% de ellos, son proyectos residenciales (Rodríguez et al., 2021). Por su parte, Perú es el segundo país latinoamericano con más proyectos certificados EDGE (Villaseñor, 2021). En Perú las certificaciones ambientales, están logrando una adopción creciente en el mercado, donde se tienen construcciones certificadas en LEED, con un crecimiento constante, donde la tipología de edificaciones de oficina representa cerca del 50% de proyectos certificados (Villaseñor, 2021). Además de ello, la adopción de LEED posee ciertas limitaciones como el uso de materiales que no se encuentran disponibles en el país, la reutilización de materiales de las construcciones, energía renovable en el sitio, limitados proveedores de madera certificada (Regalado-Espinoza et al., 2021).

Otra certificación con rápido crecimiento en el mercado peruano ha sido EDGE, que ha ganado bastante popularidad entre los desarrolladores inmobiliarios debido a los incentivos municipales que reciben por obtener la certificación, como el bono de altura, que les permite construir más pisos (Samamé-Zegarra, 2021). A nivel local, se emplea la certificación Programa Mivivienda Sostenible promovida por el estado peruano, es opcional y está implementado desde el año 2016 y está enfocada a la vivienda social en rangos de \$17,262 a \$122,901. En esta certificación se evalúan seis criterios: agua, energía, bioclimática, materiales, desperdicios y sostenibilidad urbana (Samamé-Zegarra, 2021).

Dado el déficit habitacional que afecta a la población peruana, la vivienda sostenible se presenta como una solución clave y EDGE, se revela como una herramienta potencialmente transformadora que aborda tanto la eficiencia energética como las brechas habitacionales. Es por ello, que la presente investigación tiene como objetivo analizar la adopción de la certificación EDGE en edificaciones del Perú.

PROCESO DE CERTIFICACIÓN EDGE

El proceso de certificación EDGE de un edificio nuevo se divide en etapa de diseño y construcción, y se puede resumir en la Figura 1.

De acuerdo a la guía EDGE V3 (IFC, 2021), el proceso se inicia con el registro del proyecto en la plataforma de EDGE, donde se llevarán simulaciones aplicando diversas estrategias sostenibles, con el objetivo de lograr ahorros mínimos requeridos del 20% en las tres categorías contempladas por EDGE. A continuación, en la etapa de diseño, se desarrollará el expediente de la certificación, que será sometido a revisión por el Auditor EDGE y el ente certificador GBCI. Después de la primera ronda de revisión,

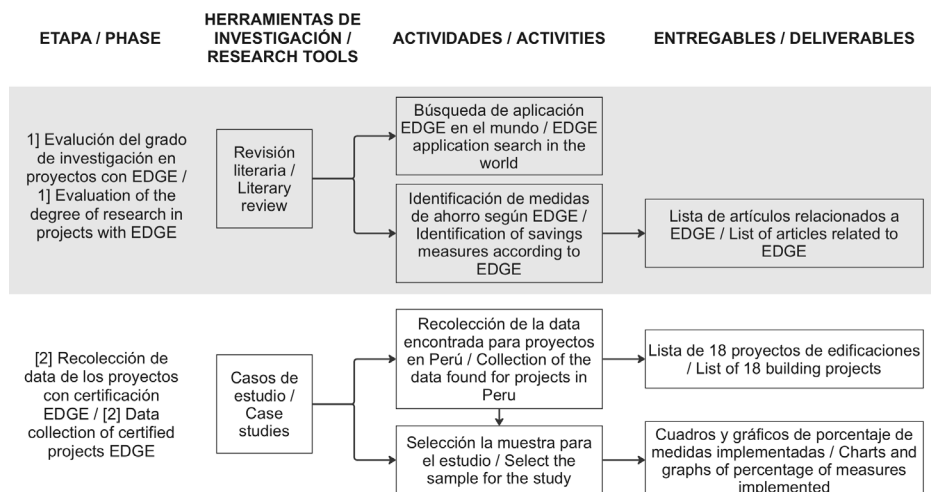


Figura 2. Metodología de la investigación. Fuente: Elaboración de los autores.

se identificarán las observaciones correspondientes, las que serán comunicadas al equipo del proyecto. Posteriormente, el equipo tendrá la oportunidad de abordar y corregir las observaciones, dando paso a la segunda ronda de revisión para finalmente obtener la Certificación Preliminar.

Durante la etapa de construcción, se repetirá el mismo proceso. Comenzará con la actualización del expediente en función de los cambios experimentados por el proyecto, en caso de que los haya. Posteriormente, se asignará al Auditor EDGE, quien llevará a cabo una auditoría en sitio y en colaboración con el GBCI, verificará el cumplimiento de todas las medidas adoptadas e implementadas en el proyecto. Este proceso concluirá con la obtención de la Certificación Final EDGE.

Según la guía EDGE V3 (IFC, 2021) La certificación EDGE contempla 3 niveles, en base a los ahorros logrados:

- **EDGE Certified.** Es el nivel básico con el que se puede obtener este reconocimiento: se otorga al cumplir un ahorro mínimo de 20% en la categoría de energía, 20% en la categoría de agua y 20% en la categoría de carbono incorporado en los materiales del edificio. Estos son los “ahorros base” en los que se fundamenta la evaluación EDGE.
- **EDGE Advanced.** Este nivel premia a los proyectos que demuestran una reducción de mínimo 40% en energía; mientras que los ahorros mínimos en agua y carbono incorporado en los materiales se mantienen al 20% como en EDGE Certified.
- **Zero Carbon.** Este nivel de certificación busca la máxima reducción y compensación de consumo energético del edificio. Para conseguirlo es necesario que mínimo el 40% de la energía sea reducida en la etapa de diseño, a través de la implementación de estrategias en el edificio (como EDGE Advanced) y el ahorro faltante para completar el 100% del consumo energético será compensado mediante fuentes renovables en sitio o

la compra de bonos de carbono. Asimismo, los ahorros mínimos de agua y carbono incorporado en los materiales se mantienen al 20% como en el nivel EDGE Certified.

METODOLOGÍA

La metodología de la investigación se detalla en la Figura 2. En una primera etapa, se realizó una revisión literaria de EDGE utilizando PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Y en una segunda etapa se realizó el análisis de 18 proyectos EDGE.

PRIMERA ETAPA: REVISIÓN LETERARIA

Se realizó una revisión literaria sobre EDGE, siguiendo la metodología PRISMA, debido a que se ha usado previamente para desarrollar revisiones literarias correspondiente a temas de sostenibilidad (Cao et al., 2022a; Cao, et al., 2022b). Se identificaron las bases de datos Scopus y Web of Science, donde se colocó la palabra clave: “Excellence in design for greater efficiencies”, luego de ello, se obtuvieron 12 resultados en Scopus y 05 resultados en Web of Science y 50 resultados en Google Scholar, en los que se repitieron 20 de ellos y se descartaron 27 artículos, quedando una lista de 20 artículos relacionados a EDGE.

SEGUNDA ETAPA: ANÁLISIS DE PROYECTOS DE EDIFICACIONES EDGE

Para la selección de proyectos a analizar, llevamos a cabo una búsqueda en la base de datos web de EDGE: archivos de estudios de proyectos y nuevos estudios de proyectos (Edge Buildings, 2024). Los criterios de búsqueda y exclusión se detallan en la Figura 3.

En la fase inicial, se identificaron 163 proyectos, en los que 81 carecían de una denominación específica y se mencionan simplemente como “viviendas”. Otros 28 proyectos tenían

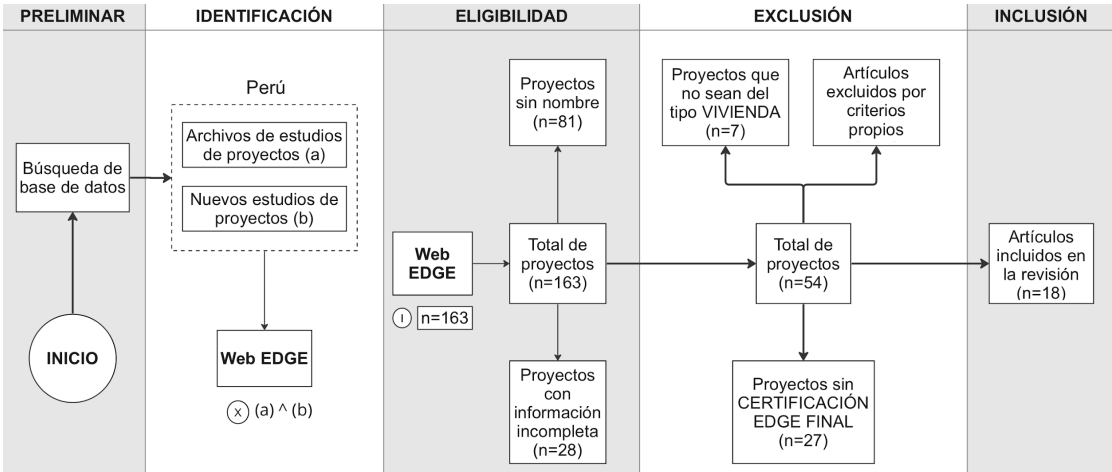


Figura 3. Proceso de selección de proyectos en estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 1. Dieciocho complejos residenciales con certificación EDGE. Fuente: Elaboración de los autores.

Código del edificio	Nombre del edificio	Superficie (m2)	Fecha de certificación
P1	Edificio Alborada II	963,66	1 de noviembre de 2021
P2	Alcanfores 1262	4024,04	1 de febrero de 2022
P3	Parque Verde Sur	5556,00	1 de febrero de 2022
P4	Soleada	4825,04	1 de noviembre de 2021
P5	Parque Club	4509,69	1 de septiembre de 2021
P6	Madrid Amistoso	3208,62	1 de septiembre de 2021
P7	Madrid en Vivo	5274,93	1 de octubre de 2020
P8	Conde de la vega	2834,00	1 de diciembre de 2020
P9	Hermano Lobo 188	2770,00	1 de septiembre de 2019
P10	Golf Los Incas	5188,00	1 de noviembre de 2017
P11	Edificio Manco Cápac 860	3675,75	19 de mayo de 2023
P12	Multifamiliar Farah	3140,75	21 de abril de 2023
P13	Lumiere 7 - Llosa Edificaciones	5814,82	8 de marzo de 2023
P14	Casimiro Ulloa 227	3608,12	22 de agosto de 2023
P15	Edificio Multifamiliar Laureles	8367,14	29 de enero de 2024
P16	Edificio Multifamiliar Today	6725,39	17 de enero de 2023
P17	Edificio Multifamiliar Túnez 448	1643,72	13 de junio de 2023
P18	Edificio Helsinki	1848,3	29 de enero de 2024

información incompleta, obteniendo un total de 54 proyectos revisados.

En la siguiente fase, se excluyeron 9 proyectos, 7 estructuras que no eran del tipo de edificaciones y 2 que se eliminaron debido a información inconsistente. También se descartaron 27 proyectos sin certificación final de EDGE, ya que los datos de ahorro son más fidedignos en la certificación final. Como resultado, se obtuvieron 18 edificios residenciales con Certificación Final EDGE, que se detallan en la Tabla 1.

RESULTADOS

REVISIÓN LITERARIA

Luego de la revisión literaria, se identificaron 20 artículos, los que se detallan en la Tabla 2.

En la Tabla 2, se evidencia que de los 20 artículos se han desarrollado en los cinco continentes y en su mayoría

Tabla 2. Artículos relacionados a EDGE. Fuente: Elaboración Autores.

N°	Autor	País	Medida EDGE	Concepto EDGE implementado
1	Azouz y Elariane (2023)	Egipto	Eficiencia Energética	Calculadora EDGE para calcular la eficiencia energética.
2	Ayanrinde y Mahachi (2023)	Nigeria	Eficiencia Energética, agua y materiales	Medición de la huella de CO2.
3	Velázquez Robles et al. (2022)	México, Puerto Rico e Indonesia	Eficiencia Energética	Uso del software de EDGE, para calcular los ahorros energéticos.
4	Bochare y Bagora (2022)	India	Eficiencia Energética, agua y materiales	EDGE para evaluar la eficiencia energética, hídrica y de materiales en la construcción sustentable.
5	Kapoor et al. (2019)	No específica	EDGE para desarrollos urbanos	Propuesta de una herramienta EDGE GUD para Desarrollos Verdes Urbanos.
6	Kartikasari et al. (2018)	Indonesia	Eficiencia Energética	Uso del software EDGE para simular medidas de eficiencia energética.
7	Saberi y Kapoor, (2016)	Reino Unido	Eficiencia Energética	Evaluación de la nueva medida EDGE y su impacto en el ahorro energético.
8	Isimbi y Park (2022)	Sudáfrica	Eficiencia Energética, agua y materiales	Software EDGE para calcular el ahorro de energía, agua, energía incorporada en materiales y emisiones anuales de CO2.
9	Marzouk (2023)	Omán	Eficiencia Energética, agua y materiales	Software EDGE para calcular el ahorro energía, agua y materiales de un caso base vs un caso de diseño modificado.
10	Dlamini y Yessoufou (2022)	Sudáfrica	Evaluación de usuarios sobre energía y agua	Evalúa las barreras, oportunidades y la percepción de los usuarios sobre el uso de energía y agua en un conjunto residencial.
11	Ibrahim et al.(2023)	Egipto	Eficiencia Energética, agua y materiales	Análisis de la aplicación EDGE para calcular el ahorro energético, de agua y de carbono incorporado en materiales.
12	Beltrán-Méndez y Nik-Bakht (2018)	Colombia	Viabilidad de implementación en el mercado colombiano	Evaluación de las características de EDGE frente a otras certificaciones, respecto a costo, operatividad y penetrabilidad.
13	Indriyati y Izzah (2022)	Indonesia	Agua	Medir la eficiencia del uso de agua en una edificación universitaria. 24.8% de
14	Tarigan y Kartikasari (2016)	Indonesia	Eficiencia Energética	Se usó la calculadora EDGE, se generó un ahorro energético del 28%
15	Aini y Tarigan (2023)	Indonesia	Eficiencia Energética, agua y materiales	Software EDGE para calcular el ahorro energía, agua y materiales de un caso base vs un caso de diseño modificado.
16	Rodríguez et al.(2021)	Colombia	Análisis de Proyectos EDGE (Eficiencia Energética y Agua)	Se listan los ahorros energéticos y de agua de EDGE y LEED en Colombia
17	Setyowati et al. (2020)	Indonesia	Eficiencia de agua	Uso del software EDGE y medición manual para el cálculo de la eficiencia del agua ante escenario de tratamiento de agua
18	Atolagbe et al. (2023)	Nigeria	Eficiencia Energética, agua y materiales	Software EDGE para estimación de reducción en el consumo energético en una edificación universitaria
19	Agyekum et al., (2023)	Ghana	Evaluación de usuarios sobre la calidad del aire interior	Evaluación de la calidad ambiental interior (EIQ) en edificios EDGE,
20	Samamé-Zegarra (2021)	Perú	Eficiencia de Agua	Comparación de la eficiencia de agua, entre EDGE, LEED, BREEAM, HQE, DGNB y Programa Mivivienda Sostenible

en países en vías de desarrollo. De los 20 estudios, 4 de ellos están enfocados en Latinoamérica, dos en Colombia (Beltrán-Méndez y Nik-Bakht, 2018; Rodríguez et al., 2021), 1 en Perú (Samamé-Zegarra, 2021) 1 en México y Puerto Rico (Velázquez Robles et al., 2022), lo que representa una baja cantidad en comparación a los proyectos certificados en Latinoamérica.

Respecto a la categoría energía, 9 artículos abordan este tema y se encuentran en la Tabla 2 (1,3,6,8,9,14,15,17,18), los que están enfocados en el uso del software de análisis energético que brinda la herramienta en línea de EDGE, el que permite diseñar libremente un proyecto de manera eficiente autorizando la elección de diversas medidas ecológicas que generen un mayor ahorro energético. Una ventaja destacada de EDGE es su herramienta de autoevaluación en línea gratuita, que facilita la evaluación previa del diseño de un edificio antes de iniciar el proceso oficial de certificación (Marzouk, 2023). En Indonesia, el software EDGE se utilizó para simular medidas de eficiencia energética, identificando nueve medidas que podrían lograr un ahorro del 18.9% (Kartikasari et al., 2018). En Egipto, se aplicó el software EDGE para calcular el ahorro de energía (Azouz y Elariane, 2023). En México, Puerto Rico, Indonesia y el Reino Unido, también se utilizó el software EDGE para calcular ahorros energéticos (Velázquez Robles et al., 2022).

Respecto a la eficiencia del uso del agua de la Tabla 2 (13,17, 20), se demuestra que 3 artículos exploran la eficiencia del agua y analizan la eficiencia hídrica con ayuda del software EDGE para simulaciones de escenarios propuestos; la aplicación EDGE se debió principalmente a su facilidad, rapidez y asequibilidad (Samamé-Zegarra, 2021; Setyowati et al., 2020). Para el caso de los artículos (12 y 16), se realiza la comparación entre la certificación EDGE y otras, las que permiten evaluar la viabilidad de aplicación en los proyectos según costos u operatividad. Según Beltrán-Méndez y Nik-Bakht (2018), EDGE tiene un menor costo y una mayor operatividad en comparación con otras certificaciones como LEED, lo que puede contribuir a su inserción en el mercado colombiano.

En los artículos de la Tabla 2 (10, 19), se evalúan las perspectivas de los usuarios, donde se evidenció la falta de conocimientos sobre los conceptos de medio ambiente y sostenibilidad, además de la baja conciencia del beneficio de la implementación de medidas de ahorro y energía en las edificaciones, sugiriendo una mayor difusión de éstos. Por otro lado, existe sólo un artículo relacionado a la calidad del aire interior (EIQ), en edificios EDGE; si bien este no es un concepto analizado por EDGE, Agyekum et al. (2023), realiza una evaluación de los parámetros de confort que deben considerarse basados en la certificación EDGE.

A nivel Latinoamericano, la implementación de la certificación EDGE en Colombia y Perú presentan puntos en común. En Colombia, Rodríguez et al. (2021) menciona

que se ha observado un esfuerzo concertado por parte de empresas y el gobierno para promover la construcción sostenible, en línea con la Resolución 0549 del año 2015. La certificación EDGE se destaca por su facilidad de uso y bajo costo, lo que ha facilitado su adopción en el país. Las estrategias gubernamentales y la colaboración con el sector privado, han sido clave para que EDGE aspire a capturar el 20% del mercado de la construcción en los próximos años. En el caso de Perú, Samamé-Zegarra (2021), menciona que, la adopción de EDGE ha sido adoptada por los desarrolladores inmobiliarios, debido a incentivos locales como incremento de la altura de la edificación, por poseer la certificación. Así también, en ambos países los proyectos residenciales son los que presentan la mayor cantidad de proyectos certificados, en el caso de Colombia es cercano al 80% (Rodríguez et al., 2021) y el 50% en el caso de Perú (Samamé-Zegarra, 2021). Otro punto en común, es que los autores de ambos países han mencionado la importancia de la herramienta online de EDGE, destacando su importancia y facilidad de uso para agua y energía (Beltrán-Méndez y Nik-Bakht, 2018; Rodríguez et al., 2021; Samamé-Zegarra, 2021).

ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD DE LOS PROYECTOS EN ESTUDIO

Las soluciones técnicas en energía, agua y carbono embebido en materiales de los 18 proyectos, se detallan en las tablas correspondientes. Se destaca que los edificios Farah y Today lideran en la implementación de estrategias en todas las categorías del estándar EDGE, mientras que el edificio Golf Los Incas presenta una menor cantidad de estrategias implementadas. Los edificios certificados bajo el estándar EDGE desempeñan un papel crucial en la mitigación del impacto ambiental, contribuyendo significativamente a la lucha contra el cambio climático. Ninguno de los 18 edificios alcanzó la Certificación EDGE Advanced en la Certificación Zero Carbón.

MEDIDAS DE ENERGÍA Y AHORRO ENERGÉTICO

La Tabla 3 muestra el porcentaje de aplicación de las medidas de Energía de EDGE v3 en los edificios estudiados, clasificadas en ahorro de energía (78.4%), generación de energía (13.5%) y medición de la energía (8.1%). El diseño de los edificios se enfocó en eficiencia y reducción del consumo, además incluyó estrategias implementadas durante la etapa de diseño y construcción, como controles de iluminación, pintura reflectante en techos y muros, iluminación LED, reducción de la proporción ventana-muro, vidrios de baja transmitancia térmica, dispositivos de sombreamiento exterior, aislamiento del techo y la adopción de energía solar fotovoltaica. Buscando evitar puentes térmicos, se optimizó la eficiencia energética mediante la reducción de la proporción ventana-muro, vidrios de baja transmitancia térmica y aislamiento en techos y muros, los que generó ahorros evidentes en las facturas de electricidad de los propietarios finales.

Tabla 3. Resumen de soluciones técnicas relacionadas con la categoría de Energía. Fuente: Elaboración de los autores.

Soluciones técnicas	Porcentaje de edificios con soluciones
E01*: Menor proporción de vidrio en la fachada exterior	100.00%
E02: Dispositivos de control solar externo	44.44%
E03: Pintura reflectiva/tejas para techo	22.22%
E04: Pintura reflectiva para paredes externas	5.56%
E05*: Aislamiento del techo	50.00%
E06*: Aislamiento térmico de paredes externas	44.44%
E07: Vidrio con revestimiento de baja emisividad	33.33%
E12*: Sistema de aire acondicionado	5.56%
E33: Bombillas ahorradoras de energía	66.67%
E34: Controles de iluminación	33.33%
E42: Energía solar fotovoltaica	16.67%

*Medida obligatoria

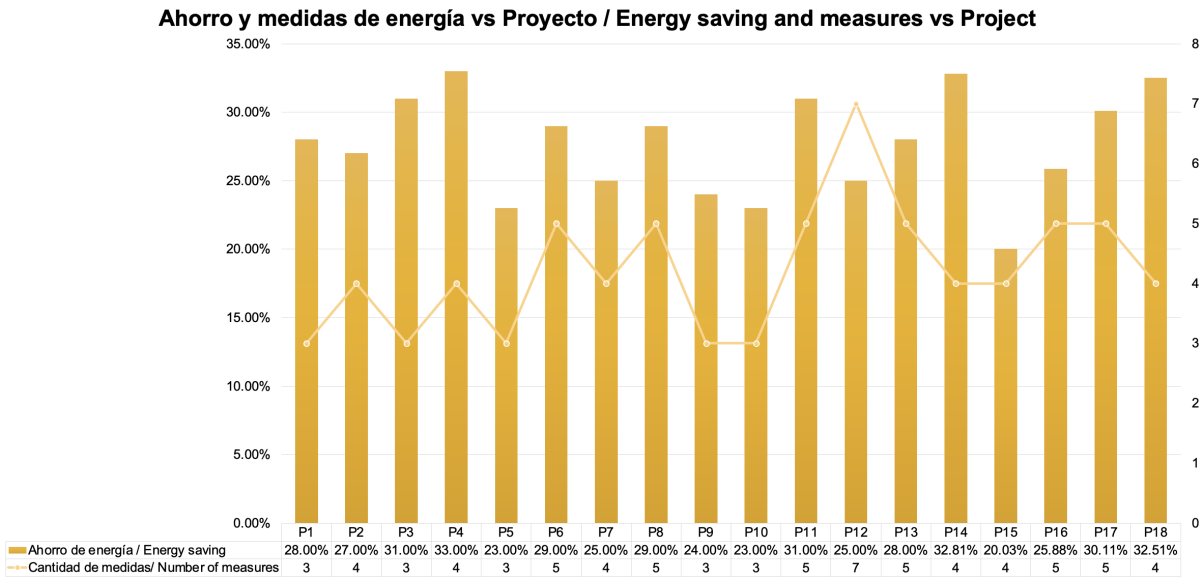


Figura 4. Ahorro de energía contra medidas del proyecto. Fuente: Elaboración de los autores.

Los proyectos evaluados lograron un ahorro energético promedio del 27.6% en comparación con el caso base, según la normativa local; entre los años 2017 y 2024, los ahorros de energía fluctuaron entre el 20% y el 33%. Soleada lideró con un 33%, seguido por Casimiro Ulloa con un 32.81%. Laureles tuvo el menor ahorro energético, con 20.03%, seguido por Parque Club y Golf Los Incas con un 23%.

La mayoría de los edificios redujo la proporción de área vidriada en la fachada, minimizando la ganancia térmica y manteniendo el confort interior. No obstante, Madrid en Vivo optó por equipos eficientes de HVAC en las unidades de vivienda, lo que no afectó significativamente el ahorro energético. Además, Alcanfores, Manco Cápac y Lumiere implementaron paneles fotovoltaicos para cubrir

la demanda de energía en áreas comunes. Así también, en la Figura 4 se consideró la cantidad de medidas adoptadas por cada proyecto en estudio, de la figura 4, se muestra que, el ahorro energético logrado no necesariamente está relacionado a la cantidad de medidas implementadas. Esto se debe a que cada proyecto posee características únicas como: la arquitectura del proyecto, la proporción del vidrio en la fachada y elementos de los que dependerá la evaluación de las medidas.

MEDIDAS DE AGUA Y DE AHORRO HÍDRICO

De las tres categorías de EDGE, la categoría de Agua fue la que menos estrategias presentó. Las estrategias relacionadas con el agua, se enfocan en controlar el

Tabla 4. Resumen de soluciones técnicas relacionadas con la categoría de Agua. Fuente: Elaboración de los autores.

Soluciones técnicas	Porcentaje de edificios con soluciones
W01*: Cabezales de ducha que ahorran agua	94.44%
W02*: Grifos eficientes que ahorran agua para todos los baños	100.00%
W04*: Inodoros eficientes que ahorran agua para todos los baños	83.33%
W08*: Grifos de cocina que ahorran agua	100.00%
W15: Sistema de tratamiento y reciclaje de aguas residuales	5.56%

*Medida obligatoria

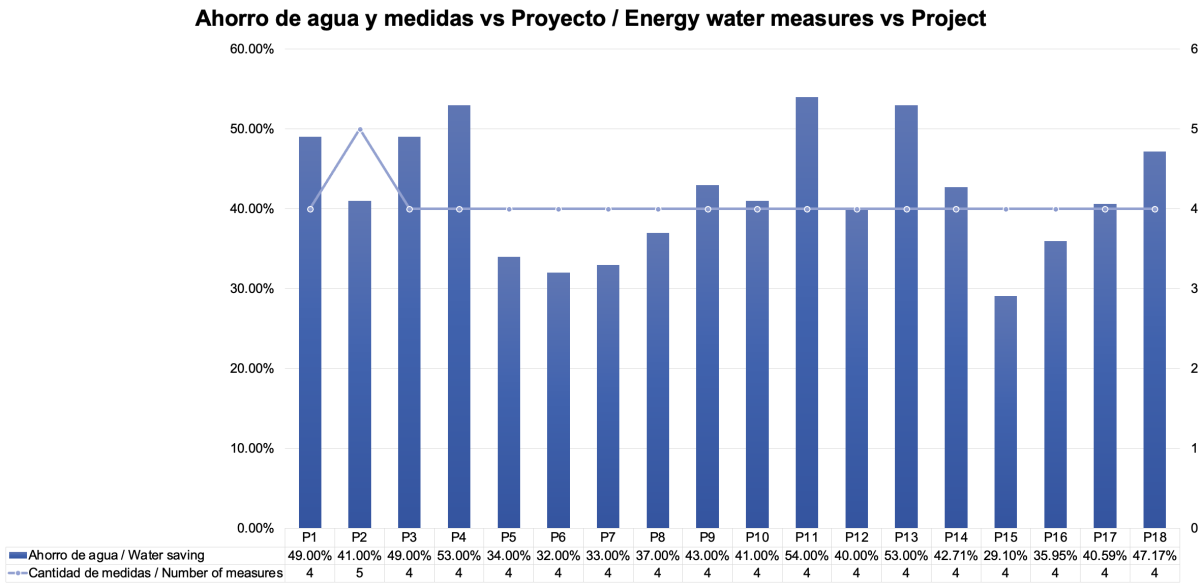


Figura 5. Ahorro de agua contra medidas del proyecto. Fuente: Elaboración de los autores.

consumo de la misma en las griferías y equipos sanitarios de baño y de cocina. Se instalaron griferías de bajo caudal para reducir el consumo de agua y disminuir el consumo de energía que está relacionado intrínsecamente con el consumo de agua caliente. Casi el 100% de los edificios han implementado estrategias como la instalación de griferías de bajo caudal en los baños y cocinas, cabezales de ducha de bajo caudal e inodoros eficientes de simple o doble descarga.

Por otro lado, el 6% de las edificaciones acudió a la implementación de una planta de tratamiento de aguas grises con el fin de reutilizar las aguas recuperadas en el sitio, como en las descargas de inodoros y el riego de áreas vegetadas, lo que aporta al ahorro hídrico final (Tabla 4).

La reducción del consumo de agua es sumamente importante, debido al estrés hídrico que vive Lima actualmente. El ahorro hídrico promedio fue de 41.92%. El Edificio Manco Cápac se posiciona en el primer lugar, con el ahorro más alto con 54%, seguido por Soleada y Lumiere con un 53%. Soleada destaca en el ahorro energético e hídrico entre todos los edificios evaluados. Los menores ahorros logrados fueron obtenidos por Madrid Amistoso con 32%, seguido por Madrid en Vivo con 33%. A pesar de que, Alcanfores fue el único edificio que

implementó un sistema de tratamiento de aguas grises en el sitio, como fuente alternativa de agua potable, su ahorro se mantuvo cercano al promedio con 41%. En la Figura 5, se muestran los ahorros logrados versus las medidas adoptadas. Se percibió que el porcentaje de ahorro de agua logrado, no necesariamente está relacionado a la cantidad de medidas implementadas. Esto debido a las especificaciones de los equipos sanitarios y griferías; además de ello, en esta categoría se tienen cuatro medidas de cumplimiento obligatorio y sólo un proyecto presentó de manera extra, la medida W15 (Sistema de tratamiento y reciclaje de aguas residuales).

Estrategias de mitigación del carbono incorporado en materiales

Los proyectos analizados, han considerado la versión 2 y 3 de EDGE, en el caso de versión 2, se indican 6 medidas obligatorias y en el caso de la versión 3, son 11 medidas obligatorias. En la construcción de edificios, se emplean diversos materiales en elementos estructurales y arquitectónicos, como losas de pisos, losas de techo, muros interiores y exteriores, acabados de pisos, marcos y vidrios de ventanas, mamparas, y aislamiento en la envolvente.

Tabla 5. Resumen de soluciones técnicas relacionadas con la categoría de Carbono Incorporado en Materiales. Fuente: Elaboración de los autores.

Materiales de construcción	Porcentaje de edificios con soluciones
M01*: Losas de pisos	
Losas de concreto reforzada in situ	44.44%
Losas aligeradas de concreto	44.44%
Losas aligeradas de concreto con bloques de poliestireno	27.78%
M02*: Losas de techo	
Losas de concreto reforzada in situ	44.44%
Losas aligeradas de concreto	61.11%
Losas aligeradas de concreto de bloques de poliestireno	27.78%
M03*: Muros interiores	
Bloques de concreto hueco de peso mediano	44.44%
Pared reforzada in situ	66.67%
Bloques de concreto aireado en autoclave	22.22%
Ladrillos huecos (con orificios) con yeso interno y externo	16.67%
Ladrillos caravista y bloques de concreto	11.11%
M04*: Muros exteriores	
Bloques de concreto hueco de peso mediano	38.89%
Pared reforzada en obra	11.11%
Bloques de concreto aireado en autoclave	22.22%
Ladrillos huecos (con orificios) con yeso en ambos lados	22.22%
M05*: Acabados de pisos	
Baldosa cerámica	66.67%
Piso de vinilo	11.11%
Piso de madera laminada	55.56%
Baldosas de terracota	11.11%
M06*: Marcos de ventanas	
Aluminio	72.22%
M09*: Aislamiento de losas de techo	
Poliestireno	11.11%
Celulosa	16.67%

*Medida obligatoria

La losa de concreto reforzada in situ y la losa aligerada de concreto fueron utilizadas en el 44% de los edificios para las losas de pisos. En las losas de techo, la losa aligerada de concreto prevaleció en el 61%, seguida por la losa de concreto reforzada in situ en el 44%. Los muros exteriores se construyeron principalmente con muros reforzados in situ (67%) y bloques de concreto con huecos de peso mediano (44%). En muros interiores, los bloques de concreto con huecos de peso mediano denso fueron los más utilizados (39%), seguidos por bloques de concreto aireado en autoclave (22%). En acabados de pisos, las baldosas de cerámica y el piso de madera laminada fueron aplicados en el 67% y 56% de los edificios, respectivamente. Los marcos de ventana de aluminio fueron predominantes en el 72% de los casos. El aislamiento en las losas de techos y en las losas con contacto directo al terreno, se realizaron con ladrillos de poliestireno en el 11% de los edificios evaluados (Tabla 5).

El análisis de los materiales de construcción que se lleva a cabo bajo la categoría correspondiente, es más exhaustivo y detallado puesto que, se realiza un análisis del ciclo de vida

de cada material. Por tanto, cuanto menor sea el carbono equivalente generado en todo el ciclo de vida del material a emplear, menor será la huella de carbono emitida y a su vez será menor el impacto en el planeta. El ahorro de carbono incorporado promedio es de 51.81%. En general, los edificios Madrid en Vivo y Golf Los Incas lograron los ahorros más altos con un 69% demostrando que mitigaron su huella de carbono en el proceso de construcción de las edificaciones. Multifamiliar Farah obtuvo el ahorro más bajo, con un 30%, seguido por Conde de la Vega con 35%. En base al material elegido y empleado en la etapa constructiva de los edificios se establece el carbono equivalente involucrado, este puede reducirse con la elección correcta del material, para ello el software EDGE será un gran aliado en proceso de elección ya que, permitirá realizar las simulaciones respectivas basado en el carbono incorporado predeterminado para cada material existente y con ello proyectar los ahorros en cada categoría respectiva que conforma la certificación.

En la Figura 6, se muestran los ahorros logrados versus las medidas adoptadas. Se aprecia que el porcentaje de ahorro

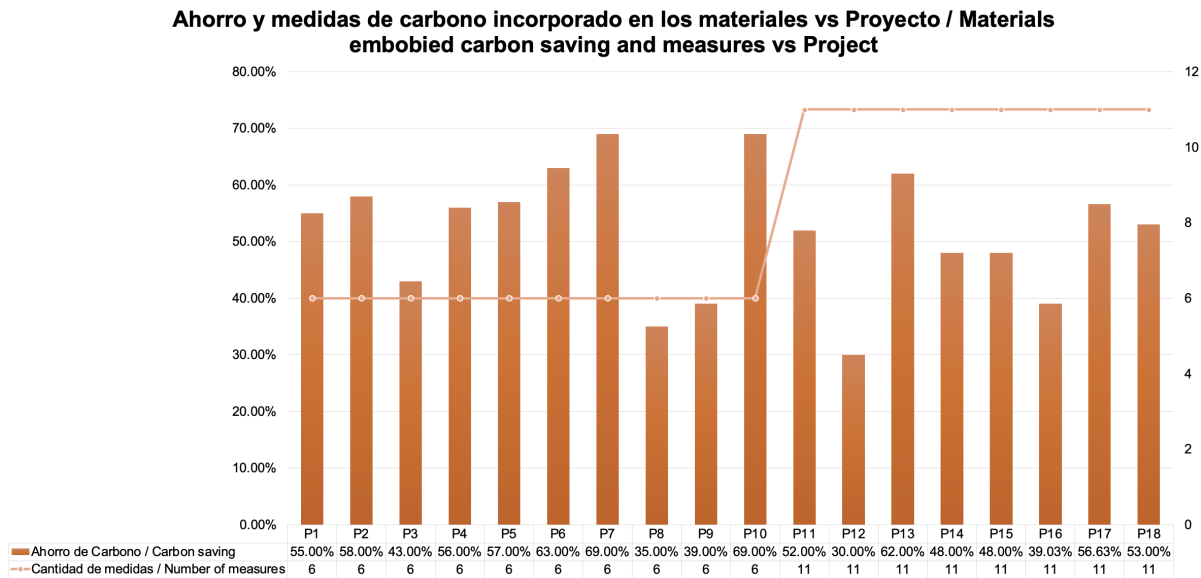


Figura 6. Ahorro de carbono incorporado contra medidas de materiales del proyecto. Fuente: Elaboración de los autores.

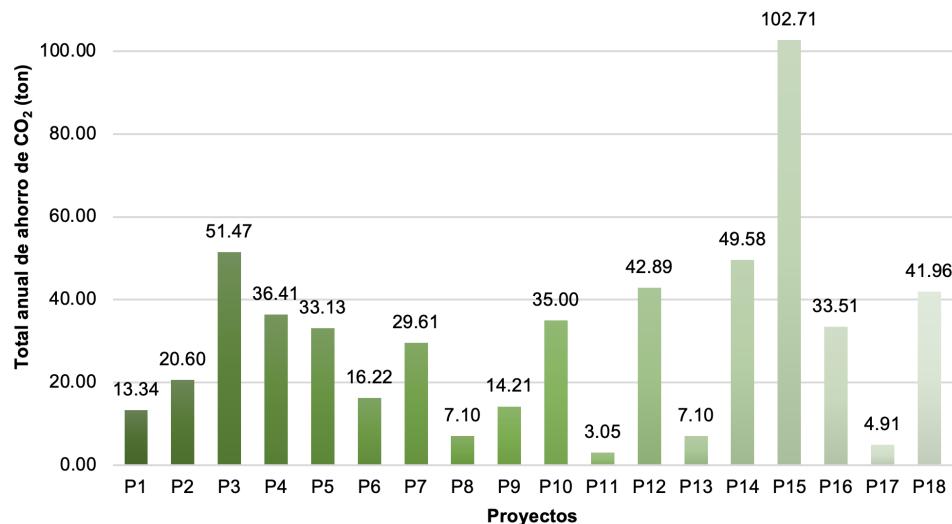


Figura 7. Total anual de ahorro de CO₂ por Proyecto. Fuente: Elaboración de los autores.

de carbono incorporado logrado, no necesariamente está relacionado a la cantidad de medidas implementadas. Esto debido a la elección del material sostenible, para la construcción de las edificaciones.

AHORRO TOTAL ANUAL DE CO₂

El valor promedio de mitigación de CO₂ para los edificios en estudio, se sitúa en 30.12 toneladas de CO₂ equivalente al año. Es esencial señalar que la mitigación de CO₂ varía significativamente, oscilando entre 3.05 y 102.71 toneladas. Este contraste en el ahorro de CO₂ entre edificios, se atribuye a la diversidad en la envergadura de las estructuras evaluadas. En particular, se observa que Laureles logró el mayor ahorro anual de CO₂, alcanzando las 102.71 toneladas, seguido por Parque Verde Sur con 51.47 toneladas. Por otro lado, el Edificio Manco Cápac registró el ahorro más bajo, con tan sólo

3.05 toneladas de CO₂. La Figura 7 ilustra de manera gráfica el ahorro anual total de CO₂ para cada uno de los edificios evaluados.

DISCUSIÓN

Del análisis realizado, la mayoría de los proyectos estudiados, están enfocados en la ciudad de Lima y los resultados podrían variar si se obtienen más datos de otros sectores del Perú, debido a las características geográficas y normativas.

En Perú, la implementación de EDGE ha generado un impacto positivo en el aspecto energético de las edificaciones. Las medidas adoptadas incluyen la reducción de la proporción de vidrio en la fachada exterior, dispositivos de control solar externo, aislamiento del techo, aislamiento térmico de

paredes externas, vidrio con revestimiento de baja emisividad, bombillas ahorradoras de energía y controles de iluminación. El ahorro promedio energético alcanzado fue del 27.6%, ligeramente inferior al 29.7% registrado en un estudio similar en Sudáfrica (Isimbi y Park, 2022), atribuible a las condiciones climáticas y normativas locales. Así también, Kartikasari et al. (2018) resaltan la mejora de la eficiencia energética con el uso de EDGE en Indonesia.

En el caso de Latinoamérica, en Colombia, los nuevos proyectos certificados como edificios sostenibles más del 50% cumple con los porcentajes mínimos de reducción de consumo y energía; en el caso de la metodología EDGE, el 24% no cumplía con el porcentaje de reducción de energía, el 12% del consumo de agua y el 6% de ambos, esto no implica una contradicción en lo que determina una construcción sostenible ya que, la obtención de certificaciones como EDGE o LEED, incluye otros ítems cuantificables que permiten alcanzar la certificación (Rodríguez et al., 2021). Por otro lado, con la implementación de EDGE, en el caso de México se obtuvieron reducciones significativas en demandas de energía (38.52%) y consumo de agua (46%) (Velázquez Robles et al., 2022). En el caso de Perú, EDGE puede ser una herramienta importante para el ahorro de agua, debido a que gran parte de la población de Perú, se encuentra en la costa, donde el agua termina siendo un recurso importante (Samamé-Zegarra, 2021).

Bajo la categoría de agua, las medidas adoptadas en Perú incluyeron cabezales de ducha que ahorran agua, grifos eficientes, inodoros eficientes y un sistema de tratamiento y reciclaje de aguas residuales, que lograron un ahorro promedio del 41.92%. Este resultado supera el ahorro del 31% registrado en un estudio comparativo. Los edificios peruanos también optaron por una fuente alternativa de agua potable, a través del sistema de tratamiento y reciclaje de aguas residuales. Así también, una investigación realizada en México muestra un ahorro en el consumo del agua del 46%, donde se emplearon medidas como duchas y grifos de bajo caudal, el sistema recogido de aguas pluviales y aguas grises recicladas (Velázquez Robles et al., 2022).

En cuanto al carbono incorporado, los materiales más utilizados en Perú fueron la losa de concreto reforzada in situ, los bloques de concreto hueco de peso mediano y la baldosa cerámica. El ahorro promedio de carbono incorporado fue del 51.81%, ligeramente inferior al 54% observado en Sudáfrica, donde se tuvo en cuenta la reutilización de elementos estructurales.

Además de los resultados obtenidos, los proyectos certificados bajo el estándar EDGE han demostrado claros beneficios ambientales, especialmente en la reducción de emisiones de CO₂ equivalente a lo largo de todo el ciclo de vida de las edificaciones. Estos impactos positivos se deben a la implementación de estrategias de eficiencia energética, uso eficiente del agua y selección de materiales sostenibles, consolidándose EDGE como una herramienta esencial para la promoción de estrategias de construcción sostenible y la mitigación del cambio climático.

CONCLUSIONES

El siguiente estudio muestra el impacto de la certificación EDGE en las edificaciones del Perú, se analizaron 557 unidades de 18 edificios residenciales certificados desde el 1 de noviembre de 2017 hasta 29 de enero de 2024, obteniéndose en promedio 27.6% de ahorro en Energía, 41.2% en Agua y 51.81% en Carbono Incorporado en Materiales.

Los edificios lograron reducir el consumo de energía mediante estrategias como la optimización de la proporción ventana-muro, el empleo de aislamiento térmico en la envolvente, vidrios de baja transmitancia térmica y calentadores de agua a gas. Además, se implementaron medidas de eficiencia hídrica, como griferías y equipos sanitarios de bajo consumo, así como una fuente alternativa de agua potable, a través de una planta de tratamiento de aguas grises para reutilización en descargas de inodoros y riego de áreas verdes. En cuanto a la construcción, se destaca el uso frecuente de losa de concreto reforzada in situ y losa aligerada de concreto en pisos, mientras que en muros exteriores se prefirieron los reforzados in situ y bloques de concreto con huecos de peso mediano. Los bloques de concreto con huecos de peso mediano denso, fueron predominantes en muros interiores. Baldosas de cerámica y pisos de madera laminada fueron los acabados de pisos más comunes y el aluminio fue el material preferido para los marcos de ventanas. En prácticas de aislamiento, se observó una frecuente utilización de ladrillos de poliestireno en losas de techos y en las losas con contacto directo al terreno.

La investigación presenta limitaciones en cuanto a la cantidad de estudios, debido a que sólo se analizaron 18 certificados finales, los resultados podrían variar si se tiene una mayor cantidad de proyectos. Los autores, sugieren replicar el siguiente estudio entre otros países para ver el impacto de la certificación EDGE, así también realizar análisis para explorar si existe una correlación entre los m² y los ahorros obtenidos. Así también, se sugiere investigar cuáles son los factores que generan la adopción de la certificación EDGE u otras certificaciones ambientales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agyekum, K., Akli-Nartey, E. E. K., Kukah, A. S., y Agyekum, A. K. (2023). Importance-performance analysis (IPA) of the indoor environmental quality (IEQ) of an EDGE-certified building in Ghana. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 41(1), 73–95. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-03-2021-0040>
- Aini, T. N., y Tarigan, S. G. (2023). Analysis of the EDGE Rating System Implementation in PKN STAN Buildings. *Architectural Research Journal (ARJ)*, 3(2), 46–49. <https://doi.org/10.22225/arj.3.2.2023.46-49>
- Atolagbe, U. K., Salihu, A., Mambo, A. D., y Kumar, E. (2023). Accounting of Carbon Footprint and Energy Consumption of Nile University in Nigeria: A detailed and Systematic Approach. *2023 2nd International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Science (ICMEAS)*, 1, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICMEAS58693.2023.10379409>
- Ayanrinde, O., y Mahachi, J. (2023). *Scenario Method for Catalysing Circularity and Lowering Emissions in the Construction Sector/Real Estate, Nigeria* (pp. 388–402). <https://doi.org/10.4324/9781003267492-22>

- Azouz, M., y Elariane, S. (2023). Towards energy efficiency: retrofitting existing office buildings using smart technologies. *Journal of Engineering and Applied Science*, 70(1), 147. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00327-0>
- Beltrán-Méndez, O., y Nik-Bakht, M. (2018). Can “EDGE” be the Solution to Sustainability of Buildings in Colombian Market? In *Construction Research Congress 2018* (pp. 246–256). <https://doi.org/10.1061/9780784481301.025>
- Bochare, R., y Bagora, P. (2022). Comparative Analysis of Green Building Rating Systems for Residential House: A Case Study. *ECS Transactions*, 107(1), 7091. <https://doi.org/10.1149/10701.7091ecst>
- Cao, Y., Kamaruzzaman, S. N., y Aziz, N. M. (2022a). Green Building Construction: A Systematic Review of BIM Utilization. *Buildings*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/buildings12081205>
- Cao, Y., Xu, C., Kamaruzzaman, S. N., y Aziz, N. M. (2022b). A Systematic Review of Green Building Development in China: Advantages, Challenges and Future Directions. *Sustainability*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/su141912293>
- CCCS (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible). (2024). *Caso de negocio LEED en Latinoamérica*. <https://www.cccs.org.co/wp/mitigacion/caso-de-negocio-de-leed-en-latinoamerica/>
- Chavez-Finol, F., Trebilcock-Kelly, M., y Piderit-Moreno, M. B. (2021). Diseño de edificios de oficinas sustentables para promover ocupantes sustentables. *Hábitat Sustentable*, 11(2), 34–45. <https://doi.org/10.22320/07190700.2021.11.02.03>
- Dlamini, L. N., y Yessoufou, K. (2022). Residents and Professionals’s Perspectives on Energy and Water Consumption While Transiting from Conventional to Sustainable Housings in South Africa. *Sustainability*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/su14084498>
- Doan, D. T., Ghaffarianhoseini, A., Naismith, N., Zhang, T., Ghaffarianhoseini, A., y Tookey, J. (2017). A critical comparison of green building rating systems. *Building and Environment*, 123, 243–260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.007>
- Edge Buildings. (2024). *Archivo de estudios de proyectos y Nuevos estudios de proyectos*. <https://edgebuildings.com/project-studies/>
- Elkhapery, B., Kianmehr, P., y Doczy, R. (2021). Benefits of retrofitting school buildings in accordance to LEED v4. *Journal of Building Engineering*, 33, 101798. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101798>
- Ibrahim, H., SalahEldin Elsayed, M., Seddik Moustafa, W., y Mohamed Abdou, H. (2023). Functional analysis as a method on sustainable building design: A case study in educational buildings implementing the triple bottom line. *Alexandria Engineering Journal*, 62, 63–73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.07.019>
- IFC (International Finance Cooperation). (2021). *Guía del usuario de EDGE Versión 3.0*. <https://edgebuildings.com/wp-content/uploads/2022/07/2022001613SPAspa001.pdf?lang=es>
- Indriyati, C., y Izzah, S. (2022). Water Tower Conservation and Sriwijaya University Law Efficiency Based on Indonesian Green Building Certification. *Journal of Applied Science, Engineering, Technology, and Education*, 4(2 SE-Articles), 176–182. <https://doi.org/10.35877/454RI.asci99713>
- Isimbi, D., y Park, J. (2022). The Analysis of the EDGE Certification System on Residential Complexes to Improve Sustainability and Affordability. *Buildings*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/buildings12101729>
- Kapoor, P., Saberi, O., y Oliver, N. (2019). Green Urban Development: A methodology to calculate site and infrastructure related GHG emissions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 297(1), 12004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/297/1/012004>
- Kartikasari, F. D., Tarigan, E., Fransiscus, Y., y Lidyawati, T. (2018). Energy Saving Measures and Potential of Energy Efficiency at the University of Surabaya, Based on EDGE Simulation. In *2018 5th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, (pp. 89–92). <https://doi.org/10.1109/ICITACEE.2018.8576925>
- Li, C. Z., Zhao, Y., y Xu, X. (2019). Investigation of dust exposure and control practices in the construction industry: Implications for cleaner production. *Journal of Cleaner Production*, 227, 810–824. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.174>
- Marzouk, O. A. (2023). Zero Carbon Ready Metrics for a Single-Family Home in the Sultanate of Oman Based on EDGE Certification System for Green Buildings. *Sustainability*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/su151813856>
- ONU. (2021). Industrial Development Report 2022. *The Future of Industrialization in a Post-Pandemic World*. Overview. <https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2023-03/IDR-2022-OVERVIEW-es.pdf>
- Regalado-Espinoza, M., Manrique, J. G., Loreña, M. H., Coz, G. L., Machaca, Á. M., Valdivia, R. M., Varillas, C. N., Andia, C. Q., y Asto, D. R. (2021). *An Analysis of Leed Certification’s Adaptation to Design and Construction of Sustainable Buildings in Peru* [Discurso principal]. 2021 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias En Ingeniería (CONIITI), Colombia <https://doi.org/10.1109/CONIITI53815.2021.9619628>
- Rodríguez, A. M., Fernández, A. C. R., Rojas, L. V., Palma, F. P., y Oliveros, A. B. (2021). State of regulation and implementation of energy and water-saving measures in buildings in Colombia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 871(1), 12008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/871/1/012008>
- Saberi, O., y Kapoor, P. (2016). Virtual energy for comfort: To present discomfort and reward passive design in EDGE. *Proceedings - 9th International Windsor Conference 2016: Making Comfort Relevant, April*, 1325–1332.
- Samamé-Zegarra, E. K. (2021). Water Efficiency Evaluation Analysis Among Environmental Certification Methods: LEED, BREEAM, DGNB, HQE, EDGE, and BONO VERDE. In R. González-Lezcano (Ed.), *Advancements in Sustainable Architecture and Energy Efficiency* (pp. 275–291). IGI. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-7023-4.ch013>
- Setyowati, D. L., Trihatmoko, E., Wijayanto, P. A., y Amin, M. (2020). Simulating water efficiency management at UNNES Campus, Semarang, Indonesia using EDGE application. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 485(1), 12038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/485/1/012038>
- Tarigan, E., y Kartikasari, F. D. (2016). Simulation of Energy Savings in a Six Floor Library Building University of Surabaya. *3rd Engineering Science and Technology International Conference*, 1–4. <https://repository.ubaya.ac.id/28481/>
- Velázquez Robles, J. F., Picó, E. C., y Hosseini, S. M. A. (2022). Environmental performance assessment: A comparison and improvement of three existing social housing projects. *Cleaner Environmental Systems*, 5, 100077. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cesys.2022.100077>
- Villaseñor, M. (2021). *Breve Informe estado de certificaciones de sustentabilidad en la construcción países CEELA*. https://proyectoceela.com/wp-content/uploads/2023/01/20210430_Outcome-3_Estado-Certificaciones-Paises-CEELA.pdf

LA VOLUNTARIEDAD DE UNA CALIFICACIÓN ENERGÉTICA COMO CAUSA DE DESINFORMACIÓN EN LOS CONSUMIDORES Y PRÁCTICAS DE GREENWASHING

THE VOLUNTARY NATURE OF AN ENERGY RATING AS A CAUSE OF CONSUMER MISINFORMATION AND GREENWASHING PRACTICES

A VOLUNTARIEDADE DE UMA CLASSIFICAÇÃO ENERGÉTICA COMO CAUSA DE DESINFORMAÇÃO PARA OS CONSUMIDORES E DE PRÁTICAS DE GREENWASHING

RESUMEN

El objeto de esta investigación es la calificación de eficiencia energética de las viviendas comercializadas por inmobiliarias y constructoras en la comuna de Santiago, Chile. De este modo, se analizó, a la luz de la normativa vigente, la publicidad contenida en las páginas web de 45 proyectos inmobiliarios en venta durante el mes de junio del 2024. En cuanto a la metodología utilizada para llevar a efecto este estudio, se recurrió, por un lado, al método dogmático –propio de los estudios realizados en el ámbito jurídico– y, por otro, a los métodos empírico-analítico y comparativo. Los resultados permiten concluir que la voluntariedad del etiquetado energético y la regulación existente en este ámbito deja expuesto al consumidor inmobiliario a decisiones de compra desinformadas e incluso, a prácticas de greenwashing ya que, no le es posible comprobar la veracidad de las afirmaciones publicitarias realizadas. Todos los proyectos analizados tienen un valor que va desde las 2000 a las 4000 UF y apuntan, en consecuencia, a los consumidores pertenecientes a la clase media (sector C2 y C3).

Palabras clave

consumidor inmobiliario, greenwashing, ecoblanqueo o lavado verde de imagen, eficiencia energética, información veraz y oportuna, calificación energética de viviendas.

ABSTRACT

This research aims to review the energy efficiency rating of homes sold by real estate companies and construction firms in the city of Santiago. Thus, the advertising on the websites of 45 real estate projects for sale in June 2024 was analyzed in light of the current regulations. Regarding the methodology used to carry out this study, both the dogmatic method —typical of studies conducted in the legal field— and the empirical-analytical and comparative methods were employed. The results conclude that the voluntary nature of energy labeling and the existing regulations expose real estate consumers to uninformed purchasing decisions and even to greenwashing practices, as they cannot verify the truthfulness of advertising claims. All the analyzed projects are priced between 2,000 and 4,000 UF (US\$79,100 to \$158,200 – July 2024), consequently targeting consumers belonging to the middle class (C2 and C3 sectors).

Keywords

real estate consumer, greenwashing, eco-whitening or greenwashing, energy efficiency, truthful and timely information, energy rating of homes.

RESUMO

O objeto desta pesquisa é a classificação de eficiência energética de residências comercializadas por empresas imobiliárias e de construção na municipalidade de Santiago, Chile. Para tanto, a publicidade contida nos sites de 45 projetos imobiliários à venda durante o mês de junho de 2024 foi analisada à luz das normas vigentes. Quanto à metodologia utilizada para realizar este estudo, recorreremos, por um lado, ao método dogmático - típico de estudos realizados no âmbito jurídico - e, por outro, aos métodos empírico-analítico e comparativo. Os resultados levam à conclusão de que a natureza voluntária da etiquetagem energética e as regulamentações existentes nesse campo deixam o consumidor de imóveis exposto a decisões de compra desinformadas e até mesmo a práticas de greenwashing, já que não é possível verificar a veracidade das alegações publicitárias feitas. Todos os projetos analisados têm um valor que varia de 2.000 a 4.000 UF (de 436 a 872 mil reais – julho 2024) e, consequentemente, são voltados para consumidores de classe média (setor C2 e C3).

Palavras-chave:

consumidor imobiliário, greenwashing, eco-lavagem ou greenwashing, eficiência energética, informações verdadeiras e oportunas, classificação energética de residências.

INTRODUCCIÓN

No sólo la etapa de construcción de un inmueble es fuente de contaminación. También lo es la de su operación debido a las emisiones producidas como consecuencia del uso del inmueble y al consumo de energía y agua necesarios para su funcionamiento (Alavedra *et al.*, 1997). De hecho, los edificios son una de las principales fuentes de demanda energética y productores de grandes emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera (Wegertseder *et al.*, 2014; Chavarry *et al.*, 2023). En esta línea, el factor que más influye en el impacto medioambiental de los edificios durante su vida útil dice relación con el consumo de energía para calefacción y refrigeración (Castillo, 2019).

El diseño eficiente de los edificios puede jugar un rol fundamental en la lucha contra el cambio climático. Así, la incorporación de estrategias dirigidas a disminuir el impacto en el medio ambiente y aumentar la ecoeficiencia en toda cadena de valor, permite reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). En este sentido, se afirma que el consumo de energía debe ser considerado como un indicador de sustentabilidad y disminuir su uso permitiría acercarse a los principios de construcción sostenible (Muñoz *et al.*, 2012). Sin embargo, además de los beneficios ambientales, la eficiencia energética significa un ahorro económico para los usuarios del edificio (Chavarry *et al.*, 2023).

De acuerdo con un estudio realizado en febrero de 2021¹, los consumidores chilenos se muestran cada vez más interesados en adquirir viviendas sustentables o eficientes. En efecto, dicho estudio arrojó que un 80% de quienes pretenden comprar una vivienda en la Región Metropolitana valoraría que esta sea sustentable, pero, en la mayoría de los casos, el fundamento de la decisión no descansa, como podría pensarse, en el cuidado del medio ambiente, sino en el ahorro esperado durante el uso de la vivienda.

No obstante, se observa que la mayoría de los proyectos residenciales son publicitados sin hacer mención alguna a la eficiencia energética entre sus bondades o atributos inmobiliarios. Y si bien, existen proyectos que cuentan con calificación energética, sólo exhiben el sello respectivo, pero no explican cuáles son los atributos o amenidades que hacen que las viviendas o el proyecto cuente con dicha calificación y las implicancias que de ello se derivan. Por otra parte, el escenario descrito facilita

la existencia de publicidad engañosa y particularmente de greenwashing que, en términos generales consiste en comercializar un producto como sustentable o respetuoso con el medio ambiente cuando realmente no lo es (Lyon y Maxwell, 2011).

Es así como algunas inmobiliarias y constructoras ofrecen mediante su publicidad inmuebles con diferentes atributos a los que les arrogan la bondad de producir ahorro de energía. La falta de información al respecto hace que este tipo de mensajes sea determinante en la decisión de compra. Sin embargo, el contar con determinados atributos –por ejemplo, termopaneles o sistemas especiales de ventilación– no hace necesariamente que la vivienda sea eficiente o produzca un ahorro de energía. En esta línea, se ha sostenido que es posible constatar una proliferación de afirmaciones medioambientales engañosas en la publicidad de proyectos inmobiliarios (Tateishi, 2018; Shahrin *et al.*, 2017; Cheng *et al.*, 2023).

En este contexto, el objetivo de esta investigación es dilucidar cómo influye la voluntariedad del etiquetado energético en el contenido de la publicidad de los proyectos inmobiliarios y con ello, determinar en qué posición se encuentran los consumidores inmobiliarios frente a las afirmaciones publicitarias relativas al ahorro y eficiencia energética.

METODOLOGÍA

En cuanto a la metodología empleada se recurrió al método dogmático –propio de los estudios realizados en el ámbito jurídico– con el objeto de analizar la normativa vigente en materia de aislación térmica y eficiencia energética; específicamente, la Ley N°21.305, de 2021 sobre Eficiencia Energética (LEE) y la Reglamentación Térmica contenida en el artículo 4.1.10 del D.S. N°47, de 1992 [MINVU]. Se utilizó también para determinar si, a la luz de la Ley N°19.496, de 1997 sobre Protección a los Derechos de los Consumidores (LPDC), las afirmaciones publicitarias relativas a la eficiencia energética se integran o no al contrato de compraventa. A su vez, se estudió la figura de la publicidad engañosa y particularmente, el greenwashing; todo esto, desde una perspectiva jurídica.

Por otro lado, se usó, el método empírico-analítico para determinar la importancia que las inmobiliarias y constructoras le otorgan a la eficiencia energética a la hora

¹ El estudio fue realizado por StatKnows por encargo y con apoyo técnico de EBP Chile. La encuesta fue aplicada a una muestra probabilística integrada por 3.765 personas mayores de 20 años que se encontraban buscando una vivienda durante los últimos tres meses en la Región Metropolitana. El error muestral estimado es de 1,21%, con un nivel de confianza de 95%. Información disponible en: <https://www.elmostrador.cl/generacion-m/2021/02/22/encuesta-revela-amplias-oportunidades-del-nuevo-mercado-del-desarrollo-inmobiliario-para-el-ahorro-con-positivo-impacto-ambiental/>

de publicitar sus proyectos inmobiliarios y en particular, si los consumidores inmobiliarios se encuentran en condiciones de tomar una decisión de compra informada al momento de escoger su vivienda. De esta forma, se examinó la publicidad de 45 proyectos inmobiliarios ofrecidos en venta en la comuna de Santiago durante junio de 2024 difundida, a través de las páginas web de las respectivas inmobiliarias o constructoras a cargo.

Posteriormente, se utilizó el método comparativo para efectos de obtener datos estadísticamente representativos. A partir de ellos, pudimos identificar el porcentaje de proyectos cuya publicidad carece de la información necesaria en esta materia para tomar buenas decisiones de compra y también el de aquellos proyectos cuya publicidad derechamente puede ser calificada como engañosa o al menos confusa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

SUSTENTABILIDAD, EFICIENCIA ENERGÉTICA Y AISLACIÓN TÉRMICA

La denominada “construcción sustentable” busca optimizar los recursos en los procesos de planificación, diseño, construcción y operación de las edificaciones para minimizar el impacto sobre el medio ambiente y la salud de las personas (Convenio marco de Colaboración sobre Construcción Sustentable, 2012). Uno de sus elementos clave es la reducción del uso de fuentes energéticas. En este sentido, cabe destacar que la cantidad de energía utilizada para calefaccionar un inmueble depende mayormente de su aislación térmica. De hecho, las viviendas consumen casi un 15% de la energía total del país, la que se destina mayormente a calefacción (División de Energías sostenibles, Reporte de Resultados en el Sector Público Ley 21.305, 2022). Lo anterior evidencia la estrecha relación existente entre la mencionada Reglamentación térmica (RT) y la Ley sobre Eficiencia Energética (LEE).

La RT establece las condiciones mínimas de transmitancia térmica que deben cumplir los elementos que conforman la envolvente de la vivienda (artículo 4.1.10 N°1.A). Se entiende por envolvente “el mecanismo de un edificio para asegurar la habitabilidad y confort a su interior. Energéticamente es factor decisivo de eficiencia energética” (Escorcia *et al.*, 2012, p. 565). Por su parte, la transmitancia térmica fue definida por la Norma Chilena Oficial NCh 853-2007 (derogada el 2008) como el “flujo de calor que pasa por unidad de superficie del elemento y por grado de diferencia de temperaturas entre dos ambientes separados por dicho elemento”. Entonces, mientras más baja es la transmitancia térmica, mejor será la aislación de la vivienda y menor el gasto energético.

Los elementos de la envolvente de la vivienda

comprendidos en la RT chilena vigente en la actualidad son: las techumbres (incorporadas en ésta el año 2000), los muros perimetrales y, los pisos inferiores ventilados (ambos incluidos el 2007). Con todo, dichas condiciones mínimas son actualmente insuficientes, pues no contribuyen de manera efectiva a la eficiencia energética y al cuidado del medio ambiente (Encinas *et al.*, 2019; Escorcia *et al.*, 2012). Sus mayores deficiencias se vinculan con la zonificación térmica y el enfoque de las exigencias impuestas a la construcción (Caldera, 2012).

Por ello, a mediados del 2013 se inició el proceso de actualización de la RT. La propuesta original abarcaba aspectos esenciales para limitar la demanda energética y mejorar la calidad del ambiente al interior del inmueble (aislación térmica de pisos sobre terreno, puertas y ventanas; hermeticidad al aire y ventilación). Con todo, el 2021, cuando la norma resultante (denominada NTM 011) se encontraba ad-pertas de ser decretada, alrededor de 900 arquitectos manifestaron su rechazo argumentando que constituía una limitación a la libertad de diseño arquitectónico. La Asociación de Oficinas de Arquitectos (AOA) formó un grupo de trabajo para elaborar una propuesta alternativa, la que fue respaldada por la Cámara Chilena de la Construcción (CChC), y presentada al Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Trebilcock, 2023). El estancamiento en el proceso de actualización no sólo significó una afectación a los consumidores, sino también al cumplimiento de las metas del gobierno en materia medioambiental comprendidas en el Plan Nacional de Eficiencia Energética [2022-2026] de 2022.

Finalmente, el 16 de mayo del 2024, la Contraloría General de la República tomó razón del decreto que modifica la OGUC –específicamente sus artículos 4.1.10 y 4.1.10 bis– que actualiza los estándares y normas técnicas referidas al acondicionamiento térmico. Así entre otras cosas, incorpora mejoras en lo que dice relación con las exigencias térmicas de muros, pisos ventilados y sobrecimientos. Sin embargo, de acuerdo con la primera de sus normas transitorias, dichas modificaciones comenzarán a regir para las viviendas nuevas una vez transcurridos 18 meses desde su publicación en el Diario Oficial. En consecuencia, habrá que esperar más tiempo aún para constatar los efectos de dicha actualización.

La LEE, por su lado, en su artículo 3° inciso 2° dispone que los edificios de uso público, edificios comerciales, los edificios de oficinas y las viviendas deben contar con una calificación energética (CEV) similar a la de los automóviles o electrodomésticos, para obtener la recepción definitiva. De acuerdo con el “Manual de Procedimientos Calificación Energética de Viviendas en Chile” del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Manual CEV, 2019), la calificación energética de una vivienda “consiste en la determinación de su eficiencia energética, a través de un informe de calificación energética y una etiqueta de eficiencia energética”. En consecuencia, refleja cómo se comporta la edificación desde la perspectiva energética.

Más precisamente, se trata de “una estimación teórica de la demanda de energía para calefacción, enfriamiento, agua caliente sanitaria e iluminación”. Se presenta comparativamente respecto a una vivienda de referencia y cuenta con una escala de calificación de ocho niveles, que van desde la “A+” a la “G”, siendo esta última la menos eficiente (Manual CEV, 2019). Los proyectos inmobiliarios en proceso de construcción, por su lado, deberán contar con una “precalificación energética” de carácter transitorio. Entonces, la Precalificación se realiza en proyectos que cuentan con el respectivo permiso de edificación aprobado por el Director de Obras Municipales y la Calificación en proyectos que ya cuenta con la recepción definitiva (artículo 3 inciso 2° de la LEE).

Así, pareciera que la LEE vino a modificar el escenario en materia de sustentabilidad; no obstante, ésta aún no puede aplicarse a las viviendas. En efecto, tenía que comenzar a regir respecto de las viviendas en febrero del año 2023. Esto dado que, la misma ley dispuso que comenzaría a regir en lo tocante a los proyectos residenciales 12 meses después de la aprobación del reglamento que fija el procedimiento, exigencias y condiciones del otorgamiento de la calificación y precalificación energética y su publicidad; lo que debió realizarse, en febrero del 2022. El Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Minvu) no ha dictado el mencionado reglamento; sin embargo, el artículo 3° de la LEE dispone en su inciso final que, no obstante, “todo lo anterior se entiende sin perjuicio de la facultad de cualquier persona, natural o jurídica, de solicitar la calificación y precalificación energética, de conformidad a las normas legales vigentes”. De este modo, el etiquetado energético actualmente es voluntario tratándose de viviendas.

De acuerdo con la LEE, serán calificadas con la letra G las viviendas construidas antes del 2000 (que, por tanto, no cuentan con ninguna exigencia térmica); con la letra F las viviendas que cumplan con las exigencias para las techumbres y con la E, las que observen las exigencias aplicables a las techumbres, muros y pisos ventilados; es decir, aquellas que se ajusten a la actual RT. Por último, se calificarán con las letras C y D las viviendas con un adecuado ahorro y calidad del ambiente y con las letras A y B las viviendas con un alto propósito de eficiencia energética. Como se puede apreciar, las letras A, B, C y D sólo podrán ser asignadas a viviendas energéticamente más eficientes que el estándar actual de edificación (Figura 1).

Es importante tener en consideración que las letras son referenciales y existen rangos de ahorros de energía entre letras. De este modo, al final del día, la obtención de una buena calificación energética requerirá de un conjunto de factores; por lo tanto, también influirá en la calificación que se obtenga, por ejemplo, la orientación de la vivienda y, en consecuencia, la exposición a la radiación solar. Así, dos viviendas pueden tener el mismo estándar de construcción, pero un desempeño energético diferente

ESCALA DE CALIFICACIÓN CEV



Figura 1. Escala de calificación CEV. Fuente: Minvu (2019).

en razón de su orientación.

La calificación energética que exige la LEE busca informar a los consumidores sobre los gastos energéticos del inmueble con anterioridad a su decisión de compra mediante el otorgamiento de una etiqueta de eficiencia energética y un informe de calificación. La etiqueta entrega información resumida del desempeño energético de la vivienda evaluada y cuenta con una versión para la precalificación y con otra para la calificación energética de viviendas (Manual CEV, 2019). Asimismo, existe un Sello de Eficiencia Energética (Figura 2) que muestra los principales indicadores de eficiencia energética de la vivienda o del conjunto habitacional; en este último caso dicho sello considerará un porcentaje ponderado de ahorro energético (Manual CEV, 2019).

LA PUBLICIDAD DEL PROYECTO INMOBILIARIO COMO PARTE INTEGRANTE DEL CONTRATO DE COMPRAVENTA

La publicidad suele describir proyectos habitacionales como eficientes energéticamente, lo que resulta atractivo para los consumidores por el ahorro que significa. Cabe preguntarse, entonces, si tales afirmaciones se integran al contrato de compraventa en consecuencia, el consumidor puede demandar por su incumplimiento.

Se desprende del artículo 1 N°4 de la LPDC (norma del artículo 18 inciso 7° del DFL N°458, de 1976 que aprueba la Ley de Urbanismo y Construcciones [LGUC]) que, en la publicidad existe una faz objetiva dirigida a informar a los consumidores y una faz subjetiva encaminada a persuadirlos de modo que estos tomen la decisión final de adquirir el bien publicitado. Sólo la faz objetiva de la publicidad se integra al contrato de compraventa y puede ser exigida por los consumidores (Mombert, 2007; De la Maza, 2013a).

Para determinar si las afirmaciones publicitarias sobre



Figura 2. Sello de Eficiencia Energética. Fuente: Manual CEV (2019), pp. 59-60.

eficiencia energética sin respaldo científico alguno, pertenecen a la faz objetiva (y, en consecuencia, se integran al contrato) se debe tener presente que el fundamento de la integración publicitaria es la tutela “de la confianza legítima de las expectativas razonables que se ha formado el consumidor con base a las expresiones que, precontractualmente ha emitido el oferente” (Isler, 2020). La clave, entonces, está en la protección de esa confianza (López, 2019). Es decir, se deben integrar al contrato los datos de la publicidad en los que el consumidor medio puede confiar razonablemente (De la Maza, 2013b); entendiendo por tal aquel sujeto intrínsecamente vulnerable a quien resulta imposible procesar adecuadamente y en el tiempo requerido la información que se encuentra disponible en el mercado (Isler, 2011). En conclusión, deben respetarse aquellas condiciones verosímiles para un consumidor medio (Isler, 2020).

Sin embargo, según lo analizado en esta investigación, deben considerarse también los siguientes aspectos: 1) la publicidad suele describir ciertos atributos a los que, dadas sus características, les atribuyen la bondad de producir un ahorro de energía; 2) muchos de esos atributos tienen un funcionamiento complejo o difícil de entender; por ejemplo, muros revestidos con doble capa, envolvente térmica de alto rendimiento, sistema EIFS, ventilación de alta eficiencia, ventilación convectiva, entre otros; 3) en la mayoría de los casos, el consumidor sólo podrá corroborar si efectivamente producen el ahorro prometido transcurrido un tiempo; de hecho, en muchas situaciones será muy difícil de comprobar; 4) frente a la falta de comprensión o información disponible, los consumidores suelen recurrir a la “personalidad de la marca” como fuente alternativa de información (Sander *et al.*, 2021; Aaker, 1997 y; Freling y Forbes, 2005), que cumple, un rol importante en la credibilidad del anuncio (Sanders *et al.*, 2021, p. 436) y, 5) la mayoría de los proyectos inmobiliarios son comercializados en verde; es

decir, cuya construcción no se encuentra terminada y, por lo tanto, no cuentan con la recepción definitiva (Caprile, 2008). En tales casos, los consumidores no podrán revisar por sí mismos los atributos del inmueble o su funcionamiento, ya que puede que no esté listo el piloto.

De acuerdo con lo señalado se sostiene que, tales expresiones generan una confianza razonable en los consumidores que, en consecuencia, podrán demandar la integración publicitaria a causa de su incumplimiento.

EL GREENWASHING COMO TIPO ESPECIAL DE PUBLICIDAD ENGAÑOSA Y EL INCUMPLIMIENTO DE LOS DEBERES DE INFORMACIÓN

Ley n°19.496 de 2019, en su artículo 28 de la LPDC dispone que, “comete infracción a las disposiciones de la ley, el que, a sabiendas o debiendo saberlo y, a través de cualquier tipo de mensaje publicitario induce a error o engaño respecto de ciertas características y condiciones del producto que son descritas en cada uno de sus literales”. Precisamente, su letra f) alude a la condición de no producir daño al medio ambiente y a la calidad de vida. Si bien la LPDC no habla expresamente de greenwashing o lavado verde de imagen, sí reconoce la conducta, configurándose una hipótesis especial de publicidad engañosa (Fernández, 2021). Sin embargo, la norma no contempla todas las manifestaciones de esta conducta.

En este sentido, el 31 de mayo de 2022 se presentó un proyecto de ley que, de acuerdo con su artículo 1° pretende prevenir, regular y sancionar el greenwashing o lavado verde de imagen (Boletín N°15.044-12, 2022). Su artículo 2 define la figura, pero también consagra otros conceptos relevantes. Uno de ellos es el de “publicidad de la sustentabilidad”, el que tiene importancia para entender el greenwashing. De conformidad con la norma, consiste en “toda la publicidad que comunica prácticas

responsables y sustentables de las empresas, sus marcas, productos y servicios". Asimismo, en su artículo 2 letra b), define "lavado verde de imagen" como "La publicidad de la sustentabilidad efectuada en contravención a lo dispuesto en la presente ley". Como se aprecia, es una norma abierta que exige darle contenido caso a caso.

El proyecto también busca reemplazar el mencionado artículo 28 letra f) de la Ley n°19.496, (Isler, 2020)). De conformidad con la propuesta, comete infracción el proveedor de un producto que, a través de la publicidad induce a error o engaño respecto de: "Su condición de no producir daño al medio ambiente o a la calidad de vida o de tener características que se expongan explícita o implícitamente como beneficiosas para el medio ambiente...". Si se compara la propuesta con la norma vigente, es posible advertir que esta última, al menos en su literalidad, omite aquel supuesto contemplado en el proyecto que consistente en publicitar características del bien como beneficiosas para el medio ambiente y las personas cuando, realmente, no lo son. Esto es justamente lo que ocurre cuando el proveedor atribuye a la vivienda eficiencia energética, pues, de alguna forma, está señalando que aquella colaborará en la eliminación de la huella de carbono cuando no es así.

Cuando el error o engaño dice relación con la eficiencia energética de una vivienda, la conducta también se relaciona con la letra c) de la ley mencionada, (Isler, 2020) que alude a "las características relevantes del bien o servicio destacadas por el anunciante o que deban ser proporcionadas de acuerdo a las normas de información comercial". La obtención de un beneficio directo con la compra de la vivienda consistente en el ahorro de dinero a causa de la disminución del gasto energético, siendo una característica relevante que influye en la decisión de compra. Sin embargo, el proyecto se encuentra en tramitación (primer trámite constitucional).

Así, dada la escasa regulación que actualmente tiene el greenwashing, diversos actores han propuesto normas sobre la materia. Un ejemplo de esto es la "Guía de Comunicación Verde" –documento elaborado el 2014 por Fundación Chile en colaboración con diversos actores como, Sernac, el Consejo de Autorregulación y

Ética Publicitaria, y el Ministerio del Medio Ambiente. El documento habla de los "siete pecados del greenwashing". Al analizar la publicidad de viviendas, es posible destacar dos de "pecados"². El primero es el de "la falta de pruebas" que se refiere a aquellos supuestos en que los atributos ambientales comunicados no pueden ser corroborados por información de confianza o certificaciones. En este sentido, el Código de Ética Publicitaria del Consejo de Autorregulación y Ética Publicitaria (Conar) dispone que, las aseveraciones del tipo "compatible con el medio ambiente", "ecológicamente seguro", "verde", "sustentable" o cualquier otra que sugiera que el producto no impacta al medio ambiente o sólo lo hace positivamente, deben contar con una clara demostración que las sustente (artículo 27).

Por otra parte, la LPDC consagra "el derecho a una información veraz y oportuna sobre los bienes y servicios ofrecidos, su precio, condiciones de contratación y otras características relevantes de los mismos..." (artículo 3 letra b)). Constituye entonces un deber para el proveedor entregar dicha información. En esta parte, no debe olvidarse que las inmobiliarias y las constructoras que se dedican a la venta de inmuebles son proveedores de conformidad con la ley. La Organización Internacional de Asociaciones de Consumidores (IOCU) refiriéndose a la experiencia comparada afirma que, un consumidor educado e informado tiene un comportamiento más regular en el mercado. Cualquier tipo de toma de decisiones requiere la mayor información posible y si bien, la generación de información siempre tiene un costo, el consumidor estará dispuesto a pagarlo en la medida que ella le reporte un beneficio (Barrientos, 2024). No obstante, se advierte que, no existe mayor conocimiento de lo que implica la eficiencia energética de una vivienda, en qué consiste la CEV u otros instrumentos en materia de construcción sustentable (Jiménez et al., 2023). En general, se observa que tampoco existen campañas lideradas por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, el Ministerio de Energía, el Sernac o de alguna asociación de consumidores dirigidas a educar a los consumidores en estas materias.

De acuerdo con el artículo 3 inciso 3° de la LEE, tanto la etiqueta como el informe de eficiencia energética

2 Los pecados restantes son los siguientes: 3) Pecado de la imprecisión (*Sin of Vagueness*): consiste en la vaguedad que se utiliza a la hora de mencionar los atributos ambientales del producto respectivo, los que pueden confundir al consumidor; 4) Pecado de la irrelevancia (*Sin of irrelevance*): se mencionan como atributos requisitos mínimos exigidos por ley; 5) Pecado del menor de los males (*Sin of lesser of two evils*): se presenta cuando, por ejemplo, una determinada empresa se declara líder en relación con su competencia en el cuidado del medioambiente, pero por la naturaleza del producto, tiene un impacto ambiental o social importante. Por ejemplo, los cigarrillos orgánicos y; 6) Pecado de mentir (*Sin of fibbing*): la empresa se autoproclama como verde en virtud de argumentos que son falsos; por ejemplo, alude a algún tipo de certificación con la que realmente no cuenta. "pecado del intercambio oculto" (*Sin of the Hidden trade-off*) que consiste en aquella publicidad que se basa en un grupo de atributos, pero que deja de lado otros que pueden tener igual o mayor impacto ambiental y social. Fuente: Guía de Comunicación Verde, 2014, p. 21.

deberán ser incluidos en la publicidad del proyecto. Ambos constituyen, de acuerdo con esta ley, información básica comercial la que está definida en el artículo 1° N°3 de la LPDC como “los datos, instructivos, antecedentes o indicaciones que el proveedor debe suministrar obligatoriamente al público consumidor, en cumplimiento de una norma jurídica”. Lo anterior denota la importancia que el legislador entrega al contenido del etiquetado y del respectivo informe de eficiencia energética.

Con todo, más allá de la consagración expresa de este deber en la LEE y de la falta del correspondiente reglamento que pueda darle operatividad, lo cierto es que la LPDC impone el deber de informar y establece los estándares que tiene que cumplir dicha información. Esto lleva a concluir que la información relativa a la eficiencia energética debiera ser entregada. Sin embargo, se observa que, en general las inmobiliarias y constructoras que se someten voluntariamente a la calificación de eficiencia energética no transmiten las implicancias de la calificación obtenida. Por lo tanto, aquella difícilmente puede ser entendida por

los consumidores. De hecho, no se trata de cualquier información sino de una sumamente compleja; por lo que, constituye un verdadero desafío establecer cómo ésta debe darse a conocer a los consumidores para su adecuada comprensión. Dicha problemática deberá ser resuelta por el reglamento respectivo.

Cabe destacar que, el artículo 3 del proyecto de ley N°19.496 de 2019 pretende prevenir, regular y sancionar el greenwashing, también reitera y especifica ciertos deberes de información establecidos en la LPDC. Así, “las empresas que efectúen publicidad de la sustentabilidad deberán entregar información completa, veraz, verificable, comprensible y precisa y no podrán omitir antecedentes relevantes que puedan inducir a error”. De aprobarse esta ley, corresponderá determinar en cada caso el alcance de este deber a la luz de la LPDC. A su vez, establece que las empresas que efectúen publicidad de sustentabilidad deberán mantener disponible, accesible y permanentemente actualizada en sus sitios web la información sobre sus prácticas ambientales.

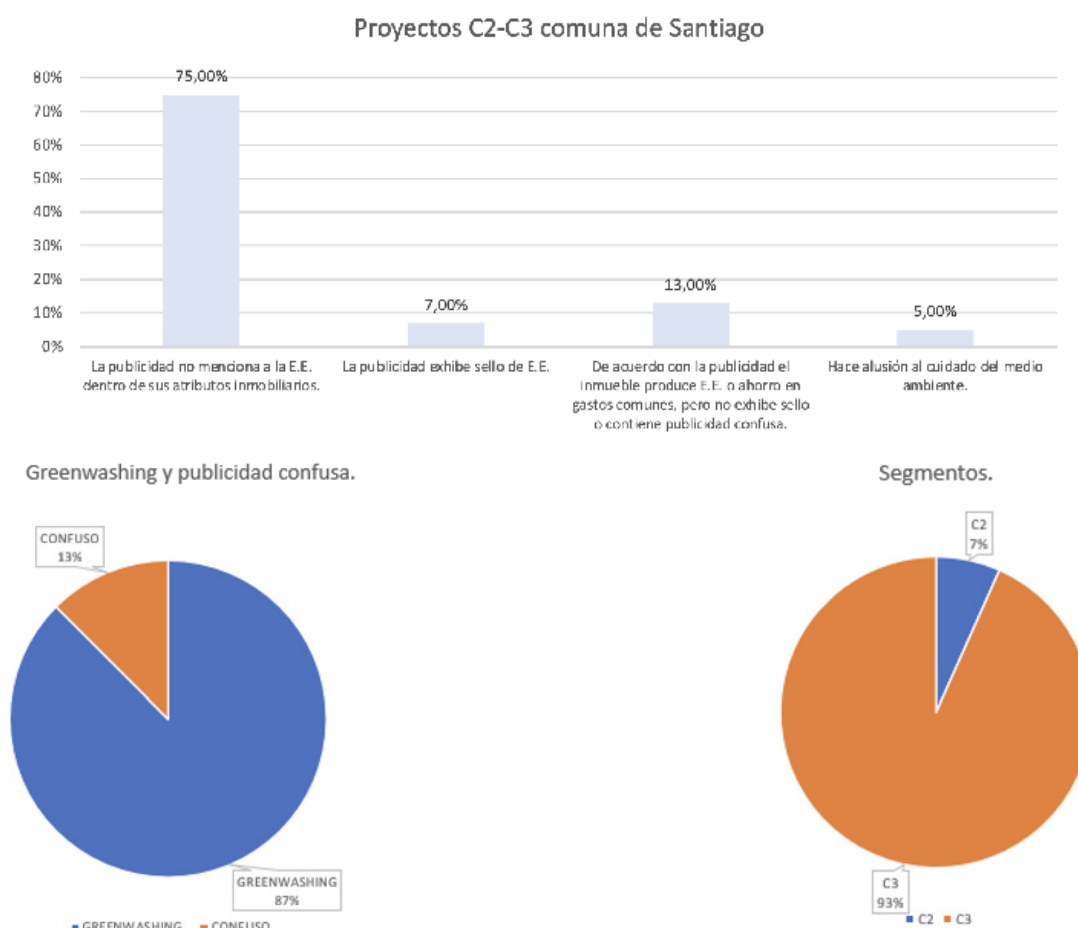


Figura 3. Resultados obtenidos del análisis de la publicidad difundida en 45 proyectos inmobiliarios ubicados en la comuna de Santiago, relativa a la eficiencia energética. Fuente: Elaboración del autor.

RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DEL ESTUDIO DE LA PUBLICIDAD DE LOS PROYECTOS INMOBILIARIOS EN VENTA

Se examinó la publicidad 45 proyectos inmobiliarios ofrecidos en venta en la comuna de Santiago durante el mes de junio de 2024 que fue difundida a través de las páginas web de las correspondientes inmobiliarias o constructoras. Las unidades de todos los proyectos tienen un valor desde las 2000 hasta las 4000 UF. El examen de la publicidad relativa a la eficiencia energética de las viviendas se hizo a la luz de la LPDC.

A continuación, se ofrece un panorama general de la publicidad sobre eficiencia energética que se hace de los proyectos inmobiliarios en venta y de la información que cuentan los consumidores en esta materia. La publicidad analizada fue dividida de acuerdo con los siguientes criterios: a) aquella que no menciona la eficiencia energética (EE) como uno de sus atributos enfocándose en otras amenidades; b) aquella que exhibe sello de calificación energética (CE) sea éste el que entrega el Ministerio de Vivienda y Urbanismo u otra entidad; c) aquella publicidad que ofrece eficiencia energética o ahorro en gastos comunes dentro de sus atributos sin exhibir sello de EE o una determinada calificación sin la posibilidad de deducir que el proyecto se haya sometido a algún proceso de calificación y, d) aquella que alude al cuidado del medio ambiente y la sustentabilidad. Posteriormente en consideración de los precios de las unidades en venta, se estableció el sector socioeconómico al que estaba dirigido y se distinguió entre las modalidades de venta utilizadas (en blanco, en verde, con entrega inmediata). Dicho panorama se expone a través de los siguientes gráficos (Figura 3).

Como se puede observar, la publicidad de 34 proyectos (correspondiente a un 75%) no hace referencia alguna a eficiencia energética, ahorro de energía, disminución de costos o cuidado del medio ambiente. Es posible que esto no se deba sólo a la voluntariedad del etiquetado energético, sino también al hecho que los consumidores tienen desconocimiento de lo que aquello significa. Por tanto, los consumidores de clase media pertenecientes a los segmentos de categorización social C2 y C3 considerados en los valores de las unidades en venta, parecen valorar otros atributos o características como la conectividad, el equipamiento de los espacios comunes e incluso, espacios especiales para las mascotas. En consecuencia, en todos estos casos, falta información que resulta relevante a la hora de tomar la decisión de compra; sin embargo, esto no es advertido por los consumidores debido a

la escasa información disponible y la ausencia de planes o programas dirigidos a la educación de los consumidores en estas materias.

En relación al resultado del estudio de la publicidad, se extrajo que solo 3 proyectos inmobiliarios de los 45 evaluados, equivalente a un 7%, fueron sometidos al proceso de calificación energética. Sin embargo, en la gran mayoría de los casos, se omite explicar qué significa o qué implicancias tiene la calificación obtenida. De hecho, sólo en uno de los proyectos se entregó información más acabada sobre este punto.

Por otra parte, La publicidad de 6 proyectos revisados (que corresponde a un 13%) puede calificarse como constitutiva de greenwashing, pues afirma que el proyecto o sus unidades son eficientes o producen un ahorro de energía y con ello, una disminución en los costos de calefacción o en los gastos comunes. Sin embargo, no exhibe la CEV u otro tipo de certificación o respaldo científico que permita corroborar dichas afirmaciones. De esta forma, aun cuando el etiquetado energético es voluntario, lo cierto es que, la publicidad de tales proyectos no se ajusta a las normas comprendidas en la LPDC y a los deberes de información exigibles a las inmobiliarias y constructoras en su carácter de "proveedoras". Cabe destacar que, de conformidad con el artículo 24 de la LPDC, la publicidad engañosa hace incurrir al infractor en una multa de hasta 1500 UTM. La norma agrega que, si dicha publicidad incide en cualidades del producto que afecten el medio ambiente podrá imponerse una multa de hasta 2250 UTM. De aprobarse el proyecto de ley que pretende regular el greenwashing, tales multas serán considerablemente más altas, sin embargo, no siempre resulta fácil advertir que se utilizaron prácticas de este tipo.

Durante la investigación se identificó una publicidad calificada como "confusa" porque, si bien no habla expresamente de "eficiencia energética" o "ahorro"; alude a ambientes más confortables durante todo el año o a viviendas capaces de mantener estándares de temperatura agradable o de confort térmico, que generalmente se hace luego de mencionar ciertos atributos inmobiliarios vinculados con la aislación térmica. En estos casos, es posible que el consumidor deduzca a partir de dichas afirmaciones que la vivienda es eficiente o implicará un ahorro en el gasto de energía y por lo tanto, de sus costos. No obstante, la calificación de publicidad "engañosa" es más discutible. La publicidad de uno de los 6 proyectos mencionados, posee estas características.

La publicidad de tan sólo 2 proyectos alude de alguna forma al cuidado del medio ambiente. Este número es coherente con los resultados del estudio mencionado anteriormente, pues refleja que los consumidores, por regla general no se interesan tanto en la posibilidad de disminuir la huella de carbono o en el carácter ecológico que pueda detentar la vivienda.

CONCLUSIONES

La voluntariedad del etiquetado energético se traduce, en la práctica, en la falta de información disponible en materia de eficiencia energética, en información incompleta o que es entregada sin un respaldo científico favoreciendo de este modo prácticas como el greenwashing. Dicha desinformación deja a los consumidores en una posición desmejorada, pues les impide tomar la decisión de compra que resulte más adecuada a sus necesidades e intereses.

De conformidad con la LEE, la información contenida en el informe de calificación energética debe incluir la publicidad del proyecto inmobiliario; por lo tanto, constituye un desafío pendiente establecer la forma en que ésta deberá darse a conocer a los consumidores para su adecuada comprensión, sobre todo tomando en consideración su complejidad y carácter sumamente técnico. Lo anterior, deberá acompañarse, necesariamente, de capacitaciones o planes de cumplimiento dirigidos a las inmobiliarias y constructoras y por otro, de planes educativos enfocados en los consumidores.

La normativa vigente que regula la publicidad engañosa permite sancionar al proveedor que recurre a éstas al ofrecer sus productos con multas a beneficio fiscal y, al mismo tiempo, permite a los consumidores que son víctimas de este tipo de prácticas, demandar civilmente por el incumplimiento de las condiciones publicitarias una vez sufrido el perjuicio. En este sentido, el proyecto de ley que busca regular el greenwashing aumenta las multas aplicables y específica determinados deberes de información. Sin embargo, no existen controles preventivos que protejan a los consumidores frente a estas conductas y en consecuencia, les permita contar con la debida información antes de adquirir una vivienda. De esta forma, sólo podrá protegerse debidamente al consumidor inmobiliario cuando la calificación energética sea obligatoria y responda a unos mismos criterios. Mientras esto no ocurra, seguirá expuesto a este tipo de prácticas y a decisiones de compra sin contar con información relevante en estas materias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aaker, J. L. (1997). Dimensions of brand personality. *Journal of Marketing Research*. 34(3), 347–356. <https://doi.org/10.2307/3151897>

Alavedra, P.; Domínguez, J.; Engracia, G. y Serra, J. (1997). La construcción sostenible. El estado de la cuestión. *Informes de la Construcción*, 49(451). <http://polired.upm.es/index.php/boletincfs/article/view/2527/2604>

Boletín N°15044. Proyecto de ley que busca prevenir, regular y sancionar de manera expresa el greenwashing o lavado verde de imagen. Ingresado el 31 de mayo de 2022. Moción. Cámara de Diputados. Actualmente, se encuentra en el segundo trámite constitucional. Recuperado el 27 de junio de 2024 de <https://www.camara.cl/legislacion/ProyectosDeLey/tramitacion.aspx?prmlID=15551&prmBOLETIN=15044-12>

Barrientos, M. (2024). Artículo 3° inciso primero letra B). En I. De La Maza y C. Pizarro (dir.) y F. Barrientos (coord.), *La protección a los derechos de los consumidores: Comentarios a la Ley de Protección a los Derechos de los Consumidores, Tomo I* (pp. 388-403): Thomson Reuters.

Caldera, A. (2012). Building Blocks for a Better Functioning Housing Market in Chile. *Economics Department Working Papers*, 943. <https://doi.org/10.1787/18151973>

Caprile, B. (2008). La ley de venta en verde: Las modificaciones introducidas por las Leyes N°. 19.932 y 20.007 a la promesa de compraventa de inmuebles que no cuenten con recepción definitiva y a la compraventa de inmuebles hipotecados. En H. Corral, y M. Rodríguez. (coords). *Estudios de Derecho Civil II, Jornadas Nacionales de Derecho Civil Olmué, 2005*, (563-593). LexisNexis.

Castillo, E. (2019). De la envolvente en el confort térmico de las viviendas. Programa Mucho Lote II, Guayaquil. Universidad y Sociedad. *Revista Científica de la Universidad de Cienfuegos*, 11(4), 303-309. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202019000400303&lng=es&tlng=es.

Chavarry Vallejos, C. M.; Zavala Loría, J. del C. y Rojo Gutiérrez, M. A. (2023). Tecnologías de descarbonización para la reducción de emisiones de CO2 en edificaciones multifamiliares. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 27(119), 52-62, <https://doi.org/10.47460/uct.v27i119.706>

Chen, Y.; Li, Z.; Xu, J.; Liu, Y. y Meng, Q. (2023). How Does the Government Policy Combination Prevents Greenwashing in Green Building Projects? An Evolutionary Game Perspective. *Buildings* 2023, 13(4), 917. <https://doi.org/10.3390/buildings13040917>

Consejo de Autorregulación y Ética Publicitaria, Conar (4 de diciembre de 1979) *Código de Ética Publicitaria*. <https://www.conar.cl/codigo-etica/>

Convenio marco de Colaboración sobre Construcción Sustentable entre el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, el Ministerio de Obras Públicas, el Ministerio de Energía y el Ministerio del Medio Ambiente (2012). Aprobado mediante la resolución exenta N° 7.614 (V. y U.), de 14 de septiembre

de 2012, y que establece como objetivo general coordinar, difundir y fomentar la construcción sustentable en Chile. http://documentos.minvu.cl/min_vivienda/resoluciones_exentas/documents/resexedijurn%C2%B0_7614.pdf

DFL N°458 que aprueba la nueva ley de urbanismo y construcciones. Publicada el 13 de abril de 1976.

De La Maza, I. (2013a). Artículo 1° N° 4. Definición publicidad. En I. De La Maza y C. Pizarro (dir.) y F. Barrientos (coord.), *La protección a los derechos de los consumidores: Comentarios a la Ley de Protección a los Derechos de los Consumidores* (pp. 32-37).: Legal Publishing.

De La Maza, I. (2013b). *La integración de la publicidad en el contrato*. En C. Domínguez; J. González; M. Barrientos; J. Goldenberg. (coords.). *Estudios de Derecho Civil VIII. Jornadas Nacionales de Derecho Civil Santa Cruz*, 2012. (pp. 439-454). Legal Publishing.

División de Energías sostenibles. Unidad Gestión de Información, Ministerio de Energía (2022). *Reporte de Resultados en el Sector Público Ley 21.305, eficiencia energética*. <https://sectorpublico.gestionaenergia.cl/wp-content/uploads/2023/07/Resultados-Ley-EE-S.-Publico-Art-5.pdf>

Encinas, F.; Aguirre, C., Marmolejo, C. (2019). Atributos de sostenibilidad en la promoción inmobiliaria: Perspectivas privadas sobre el avance de la regulación energética en un mercado liberalizado. *Anales de la Arquitectura UC*, 110-127. <https://doi.org/10.7764/AA.2019.09>

Escorcía, O.; García, R.; Trebilcock, M.; Celis, F.; y Bruscato, U. (2012). Mejoramientos de envolvente para la eficiencia energética de viviendas en el centro-sur de Chile. *Informes De La Construcción*, 64(528), 563-574. <https://doi.org/10.3989/ic.11.143>

Fernández, F. (2021). Comentario al artículo 28 f, en Empresa y Derechos Humanos. *Academia Judicial, Chile* [Archivo PDF] <https://academiajudicial.cl/wp-content/uploads/2022/03/Empresa-y-DDHH.pdf>

Freling, T.H. y Forbes, L.P. (2005). An empirical analysis of the brand personality effect. *Journal of Product and Brand Management*. 14(7), 404-413. <https://doi.org/10.1108/10610420510633350>

Fundación Chile. (2014). *"Guía de Comunicación Verde."* [Archivo PDF]. <https://fch.cl/multimediampublicacionesnoticia-antigua/guia-comunicacion-verde/>

Isler, E. (2020). Acerca de la vinculación de las declaraciones precontractuales en el régimen de la Ley N°19.496 sobre Protección de los Derechos de los Consumidores, en relación a la tasa de interés aplicable a un mutuo hipotecario. *Revista de Derecho del Consumidor*, 8. <https://ar.ijeditores.com/pop.php?option=articulo&Hash=639daa598d80e5cbec37acbb389909eb>

Isler, E. (2011). La relatividad de los derechos subjetivos de los consumidores. *Revista de Derecho*, 24(2), 65-89. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-09502011000200003>

Jiménez, A.; De Frutos, B. y Margalina, V. M. (2023). Los efectos limitados del marketing verde en la actitud hacia las marcas comerciales. *Revista Latina de Comunicación Social*, 81, 23-43. <https://www.doi.org/10.4185/RLCS-2023-2024>

Ley N°21.305 sobre Eficiencia Energética. Publicada el 13 de febrero de 2021.

Ley N°19.496 que establece las normas sobre protección a los derechos de los consumidores. Publicada el 7 de marzo de 1997. Texto refundido, coordinado y sistematizado por el D.F.L. N° 3, publicado el 31 de mayo de 2021.

López, P. (2019). La tutela precontractual en la Ley N° 19.496: su configuración, alcance y eventual convergencia con aquella propia de la contratación civil. *Revista Chilena de Derecho*, 46(2), 399-425. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34372019000200399>

Lyon, P.; Maxwell, J. (2011) Greenwash: Divulgación ambiental corporativa bajo amenaza de auditoría. *Diario de Economía y Gestión de Estrategias*, 20, 3-41, <https://doi.org/10.1111/j.1530-9134.2010.00282.x>

Ministerio de Vivienda y Urbanismo, MINVU. (2019). *Manual de Procedimientos Calificación Energética de Viviendas en Chile, segunda edición* - [Archivo PDF]. <https://www.calificacionenergetica.cl/media/Manual-CEV-2019-1.pdf>

Momberg, R. (2007). El rol de la publicidad en la etapa precontractual de los negocios de consumo y su relación con el principio de buena fe. En H. Corral y M. Rodríguez. (coords.), *Estudios de Derecho Civil II, Jornadas Nacionales de Derecho Civil Olmué*, 2006. (pp. 587-599). LexisNexis.

Muñoz, C.; Zaror, C. y Saelzer, G. (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 Bío Bío, Chile. *Revista de la Construcción*, 11(3), pp.125-145. <https://doi:10.4067/S0718-915X2012000300011>

D.S. N°47 de 1992 [Decreto Supremo]. Reglamentación Térmica contenida en el artículo 4.1.10 (MINVU).

Sander, F.; Föhl, U.; Walter, N. y Demmer, V. (2021). ¿Verde o social? Un análisis de la publicidad de sostenibilidad ambiental y social y su impacto en la personalidad, credibilidad y actitud de la marca. *Journal of Brand Management*, 28, 429-445. <https://doi.org/10.1057/s41262-021-00236-8>

Shahrim, R.; Quoquab, F.; Jamil, R.; Mahadi, N.; Mohammad, J.; Salam, Z. y Hussin, N. (2017). Green "Eco-Label" or "Greenwashing"? Building Awareness about Environmental Claims of Marketers. *Advanced Science Letters*, 23(4), 3205-3208. <https://doi:10.1166/asl.2017.7713>

Tateishi, E. (2018). Craving gains and claiming "green" by cutting greens? An exploratory analysis of greenfield housing developments in Iskandar Malaysia. *Journal of Urban Affairs*, 40(3), 370-393. <https://doi.org/10.1080/07352166.2017.1355667>

Trebilcock, M. (2023). Chile necesita urgente una reglamentación térmica. *Revista Negocio y Construcción*, 38, 32. <https://blog.negocioyconstruccion.cl/chile-necesita-urgente-una-nueva-reglamentación-térmica>

Wegertseder, P., Schmidt, D.; Hatt, T.; Saelzer, G. y Hempel, R. (2014). Barreras y oportunidades observadas en la incorporación de estándares de alta eficiencia energética en la vivienda social chilena. *Arquitectura y Urbanismo*, 34(3), 37-49. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-58982014000300004&lng=es&tlng=es.

CALIFICACIÓN DE VIVIENDAS PREFABRICADAS EN MADERA BASADA EN ATRIBUTOS DE CUMPLIMIENTO NORMATIVO, COMPLEJIDAD Y SUSTENTABILIDAD EN CHILE CENTRAL

PREFABRICATED WOODEN HOUSING QUALIFICATION BASED ON REGULATORY COMPLIANCE, COMPLEXITY, AND SUSTAINABILITY IN CENTRAL CHILE

CLASSIFICAÇÃO DE MORADIAS PRÉ- FABRICADAS DE MADEIRA COM BASE EM ATRIBUTOS DE CONFORMIDADE REGULATÓRIA, COMPLEXIDADE E SUSTENTABILIDADE NA REGIÃO CENTRAL DO CHILE

Rose Marie Garay-Moena

Magíster en Ciencias e Industrias de la Madera
 Académica, profesora asociada, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza
 Universidad de Chile, Santiago, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-7662-9724>
 rgaray@uchile.cl (Autora de Correspondencia)

Susana Graciela Benedetti-Ruiz

Licenciada Ciencias Forestales
 Directora de proyectos
 Instituto Forestal, Santiago, Chile
<https://orcid.org/0009-0000-2217-3568>
 sbenedet@infor.cl



RESUMEN

El estudio revisa los antecedentes publicados por fabricantes de viviendas prefabricadas en madera en Chile central. La metodología indaga en medios digitales de venta y servicio de impuestos internos. Utiliza los atributos de cumplimiento normativo-técnico, complejidad y sustentabilidad para calificar las viviendas prefabricadas en las regiones de Valparaíso, O'Higgins y Metropolitana. Un 83% de empresas son "constructoras-fabricantes", 83% están legalmente constituidas. La complejidad revela que, para proyectos de mayor envergadura, 54% tienen nivel bajo, 35% nivel medio y 11% nivel alto. Hay debilidades en cumplimientos normativos y en información técnica para los potenciales clientes, siendo la sustentabilidad el atributo menos destacado, ya que pocas explicitan datos como huella de carbono, reciclaje de materiales o certificaciones voluntarias para diferenciarse en el mercado. Por tanto, se concluye que faltan acciones para potenciar a este sector productivo, con potencial de industrialización, incorporando gestión y reglamentación, con lo que disminuiría la inseguridad territorial por autoconstrucción.

Palabras clave

viviendas de madera, ventas por internet, seguridad, sustentabilidad

ABSTRACT

This study reviews the background information published by manufacturers of prefabricated wooden housing in central Chile. The methodology carries out the investigation using digital sales and internal tax service media. It uses regulatory-technical compliance, complexity, and sustainability to rate prefabricated homes in Chile's Valparaíso, O'Higgins, and Metropolitan regions. 83% of the companies are "construction-manufacturers", while 83% are legally constituted. As for complexity, it is revealed that, for larger projects, 54% have a low level, 35% have a medium level, and 11% have a high level. There are weaknesses in regulatory compliance and in technical information for potential clients, with sustainability being the least prominent attribute, as few explain data such as carbon footprint, recycling of materials, or voluntary certifications to differentiate themselves in the market. It is concluded that there is a lack of actions to strengthen this productive sector, which has industrialization potential, by incorporating management and regulation, which would reduce the territorial insecurity for self-construction.

Keywords

wooden homes, online sales, safety, sustainability

RESUMO

O estudo analisa as informações publicadas pelos fabricantes de casas de madeira pré-fabricadas na região central do Chile. A metodologia explora os meios de vendas digitais e o sistema tributário nacional. Ela usa os atributos de conformidade técnico-regulatória, complexidade e sustentabilidade para classificar as casas pré-fabricadas nas regiões de Valparaíso, O'Higgins e Metropolitana. 83% das empresas são "construtoras-fabricantes" e 83% são legalmente constituídas. A análise revela que, no caso dos projetos maiores, 54% têm um nível baixo, 35% um nível médio e 11% um nível alto. Há deficiências na conformidade regulatória e nas informações técnicas para clientes potenciais, sendo a sustentabilidade o atributo de menor destaque, pois poucas empresas fornecem dados como pegada de carbono, reciclagem de materiais ou certificações voluntárias para se diferenciar no mercado. Conclui-se, portanto, que faltam ações para aprimorar esse setor produtivo, com potencial de industrialização, incorporando gestão e regulamentação, o que reduziria a insegurança territorial decorrente da autoconstrução.

Palavras-chave:

casas de madeira, vendas pela internet, segurança, sustentabilidade.

INTRODUCCIÓN

FACTORES DE VULNERABILIDAD QUE INTERACTÚAN ANTE DESASTRES

Existe un fuerte vínculo entre el déficit habitacional provocado por problemas de mercado, falta de oferta como por la ocurrencia de desastres y la proliferación de soluciones constructivas de distintos niveles de calidad. Mientras el Estado intenta resolver las necesidades de viviendas, se generan de manera continua nuevas necesidades en un ciclo sin fin, sólo algunas soluciones estarían siendo reguladas por la normativa asegurando así, una habitabilidad que dé cuenta de una solución que perdure en el tiempo.

Cuando se trata de prevenir que los eventos naturales extremos se conviertan en desastres, se requiere de acciones en todo el ciclo del riesgo, idealmente antes de la ocurrencia de un evento (UNDRR, 2015). Esto implica destinar tiempo a planificar y proveer recursos para acciones que disminuyan o eviten el aumento de riesgos existentes (Lacambra et al., 2015). siendo un aporte a la mitigación, preparación, respuesta o recuperación. En tal sentido, tener claridad de quienes y dónde se encuentra la población en riesgo ayuda a tomar decisiones para disminuir el impacto de futuros eventos y generar comunidades más resilientes. En Chile, esta perspectiva ha quedado institucionalizada en la Ley N.º 21.364 del año 2021 que establece el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, creando el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED). Esta normativa se enfoca en la prevención, sin embargo, entre las necesidades a cubrir falta aún implementar operativamente la gestión de suministro de viviendas para lograr respuestas oportunas y efectivas, por ejemplo, la responsabilidad de este organismo obliga a asegurar el suministro de viviendas de emergencia regulado por la Res. 1448 Exenta (BCN, 2023c) que igualmente mantienen su carácter de provisorias, con implicancias directas en soluciones definitivas que sí disminuyen el déficit habitacional. En este sentido, la industria de construcción prefabricada en madera ofrece una opción, cuya visibilización se presenta en el siguiente artículo.

A raíz de la forma de uso e instalación de parte de las viviendas prefabricadas en Chile, es clave contar con instrumentos de planificación y ordenamiento territorial que

incluyan las áreas de riesgo, sin embargo, en municipios que no poseen los recursos para implementar planes de envergadura mayor, se suele ver afectada la vida de las personas que deben ser evacuadas de áreas de riesgo de manera preventiva. Un ejemplo de ello es la expansión urbana en zonas expuestas a amenaza de incendios forestales, la que no está considerada explícitamente en la Ordenanza de Urbanismo y Construcciones (OGUC, 2017), según el artículo que define las "zonas no edificables" y las "áreas de riesgo" (Artículo 2.1.17). En dirección correcta a buscar soluciones integrales, algunos Planes Reguladores Comunes (PRC) y ordenanzas municipales incluyen a los incendios forestales e implementan medidas con distanciamientos, fajas cortafuegos, red hídrica, eliminación de combustibles y materiales inflamables, cambiando revestimiento a resistencia al fuego no menor a una clasificación F-180 (González-Mathiesen & March, 2023). Mientras el Proyecto de Ley que redacta el Servicio Nacional Forestal, en su Artículo N°3 define zonas de interfaz urbano forestal y establece que deben ser identificadas en los Planes Regionales de Ordenamiento Territorial y en Planes Reguladores Intercomunales y Comunes, aunque es todavía débil en medidas preventivas para las edificaciones ya existentes. El propósito de hacer notar este tema en este artículo se debe a que, en estas áreas es donde se observa la existencia de viviendas prefabricadas y resulta urgente reflexionar sobre cambios en la política pública con una mirada global y sistémica de cómo adaptar el habitar al cambio climático, lo que no sólo depende de cada municipio en su territorio, sino que, debe ser impulsado a nivel país.

Déficit habitacional

Un análisis para cada región (Tabla 1) permite mayor claridad de la situación y si esto se vincula a los resultados que presenta la investigación sobre las distintas oportunidades que el mercado ofrece para satisfacer las necesidades, se podría generar un círculo virtuoso en lugar de uno vicioso.

El déficit cuantitativo calculado con la Encuesta Casen 2022, desarrollada por el Ministerio de Desarrollo Social y Familia de Chile, (MDSF, 2024), muestra que la cifra asciende a 552.046 viviendas nuevas por construir. Las regiones con mayor cantidad de hogares con problemas de asequibilidad en el año 2022 corresponden a las regiones

Tabla 1. Situación de viviendas por regiones. Fuente: Elaboración de las autoras con datos obtenidos del Reporte regional 2023 (BCN, 2023d)

O'Higgins	Metropolitana	Valparaíso
1.03 millones Hab (proyectado a 2024), Superficie 16.387 km ²	8.420.729 Hab (proyectado a 2024), Superficie 15 403,2 km ²	2.025.693 hab. (proyectado a 2024) Superficie* 16.396,1 km ²
N.º de Viviendas totales 354.324 (99.909 rurales). Déficit habitacional. 21.980 viviendas	N.º de Viviendas totales 2.378.490 (92.339 rurales). Déficit habitacional 504.770 viviendas	N.º de Viviendas totales 788.830 (79618 rurales). Déficit habitacional sin campamentos 102 mil viviendas y con campamentos (255) 136 mil viviendas. Viviendas afectadas último incendio de enero 2024: 8.188

* Superficie Chile Continental: 756 770 km²

más pobladas del país: Metropolitana (504.770 hogares) y Valparaíso (90.043). Mientras que la distribución regional de los hogares en campamentos, según el Catastro 2022 realizado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, MINVU (2023), muestra que la mayor cantidad se ubica en Valparaíso (25,6%) y Metropolitana (18,6%).

CAPACIDAD PRODUCTIVA DE CONSTRUCCIÓN EN MADERA

Aunque no existe un levantamiento de capacidades de construcción de viviendas prefabricadas en madera, ya que ningún organismo chileno público o privado es responsable de hacerlo, es cuestión de observar la materialidad con la que se implementan las viviendas de emergencia, temporales, segundas viviendas del tipo cabañas y modulares para percibir que la demanda existe y, por tanto, la oferta va en aumento.

El análisis sobre viviendas usadas abordado en INFOR (2021) para 68.466 viviendas localizadas en todas las regiones del país con datos de la encuesta Casen de del año 2017 (Ministerio de Desarrollo Social y familiar, 2018), indica que, un 38,1% son construidas principalmente en madera. Siempre en una posición de menor calidad al recorrer los rangos de tamaño, agudizada en segmentos inferiores a 40 m² es decir, cada 100 viviendas de madera presentes en el país, 23 tienen menos de 40 m², mientras que, en ladrillo y hormigón, llegan a 12 y 13 unidades, respectivamente. Los datos proporcionados evidencian que, la materialidad se relaciona al nivel de pobreza de las familias y el tamaño de la vivienda.

La madera es el material más utilizado para viviendas de diferentes estratos socioeconómicos (Harju, 2022; Hidalgo et al. 2022), por ser “la solución sustentable del futuro en edificaciones en el mundo” (Green y Taggart, 2020; Bascuñán, 2021; Pacini, 2021; Garay et al., 2022). Más asequible en zonas rurales por disponibilidad y por escaso acceso a subsidios estatales (González Méndez, 2022). Erróneamente se disminuyen costos al abastecer el mercado con viviendas que no responden, desde su fabricación, a atributos de sustentabilidad, como la eficiencia energética y la baja huella de carbono, en este sentido el aislamiento térmico de las viviendas es obligatorio.

La autoconstrucción y la instalación de viviendas en un mismo sitio genera hacinamiento (Hidalgo et al. 2022; González Méndez, 2022; Martínez Gamboa, 2022). El mercado privado ofrece diversas tipologías constructivas, calidades, plazos de entrega, desde kit para armar hasta servicios de instalación completos llave en mano. El cuestionamiento es acerca de quién controla y fiscaliza la correcta ejecución del trabajo, adicionalmente, la recepción final de obra no siempre ocurre.

Entre los proveedores existen consolidadas oficinas de arquitectura y/o constructoras, que dan cumplimiento a especificaciones técnicas (EETT) normadas que abarcan incluso la recepción final de obra. En otros casos, se

accede sólo a habitabilidad subestándar, donde los indicadores de sustentabilidad y seguridad rara vez existen y son valorados (Garay et al. 2021a). Dado que, la construcción en materialidades como ladrillo y hormigón, generan 35% de residuos a nivel global, consumen el 20% de agua y emiten casi el 40% de gases de efecto invernadero, la sustentabilidad no debe ser opcional, ya que la construcción en madera mundialmente se está enfrentando eficientemente. Para incentivar este proceso de adopción de construcción sustentable en Chile, se ha tomado como ejemplo el trabajo del instituto internacional Living Future, quien lanzó el año 2006 el programa de construcción verde más riguroso y sostenible del mundo: el Living Building Challenge, de este modo 20 edificios a nivel global aspiran conseguir una certificación “Net Zero Energy Building” (NZEB) (ILFI, 2024; Madera 21, 2023). Hasta ahora, la construcción estructural en madera no accede a edificación en altura, salvo algunos edificios creados con efecto demostrativo, o corporativos, con gran posibilidad de crecimiento. (Ugarte et al, 2018; Wenzel y Guindos. 2024).

El estudio Indaga en los atributos de cumplimiento normativo-técnico, complejidad y sustentabilidad que los fabricantes de viviendas prefabricadas ofrecen, a través de medios digitales ello permite entender que es lo que reciben los potenciales clientes de información y sugerir cuáles de éstas deberían ser mejoradas.

METODOLOGÍA

Se obtuvo material bibliográfico de carácter científico-técnico disponible en formato digital, como también desde las bases de datos de libros y revistas suscritas por la Universidad de Chile, tales como Web of Science, Scopus, ScienceDirect, Springer, además de literatura y recursos de información provenientes del motor de búsqueda Google Académico, lo que permitió dar contexto a la importancia del estudio y el estado del arte. Estos documentos bibliográficos fueron almacenados en el gestor bibliográfico Mendeley. Para registrar los productos se utilizaron palabras clave en español, realizando la búsqueda, a través de Google en páginas web, Instagram, Facebook, LinkedIn. El siguiente paso fue constatar la existencia formal de la empresa en el Servicio de Impuestos Internos (SII), georreferenciando su ubicación y verificando el rol y que los datos de contacto correspondieran efectivamente a la actividad. Este trabajo generó un registro que incluyó a 88 empresas, eliminando sólo a aquellas que no contaban con información formal.

Fue relevante la revisión exhaustiva de las fuentes digitales para la bibliometría y el análisis descriptivo de los productos del mercado nacional clasificados como casas, viviendas prefabricadas o modulares en madera, las que son ingresadas a los motores de búsqueda de las bases de datos acompañadas de operadores booleanos para generar diferentes combinaciones entre ellas. Se generó a partir de esta base de datos, un registro en el programa Microsoft Excel, donde se compiló información

Tabla 2. Atributos (Complejidad, Cumplimiento normativo, Sustentabilidad) y escala Likert. Fuente: Elaboración de las autoras.

Atributo	Variables	Nivel de la variable	Calif.
I: Complejidad	A: Experiencia del fabricante o constructora	No menciona	1
		<5 años	2
		5-15 años	3
		16-25 años	4
		>25 años	5
	B: Diversidad de la oferta: N°, diseño y sofisticación de Modelos	No menciona	1
		<5	2
		5-10	3
		11-15	4
		>15	5
	C: Diversidad de tamaños de viviendas	No menciona	1
		<40m²	2
		40-72m²	3
		73-120m²	4
		>120m² o a medida	5
	D: Formalidad, iniciación de actividades y registro en el Servicio de Impuestos Internos	Informal	1
		Formal	5
	E: Posibilidad de venta con subsidio habitacional otorgado por el Estado	No	1
		Si	5
	F: Participación convenio marco, licitaciones públicas y/o integración a gestión inmobiliaria	No	1
		Si	5
II: Cumplimiento normativo vigente (CNV)	A: Resistencia sísmica	no	1
		si	5
	B: Resistencia al fuego	no	1
		si	5
	C: Confort térmico	no	1
		si	5
	D: Confort acústico	no	1
		si	5
	E: Dimensiones mínimas	no	1
		si	5
	F: Hermeticidad al agua	no	1
		si	5
	G: Hermeticidad al aire	no	1
		si	5
	I: Protección de materiales para su Durabilidad	no	1
		si	5
Atributo	Variables	Nivel de la variable	Calif.
III: Sustentabilidad	A: Materialidad estructural de la edificación	No menciona	1
		Híbrida	3
		Madera	5
	B: Reducción de Riesgos incendios forestales, sismos, cambio climático.	No menciona	1
		Al menos una	3
	C: Bioeconomía Reducir– Reusar–Reciclar (RRR)	No menciona	1
		Al menos una	3
		Dos o más	5
	D: Eficiencia energética, agua, autogeneración, reutilización	No menciona	1
		Al menos una	3
		Dos o más	5
	E: Otros del código voluntario construcción sustentable (MINVU, 2023)	no	1
		si	5

de empresas fabricantes de viviendas prefabricadas para las tres regiones analizadas.

Tras la identificación de las empresas se analizaron los productos ofrecidos, utilizando como guía los atributos y variables consignados en la Tabla 2. El estudio caracterizó “viviendas prefabricadas” de 88 empresas fabricantes legalmente constituidas con operaciones en las regiones de O’Higgins, Valparaíso y Metropolitana de Chile. El análisis se basa en la descripción explícita que realizan de sus propios productos, también por la observación de imágenes que muestran como evidencia de algunos atributos de manera inequívoca. Esta estrategia permitió identificar los productos de viviendas en madera disponibles en el mercado nacional, posteriormente describir las variables a observar para los atributos de complejidad, cumplimiento normativo-técnico y sustentabilidad.

Con la información recopilada, se creó un directorio digital de empresas y se seleccionaron y calificaron los modelos de viviendas ofrecidas considerando los atributos y variables que detalla la Tabla 2, en los casos en que existía una gama superior a tres modelos, se eligieron los tres más representativos para acotar el registro y el cálculo de calificación. De esta manera, la nota de calificación corresponde a un número adquirido de manera conjunta para todos los productos en una empresa, considerando la cantidad de atributos observados (sin ponderar) presentados en una escala Likert de 1 a 5 niveles, siendo 1 el más bajo y 5 el más alto, estos niveles son descritos en la Tabla 3.

La calificación se basa en tres criterios: (1) Complejidad (C); (2) Cumplimiento normativo vigente (CNV) y (3) sustentabilidad (S). El atributo C., involucra la experiencia del fabricante, así como la diversidad de su oferta en cuanto a tipos, modelos,

Tabla 3. Pauta de indicadores basada en atributos, según cantidad y calidad expresados en escala Likert. Fuente: Elaboración de las autoras

Calidad de atributos (basado en tabla 1)	Descripción y Cantidad de atributos para cada producto (mínimo uno, máximo tres por empresa, seleccionados entre los modelos ofrecidos)	Calif.
No menciona	No menciona información acerca de las características pese a ser una empresa formal no menciona CNV en sus productos. Sin información de sustentabilidad. Productos sin imágenes en medios digitales de difusión. Complejidad baja: sin experiencia o no indicada, sin ventas mediante licitaciones o subsidio, sin descripción de tecnología y/o certificación	1
Atributos sin diferenciar	Menciona sólo una de estas características: dimensiones y número de modelos disponibles, declara CNV en confort térmico y/o en acústico, resistencia sísmica o al fuego. Menciona alguna información de sustentabilidad. Es posible determinar nivel de complejidad por los modelos y proyectos publicados, perteneciendo a este nivel sólo si llega a Complejidad media. Empresa formal, evidencia uso de tecnología en sus productos, exhibe imágenes y describe técnicamente modelos disponibles. No indica venta con subsidio ni poseer certificaciones	2
Atributos claramente identificables	Menciona de dos a cuatro de estas características: dimensiones y número de modelos disponibles declara CNV en confort térmico y en acústico, resistencia sísmica o al fuego. Menciona alguna información de sustentabilidad. Es posible determinar nivel de complejidad por los modelos y proyectos publicados, perteneciendo a este nivel sólo si llega a Complejidad media. Empresa formal, usa tecnología, exhibe imágenes y descripción de modelos disponibles. No indica venta con subsidio ni poseer certificaciones.	3
Atributos con explicación técnica de relevancia	Menciona de Tres a cinco de estas características: dimensiones y número de modelos disponibles declara CNV en confort térmico y en acústico, resistencia sísmica o al fuego. Se destaca por la información de sustentabilidad. Describe con adecuado detalle técnico los productos y presenta planos y fichas de materiales de construcción. Se logra diferenciar capacidad de desarrollar proyectos y productos de mayor complejidad y flexibilidad, ajustable a necesidades del cliente. Incluye temas de sustentabilidad conectando con las necesidades actuales. A este grupo pertenecen las que han sido registradas por DITEC como Industrializadoras.	4
Atributos significativamente destacados	Menciona más de cinco de estas características dimensiones y número de modelos disponibles declara CNV en confort térmico y en acústico, resistencia sísmica o al fuego. Se destaca por la información de sustentabilidad. Empresa formal, usa la tecnología más alta disponible en el país, exhibe imágenes y descripción de modelos disponibles. Indica venta con subsidio y posee algún tipo de certificaciones.y posee un nivel sobresaliente en indicadores de sustentabilidad con reconocimiento internacional	5

tamaños presentación del producto y la experiencia de la empresa, también formalidad, aceptación de subsidios, participación en convenio marco y servicios de postventa del producto. El CNV, está basado en que los productos demuestren de forma explícita el cumplimiento de normas técnicas relevantes como las variables que se detallan en la Tabla 2, las que se vinculan a aspectos relacionados a la durabilidad y especialmente a su comportamiento frente a sismos y fuego, incluidos en la OGUC. Finalmente, los atributos S., de Sustentabilidad se refieren a variables que se destaquen respecto a estándares y certificaciones que han adoptado, tales como, medición de huella de carbono, análisis de ciclo de vida, bioeconomía, calidad de los procesos, eficiencia e innovación y mejoramiento de características acústicas y térmicas de las viviendas, más allá del CNV.

El registro de información incorpora y describe la presencia o ausencia de esta información para las viviendas ofrecidas, así como su detalle y explicaciones pertinentes.

El proceso de calificación se simplificó al promediar los tres atributos con la misma importancia, se aclara este aspecto por que se tuvo presente el modelo de indicadores publicado por Garay et al. (2022) en el que se consideró una mayor o menor ponderación de un atributo respecto a los otros, considerando una compleja matriz multicriterio.

En la tabla 3 se expone la pauta de indicadores, agrupando las variables de cada atributo considerado en la tabla 1 (complejidad, cumplimiento normativo, sustentabilidad) expresados en escala Likert de 1 a 5.

Tabla 4: casas prefabricadas evaluadas y nivel de escala Likert, según región. Fuente: Elaboración de las autoras

Región	Empresas calificadas*	Cantidad de empresas por nivel de la escala Likert	Calif.
Valparaíso	16	1	1
		7	2
		8	3
Metropolitana	61	5	1
		29	2
		23	3
		4	4
O'Higgins	10	2	1
		4	2
		4	3

*La cantidad de productos calificados fue entre 1 y 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 4 se presenta las unidades evaluadas por tipologías de casas prefabricadas que se ubican en cada escala Likert alcanzada para cada región.

La industria de casas prefabricadas, de acuerdo con lo observado, se caracteriza por un nivel medio de complejidad, esto es, la mayoría de las empresas son

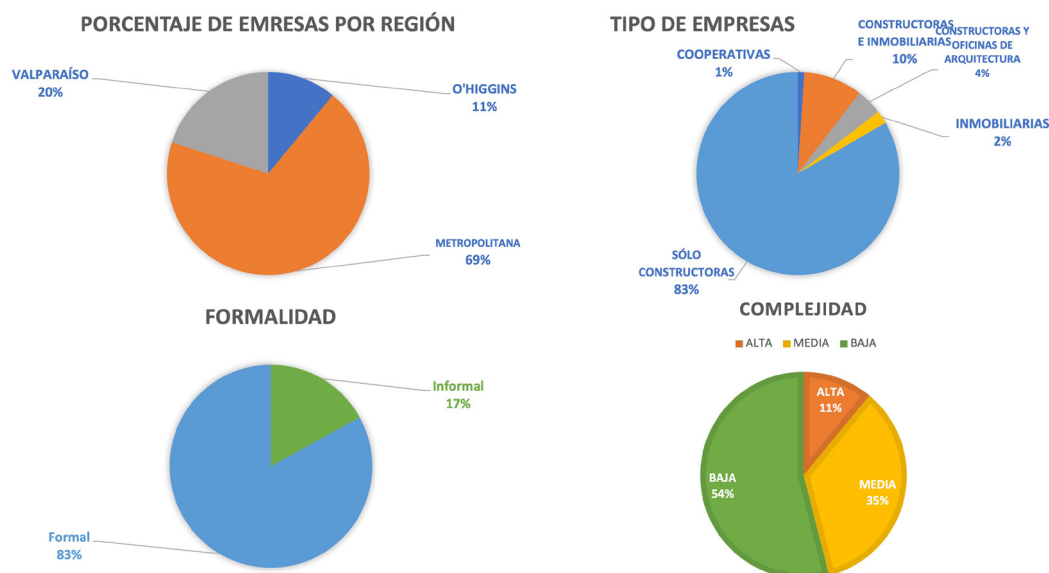


Figura 1. Evaluación de Productos "Casas prefabricadas" para las tres regiones. Fuente: Elaboración de las Autoras

capaces de producir viviendas con estándares adecuados a las exigencias, sin embargo, esta oferta no es la que se privilegia, dado que, al no existir siempre la obligatoriedad de demostrar cumplimientos técnicos, estos son obviados en acuerdo con los compradores posiblemente con el propósito de abaratar costos y disminuir dificultades asociadas a la instalación. Además, el estudio muestra que existe la posibilidad de acceder a la modalidad de venta de kit para armar, o bien la vivienda armada, pero sin instalación por lo que los usuarios pueden tomarla, de esta forma, la empresa fabricante de las casas se dedica preferentemente a fabricarlas y no asume siempre la responsabilidad de la instalación, por tanto, queda bajo la responsabilidad del comprador las consecuencias si se trasgreden normas o se cometen errores. Hay que tomar en cuenta que la recepción final de obra podría realizarse o no de todas maneras, las direcciones de obra municipal se basan sólo en los documentos presentados y no en inspecciones *in situ* para su aprobación (Garay et al. 2021b; INE 2023; Quinzacara 2021; BCN, 2023b).

Existe un grupo importante de empresas que, obtienen una calificación baja, lo que resulta preocupante cuando el escenario actual de déficit habitacional lleva a las personas a buscar soluciones urgentes y de bajo costo, encontrándose en este mercado el espacio para resolver temporalmente y de manera precaria las necesidades de viviendas, formando un círculo vicioso de insatisfacción y demanda por soluciones definitivas, donde las viviendas temporales se vuelven la "normalidad", aumentando con ello los campamentos o el hacinamiento al instalar viviendas adicionales en el mismo espacio que originalmente era destinado a una sola casa. Al respecto se debe tener presente que, desde noviembre del año 2023, a través de la resolución Exenta 1448 en que se obliga a quienes provean viviendas de emergencia a cumplir con estándares mínimos (BCN, 2023c). Consecuentemente, se espera que en el futuro cercano ocurra que viviendas que

se establezcan en el territorio nacional, cumplan estándares de acuerdo al lugar donde están emplazadas y que el entorno se adecúe para su habitabilidad, principalmente en relación con la accesibilidad y disminución de la exposición a amenazas.

Sólo cuatro de las empresas obtuvieron productos de nivel alto con puntaje "4", debido a que cuentan con capacidad de industrialización y digitalización, emplean tecnología BIM para la planificación de las soluciones individuales como de conjuntos habitacionales. Es muy probable que mediante adecuaciones algunas de las empresas calificadas en nivel "3" puedan realizar un aporte al establecer articulaciones, requisitos, inspecciones de procesos y productos ya que, de acuerdo con la evaluación realizada se observa que estas acciones son necesarias.

En la Figura 1, se presenta la distribución porcentual de empresas por región, además de señalar los tipos de empresas, la formalidad y complejidad observada.

La mayor cantidad de empresas se encuentran en la Región Metropolitana con 69%, Valparaíso con un 20% y Libertador Bernardo O'Higgins con un 11%. El tipo de empresa que predomina son constructoras que alcanzan el 83% de la muestra estudiada. En cuanto a la formalidad un 83% de empresas son formales y un 17% son informales (esta condición se verificó para las empresas evaluadas en registro de SII). Por otro lado, el nivel de complejidad más frecuente (corresponde al 54% mientras que un 35% de ellas es de nivel medio y de alta complejidad alta es sólo de un 11% de estas empresas, esto de acuerdo con información otorgada en sus medios de ventas de los productos ofertados y por la búsqueda en fuentes oficiales como mercado público y licitaciones.

En la Tabla 5 se expone una descripción de los aspectos

Tabla 5. Aspectos considerados en el precio aditivo de las Casas Prefabricadas basadas en la agregación de criterios técnicos y/o servicios adicionales. Fuente: Elaboración de las Autoras.

Descripción de la calificación asignada	Calif.
Caracterización mínima del producto: materialidad, superficie, precio y sólo ofrece KIT para armar. Ofrece flete con costo adicional por Km a recorrer	1
Caracterización adecuada del producto, agrega planos, detalles constructivos del KIT, hay claridad de lo que incluye y lo que no, ofrece flete con costo adicional para traslado del kit o de casas llave en mano, pero no indica aislamiento térmico	2
Ofrece todo lo anterior, además ofrece servicio con cobros por separado de instalaciones o externaliza la instalación (maestros para contactar) desligándose de responsabilidades. Ofrece aislamiento térmico a pedido	3
Ofrece todo lo anterior, posee y demuestra experiencia y claridad de un producto instalado. Incluye aislamiento térmico	4
Ofrece todo lo anterior, es la opción más confiable, aunque su precio es más alto, se puede constatar que se trata de una solución habitacional que cumple con los criterios de la OGUC, incluido aislamiento térmico y más códigos de construcción sustentables (CCS)	5

considerados para establecer los precios de comercialización de las casas prefabricadas, la escala Likert fue asignada según atributos entregados tras cotizaciones on line, la que se realizó con el propósito de conocer detalles de cómo suelen desagregar los valores, partiendo desde un kit básico, incluyendo como complemento la aislación, considerando costos extras por traslado, instalación con o sin conexiones sanitarias hasta servicio completo llave en mano . Esta información da cuenta de la forma de comercialización que se utiliza, agregación de valor según cada pedido. Se usó para verificar que las empresas están tomando en cuenta de forma explícita el cumplimiento de la normativa vigente respecto por ejemplo al aislamiento térmico de las viviendas, un criterio técnico obligatorio de acuerdo con OGUC desde el año 2007 para todas las viviendas nuevas. Los resultados muestran que, la mayoría de las empresas de la muestra ofrecen este y otros servicios con cobro separado adicionales al kit básico, que es cotizado de forma independiente con lo que los compradores pueden optar por no incluirlo.

El propósito de este estudio fue aplicar una versión más simple de indicadores que el IISS publicado previamente por Garay et al. (2022), tras reflexionar respecto a la vulnerabilidad y falta de sustentabilidad del habitar al no tomar en cuenta las condiciones territoriales, instalando viviendas en áreas de riesgo, exposición a sismos, volcanes, incendios forestales entre otras amenazas sin comprender su importancia. Esta investigación pretende poner la atención sobre la oferta de viviendas prefabricadas en madera para tres regiones de Chile central: Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins. Los resultados, posiblemente, se extrapolen a la mayor parte del territorio latinoamericano y, por tanto, corresponde profundizar en la oportunidad que tiene este sector productivo de gestionar procesos que demuestren sustentabilidad, preparación y acciones preventivas asociadas a la nueva forma de habitar que está provocando el cambio climático.

En términos generales se constata que existe en la mayoría de las empresas el uso de elementos dimensionados en madera, aunque incumplen el uso de madera tratada según

la NCh 819 (INN, 2019) incluida en la OGUC, lo que se puede afirmar luego de haber hecho seguimiento visual a los productos y percatar que no hay evidencia de que se considere madera tratada con preservante o de maderas modificadas. También hay marcadas diferencias en cuanto a la capacidad tecnológica e incorporación de digitalización utilizando BIM de las empresas analizadas, aspectos sobre los que no se profundizó, pero sí se observó mediante el tipo de productos y soluciones que ofrecen, en las que declaran de forma explícita el uso de tecnologías, digitalización o uso de diseño por computador o similares destacándose pocas por sobre la mayoría en esta característica. De acuerdo con las cifras generales entregadas en la Tabla 3, existen en la región metropolitana 23, en Valparaíso 8 y en O'Higgins 4 empresas que fueron calificadas en nivel 3 de la escala Likert, ello implica que son empresas que potencialmente pueden fabricar y suministrar viviendas con algunas exigencias adicionales.

La División Técnica (DITEC) del Ministerio de la Vivienda y Urbanismo, ha anunciado el marco legal que regulará a las industrializadoras con las que va a operar para disminuir el déficit habitacional (BCN, 2023a). Desde el sector de la construcción en madera se encuentran autorizadas 4 empresas, con proyectos para viviendas sociales y edificios de mediana altura, que avanzan en el cumplimiento normativo, utilizando tecnología y BIM en los procesos productivos, además de coordinar la industrialización en fábrica y hacer posible el encadenamiento con otros proveedores. De esta manera, potencialmente, hacer crecer el mercado de viviendas en madera en Chile y desarrollarlo incluso como producto de exportación para Latinoamérica.

Como parte de soluciones integrales, se espera interacción entre energía, diseño sísmico y de otros criterios técnicos relevantes como resistencia al fuego, por ello es importante tener presente que esta investigación presenta como hallazgo que el cumplimiento de la normativa técnica no está siendo fiscalizado cuando estas viviendas son adquiridas en el mercado privado, del mismo modo lo advierte Martínez Gamboa, (2022), quien como hallazgo

de su evaluación respecto de los subsidios térmicos del programa de protección al patrimonio familiar y sus efectos en la superación de la pobreza energética en Chile, señala que, “no existe una focalización en los hogares más vulnerables y responsabiliza una gestión deficiente de los encargados del programa en conjunto con una asignación de subsidios térmicos con metas disconformes de acuerdo con los recursos entregados, en forma indirecta, sectorizada y sin monitoreo y fiscalización adecuados”(p. 2). Además, asegura que se agregan a los problemas derivados de la descentralización de instituciones públicas, la falta de una caracterización y focalización de beneficiarios con pertinencia territorial y transversal de pobreza energética. (Martínez Gamboa, 2022)

Bajo la lógica del análisis de ciclo vida, al construir con madera y protegerla, se necesitaría cortar menos bosques para construir y/o calefaccionar, habría menos necesidad de transporte, se alargaría la vida útil, disminuiría la necesidad de reciclar, reponer y re-usar hasta 3 ó 4 veces más si la madera está correctamente tratada.

Exponer y describir esta industria pretende explicitar la capacidad productiva existente, haciendo las adecuaciones para cumplir las normas, fortaleciendo a los usuarios y lo que sea necesario para hacer de este sector productivo, un actor más integrado, próspero y útil para la sociedad.

La base de la investigación en el mundo hasta ahora, se ha limitado a la identificación del comportamiento real, tecnología de construcción y factores de diseño que influyen en el confort térmico y el consumo de combustible en las viviendas, dejando de lado aspectos de ubicación, accesibilidad y otros factores que afectan el acceso a vivienda, a pesar que, hay cada vez mayor asincronía entre las necesidades y los ritmos del Estado (Pena et al., 2022; Mendiá, 2022; Felmer, 2018).

Finalmente, es preocupante que la seguridad en el territorio según exposición a amenazas, hasta ahora no se integra en la normativa, aunque se perciben cambios, faltan acciones como por ejemplo, visibilizar ventajas desde el análisis de ciclo de vida, respecto al destino final de los materiales de construcción, siendo este un punto donde la madera suele ser mejor, pero que en un mercado aún poco sofisticado de casas prefabricadas no se destaca como atributo. Por ello se invita a promover estos tres elementos: Reducir – Re-usar – Reciclar (R – R – R).

CONCLUSIÓN

Esta industria se caracteriza por proveer viviendas con modalidades Kit para armar, armadas y en menor medida llave en mano, por lo que se circunscribe preferentemente, 83% de ellas a fábricas-constructoras, más que a inmobiliarias, aunque ambas participan en el abastecimiento de soluciones habitacionales y por ello debiesen estar articuladas y reguladas por el Estado, a

través de acciones para potenciar al sector productivo, especialmente de remanufactura, el que actualmente está concentrado en ofrecer productos y no ha logrado articularse a ser parte de un ecosistema mayor que incida en la construcción sustentable, ya que posee capacidades de industrialización.

La mayor cantidad de empresas entre las estudiadas, se encuentra en la Región Metropolitana con un 69%, le sigue la región de Valparaíso con un 20% y finalmente la región de O'Higgins con un 11%. En cuanto a la formalidad se tiene un 83% de empresas formales y un 17% de informales

Un 54% tiene baja complejidad, el 35% nivel medio y 11% es de alta complejidad, lo que da cuenta del nivel de preparación de las empresas para enfrenar mercados con mayores exigencias para cumplimiento de criterios técnicos, plazos, costos.

La evaluación global de las 88 empresas arrojó que el 2,7% obtuvo nivel 1, el 37,5% obtuvo nivel 2, el 58,6% nivel 3 y sólo un 1,1% se ubicó en nivel 4, ninguna de ellas obtuvo nivel 5.

Es relevante disponer de esta información para provocar interés en estas empresas por aportar mayor información técnica a los clientes respecto a sus productos sobre todo en relación a los cumplimientos normativos vigentes, además de destacar aspectos ambientales, algunos posiblemente existan y no se destacan y en otros casos habría que realizar adecuaciones para ir satisfaciendo la demanda acorde con los requerimientos que anualmente va en aumento.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo cuenta con el apoyo del Instituto Forestal y la Corporación de Fomento de la Producción-CORFO a través del proyecto “Fortalecimiento de las Capacidades Tecnológicas del Instituto Forestal para el Desarrollo de la Industria Secundaria de la Madera, a través de Bienes Públicos Orientados al Sector de la Construcción”. 18FITP-89376. Se agradece al Instituto Forestal por proveer los recursos y participar en este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bascuñán Reyes, D. (2021). *Tecnologías constructivas para la protección frente al fuego en edificios de madera de mediana y gran altura* [Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. <http://hdl.handle.net/2117/349387>

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (BCN). (2023a). Resolución 59 EXENTA. Establece condiciones y mecanismos de aprobación de proyectos de viviendas industrializadas tipo y fija el procedimiento para revisión de proyectos que incorporen el uso de viviendas industrializadas tipo, desarrollados en el marco de los programas habitacionales fondo solidario elección de vivienda DS n°49 (V. Y U.) De 2011, y de habitabilidad rural DS n°10 (V. Y U.), de 2015. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1188149&f=2023-01-23>

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (2023b) Ley N° 21364 Establece el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, sustituye la Oficina Nacional de Emergencia por el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, y adecúa normas que indica. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1188149&f=2023-01-23>

www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1163423

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (30, junio 2023d). *Reporte Regional 2023*. https://www.bcn.cl/siit/reportesregionales/reportes_final.html?anno=2023&cod_region=13

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2023c). Resolución 1448 Exenta. Promulgado por el Ministerio Del Interior Y Seguridad Pública; Subsecretaría Del Interior; Servicio Nacional De Prevención Y Respuesta Ante Desastres; Dirección Nacional En la que se establece estándares de habitabilidad de viviendas de emergencia. Promulgación:25-OCT-2023. <https://bcn.cl/3gyt7>

Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional, CASEN (2022). *Encuesta Casen 2006-2022* [Archivo PDF]. https://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/storage/docs/casen/2022/Resultados_Vivienda_Casen_2022.pdf

Felmer, G. (2018). *Prototipos de Viviendas de Bajo Consumo Energético para Diferentes Regiones de Chile* [Tesis doctoral, Universidad Abierta]. <https://doi.org/10.21954/ou.ro.0000d358>

Garay Moena, R., Castillo Soto, M., Fritz Fuentes, C., y Hernández Ortega, C. (2022). Desarrollo de un indicador integrado de sustentabilidad y seguridad estructural para el mercado de viviendas de madera aplicado a Chile central. *Revista Hábitat Sustentable*, 12(1), 8-23. <https://doi.org/10.22320/07190700.0.2022.12.01.01>

Garay, R., Pfenniger, F., Castillo, M., y Fritz, C. (2021a). Quality and Sustainability Indicators of the Prefabricated Wood Housing Industry—A Chilean Case Study. *Sustainability*, 13(15), 8523. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su13158523>

Garay Moena, R., Castillo Soto, M. y Tapia Zarricueta, R. (2021b). Viviendas ubicadas en áreas de riesgo de incendios forestales de interfaz. Un análisis territorial y normativo desde Chile. *ACE: Architecture, City and Environment*, 16(46), 9523. <http://dx.doi.org/10.5821/ace.16.46.9523>

González-Mathiesen, C. y March, A. (2023). Long-established rules and emergent challenges: spatial planning and wildfires in Chile. *International Planning Studies*, 28(1), 37-53. <https://doi.org/10.1080/13563475.2022.2136629>

González Méndez, E. A. (2022). *Vivienda extendida, radicación y densificación: tipología de vivienda adecuada para núcleos familiares extensos de allegados, en barrios periféricos vulnerables* [Archivo PDF]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/191687>

Green, M. y Taggart, J. (2020). *Tall wood buildings: Design, construction and performance*. Birkhäuser. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9783035618860/html>

Harju, C. (2022). The perceived quality of wooden building materials—A systematic literature review and future research agenda. *International Journal of Consumer Studies*, 46, 29– 55. <https://doi.org/10.1111/ijcs.12764>

Hidalgo Dattwyler, R., Vergara Constela, C. D., Gutiérrez Aguilera, D., Capetillo Constela, C., y Alvarado Peterson, V. (2022). Su casa, su deuda. La política de vivienda chilena entre la financiarización, la subsidiariedad y la integración social. *Revista INVI*, 37(105), 1-44. <https://doi.org/10.5354/0718-8358.2022.63809>

International Living Future Institute, ILFI. (26 de mayo 2024). *ZERO ENERGY CERTIFICATION*. <https://living-future.org/zero-energy/>

Instituto Nacional de Estadísticas INE. (2023). *Permisos de Edificación*. <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/edificacion-y-construccion/permisos-de-edificacion>

Instituto Forestal, INFOR. (2021). *Madera y Construcción, hacia una simbiosis estratégica* [Archivo PDF]. <https://wef.infor.cl/index.php/publicaciones/estudios/madera-y-construccion-hacia-una-simbiosis-estrategica>

Instituto Nacional de Normalización, INN. (2019). *Madera preservada - Clasificación según riesgo de deterioro en servicio y muestreo* (Norma NCH 819). <https://ecommerce.inn.cl/nch819201968329>

Lacambra, S.; Suárez, G.; Hori, T.; Durán, R.; Torres, A.; Osorio, C.; Khamis, M.; Visconti, E. (2015). Índice de Gobernabilidad y Políticas Públicas en Gestión de Riesgo de Desastres (iGOPP) 2020: Informe Nacional Chile. Banco Interamericano de Desarrollo, División de Medio Ambiente, Desarrollo Rural

y Gestión de Riesgo de Desastres. IDB-TN-751. <https://publications.iadb.org/es/publicacion/15466/indice-de-gobernabilidad-y-politicas-publicas-en-gestion-de-riesgo-de-desastres>

Madera 21. (1 de agosto 2023). *La madera se abre paso como alternativa en edificios "net zero"*. <https://www.madera21.cl/blog/2023/08/01/la-madera-se-abre-paso-como-alternativa-en-edificios-net-zero/>

Martínez Gamboa, M. (2022). *Evaluación de los subsidios térmicos del programa de protección al patrimonio familiar y sus efectos en la superación de la pobreza energética en Chile* [Archivo PDF]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/192414>

Mendia, S. (23 de junio de 2022). *Análisis territorial de la brecha habitacional y el déficit potencial comunal*. <https://urbanismosocial.cl/publicaciones/analisis-territorial-de-la-brecha-habitacional-y-el-deficit-potencial-comunal/>

Ministerio de Desarrollo Social y Familia. (2018). *Síntesis de resultados Encuesta Casen 2017: vivienda y entorno* [Archivo PDF]. http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/storage/docs/casen/2017/Resultados_vivienda_casen_2017.pdf

Ministerio de Desarrollo Social y Familia (18 de marzo de 2024). *Base de datos Casen 2022 STATA* [Archivo PDF]. <https://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/encuesta-casen-2022>

Ministerio de Vivienda y Urbanismo, MINVU. (5 de mayo de 2023). *Avance Plan de Emergencia Habitacional*. <https://www.gob.cl/noticias/plan-de-emergencia-habitacional-casi-la-totalidad-de-las-260-mil-viviendas-comprometidas-ya-cuentan-con-subsidio-asignado/>

Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, UNDRR. (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030* [Archivo PDF]. https://www.unisdr.org/files/43291_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf

Ordenanza General de Urbanismo y Construcción, OGUC. (2017). *Resumen de modificaciones y rectificaciones de la ordenanza general de urbanismo y construcciones*. Santiago, Chile [Archivo PDF]. <https://www.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2019/05/OGUC-Mayo-2020-D.S.-N%C2%B01-D.O.-29-05-2020.pdf>

Pacini, J. C. (2021). *Estructuras de madera: Diseño, cálculo y construcción*. Nobuko.

Quinzacara, E. C. (2021). El permiso de construcción desde la perspectiva del Derecho administrativo general. Análisis de sus principales problemas a nivel jurisprudencial. *Revista de Derecho Administrativo Económico*, (33), 33-70. <https://doi.org/10.7764/redae.33.2>

Pena, G., Kosut, J., Favre, F. (2022). Estudio interdisciplinario para la validación de criterios de diseño de eficiencia energética en los programas de vivienda [Archivo PDF]. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/31260>

TECHO-Chile (2023) *Catastro Nacional de Campamentos 2022-2023* [Archivo PDF]. <https://cl.techo.org/wp-content/uploads/sites/9/2023/03/CNC22-23.pdf>

Ugarte, J. J., Wiegand, E., Montañó, J., Cárcamo, S., y Delucchi, C. (2018). Light frame timber tower: Interdisciplinary design of prefabricated and anti-seismic 5-story experimental building. In *WCTE 2018-World Conf. Timber Eng* [Archivo PDF]. <https://madera.uc.cl/images/publicaciones/light-frame-timber-tower-interdisciplinary-design.pdf>

Wenzel, A., Vera, S., y Guindos, P. (2024). Energy and structural optimization of mid-rise light-frame timber buildings for different climates and seismic zones in Chile. *European Journal of Wood and Wood Products*, V82(4), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02085-z>

RECONOCIMIENTO DE LUZ Y COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN LA ESTRUCTURA Y FUNCIÓN DEL CAZADOR DE VIENTO BABER EN LA ARQUITECTURA VERNÁCULA DE BANDAR LENGÜÉ

Recibido 09/09/2023
Aceptado 28/05/2024

RECOGNIZING LIGHT AND THERMAL BEHAVIOR IN THE STRUCTURE AND FUNCTIONALITY OF BABER-ROOMS IN THE VERNACULAR BUILDINGS OF BANDAR LENGEH

RECONHECIMENTO DO COMPORTAMENTO LUMINOSO E TÉRMICO NA ESTRUTURA E NA FUNCIONALIDADE DAS BABER-ROOMS NOS EDIFÍCIOS VERNACULARES DE BANDAR LENGEH

Hamed Mohammadi-Mazraeh

Master
PhD Candidate of Architecture, Department of Architecture, Aras international Campus
University of Tehran, Aras, Irán
<https://orcid.org/0000-0003-0861-7614>
hmm.mohammadi@gmail.com (Correspondence Author)

Mohammadreza Mahmoudzadeh

Master of Architecture
Department of Architecture, Bandar Abbas Branch
Islamic Azad University, Bandar Abbas, Irán
<https://orcid.org/0009-0001-5872-3688>
mhr.mahmoudzadeh@gmail.com



RESUMEN

La ciudad portuaria de Bandar Lengué se ubica en una región con un clima cálido y húmedo, en el sur de Irán. Como resultado, y dada la inclemencia del clima, se han desarrollado múltiples elementos y espacios para crear un tipo especial de arquitectura sostenible: un cazador de viento Baber. Ya que no hay evidencia de ningún estudio científico relacionado con esta infraestructura, o con su análisis, esta investigación se ha realizado en dos partes, estructural y funcional, para entenderlas mejor como una estructura estable. Para este examen se escogió el área de Bandar-Lengué (36 casas con 70 años de antigüedad o más) para un estudio cualitativo (presentando al cazador de viento Baber, sus componentes, materiales y proceso de construcción, las áreas ocupadas, la orientación y su posición) y cuantitativo (medición de luz usando el software de análisis Ecotec y mediciones de temperatura con un dispositivo "Fluke T3000c"). Esto se realizó en un momento en el que el aire acondicionado mecánico no era el estándar, para ver si estas habitaciones podían satisfacer las necesidades de los habitantes como un aire acondicionado natural.

Palabras clave

ligera, comportamiento térmico, cazador de viento Baber, clima, Bandar Lengué.

ABSTRACT

Bandar-Lengeh is located in a region with a hot and humid climate in the south of Iran. As a result, given its harsh weather conditions, several elements and spaces have been devised to create a special kind of sustainable architecture, a Baber-Room. Since there is no evidence of any scientific study regarding Baber-Rooms or their analysis, this research has been conducted in two parts, structural and functional, to better understand them as a stable structure. To examine these, an area of Bandar-Lengeh was chosen (36 houses aged 70 or above) for a qualitative (introducing the Baber-Room, its components, materials, and construction process, the occupied areas, orientation, and positioning) and a quantitative study (light-measurement using Ecotec analysis software and temperature measurements with a "Fluke T3000fc" device). This was done at a time when mechanical air-conditioners were not standard, to see whether these rooms could meet the needs of inhabitants as natural air-conditioners.

Keywords

light, thermal behavior, Baber-room, climate, Bandar Lengeh.

RESUMO

Bandar-Lengeh está localizada em uma região de clima quente e úmido no sul do Irã. Como resultado, dadas as condições climáticas adversas, vários elementos e espaços foram planejados para criar um tipo especial de arquitetura sustentável, uma Baber-Room. Como não há evidências de nenhum estudo científico sobre as Baber-Rooms ou sua análise, esta pesquisa foi conduzida em duas partes, estrutural e funcional, para melhor compreendê-las como uma estrutura estável. Para examiná-las, foi escolhida uma área de Bandar-Lengeh (36 casas com idade igual ou superior a 70 anos) para um estudo qualitativo (apresentando a Baber-Room, seus componentes, materiais e processo de construção, as áreas ocupadas, a orientação e o posicionamento) e um estudo quantitativo (medição de luz usando o software de análise Ecotect e medições de temperatura com um dispositivo "Fluke T3000fc"). Isso foi feito em uma época em que os condicionadores de ar mecânicos não eram padrão, para verificar se essas salas poderiam atender às necessidades dos habitantes como condicionadores de ar naturais.

Palavras-chave:

luz, comportamento térmico, Baber-Room, clima, Bandar Lengeh.

INTRODUCCIÓN

La arquitectura sustentable se puede definir como cualquier experiencia que contribuya a lo que los humanos usan para un entorno más adecuado (Jaradat, Alshboul, et al. 2024). Esto es cada vez más relevante en un contexto en el que la industria de la construcción ha sido responsable de aproximadamente el 30-40% del uso mundial de energía, y donde los problemas y la aplicabilidad del ahorro de energía se han vuelto extremadamente importantes con respecto a la escala de los edificios y la arquitectura. (Li, Zhai et al., 2024). En el pasado, la falta de sistemas mecánicos de enfriamiento llevó a que se usaran estructuras naturales de aire acondicionado para brindar comodidad a los usuarios (Toroxel & Silva 2024) y, en Irán, la arquitectura local ha intentado brindar mayor comodidad a través de elementos (como torres de viento y celosías) y espacios estables como el cazador de viento Baber para que su entorno sea satisfactorio (Mazraeh & Pazhouhanfar, 2018). Estos edificios locales se tienen en cuenta como fuente de conocimiento continuo y resultado de siglos de experiencia y contemplación (Baheretibeb & Whitehead, 2024) y, a medida que ha pasado el tiempo, ha habido una creciente familiaridad con su función y practicidad (Dwijendra & Adhika 2022; Sargazi, 2023). Sin embargo, este tipo de arquitectura ha sufrido muchos cambios a lo largo del tiempo.

Desde la antigüedad, el clima ha jugado un papel muy importante en el advenimiento de la arquitectura tal como es, pero esto también es cierto en elementos arquitectónicos que se supone que son una parte vital en el reconocimiento de la arquitectura compatible con el clima de una región en particular. Sin embargo, es la herramienta llamada “conciencia climática de la gente”, la que ha llevado a un desarrollo estable de la arquitectura. Además, los materiales, elementos y espacios locales han brindado comodidad a los usuarios (Mazraeh & Pazhouhanfar, 2018). Uno de estos elementos es el uso de celosías cuando se trata de ventanas. Una variedad de cambios, ventanas simples y ventanas de celosía (Figura 4) en gran número, especialmente en un cazador de viento Baber, se han utilizado para enfrentar condiciones climáticas desagradables, principalmente, la alta intensidad de luz, el calor y la humedad, sin ningún sistema de enfriamiento mecánico (Mazraeh & Pazhouhanfar, 2020).

A pesar de todas las acciones evolutivas y la novedad en el mundo de la construcción, muchos iraníes todavía viven en casas locales y, sorprendentemente, las prefieren (Foruzanmehr, 2015; Mazraeh & Pazhouhanfar, 2018). Los habitantes han estado buscando métodos y elementos para brindar confort térmico en los espacios (Sargazi, 2023) y para tratar/responder a la naturaleza del clima (Razavian Alemi, et al., 2023).

Bandar Lengeh es una de las regiones del sur de Irán, caracterizada por un clima cálido y húmedo. Cuenta con un espacio único conocido como el “cazador de viento Baber”, junto con varios elementos de arquitectura vernácula, que desempeñan un papel funcional en el desarrollo de la arquitectura nativa de la región. Dado que no se han realizado estudios o investigaciones previas, esta investigación adopta un enfoque innovador para comprender y validar el papel funcional del cazador de viento Baber en la sustentabilidad.

La investigación busca responder a la pregunta de si el cazador de viento Baber y sus elementos arquitectónicos vernáculos han respondido positivamente a los problemas de sustentabilidad cuando no había sistemas de ventilación mecánica disponibles.

METODOLOGÍA

La arquitectura de un cazador de viento Baber en Bandar-Lengeh sigue un estilo único visto en la región, especialmente en situaciones climáticas adversas. Después de las torres de viento que se encuentran en los techos, es el acondicionador de aire natural más antiguo y aplicable. Debido a que no se encontró ningún estudio que examinara o introdujera el sistema de aire acondicionado natural del cazador de viento Baber, se tomó la decisión de analizar un contexto antiguo, que incluyó 36 casas de 70 años de antigüedad o más. Mediante un estudio cualitativo (presentando el cazador de viento Baber, sus componentes, materiales y proceso de construcción, las áreas ocupadas, la orientación y el posicionamiento) y cuantitativo (mediciones de luz y temperatura mediante software y un dispositivo, respectivamente), se determinó escudriñar las características funcionales y estructurales de este espacio. Para el aspecto estructural, se examinaron los materiales, el proceso de construcción y los componentes (celosías, sombreado, la cantidad de uso de la superficie en tres estilos de cazador de viento Baber), mientras que la parte funcional se ocupa del análisis de la luz y estudia la habitación en dos modos diferentes. Para ello, se midió la temperatura ambiente a lo largo de las 24 horas del día los 17 de cada mes.

ESTUDIO DE CASO

Bandar-Lengeh, con sus 8.210 km², se encuentra al suroeste de la costa del Golfo Pérsico (Figura 1). Al estar junto al mar, se expone a una masa de aire costero cálido y seco, más aire marino suave y húmedo. En consecuencia, a veces se registran vientos de 60 km/h, que soplan desde el mar hacia la costa. De acuerdo con las mediciones que se muestran en la Tabla 1, la temperatura varía de 33° a 45° C. El período más caluroso se llama “Khoradad” y “Shahrivar”, que es desagradable para los usuarios. Además, a menudo se puede observar una alta humedad de hasta el 100% debido a la proximidad al mar. Aunque el calor y la humedad producen una situación desafiante y dura, la arquitectura local de Bandar-Lengeh, gracias a los espacios y elementos ideados, puede manejar sutilmente la situación de sus habitantes (Mohammadi Mazraeh, 2022). También ha facilitado y reconfortado la vida de las personas en espacios internos (Mohammadi Mazraeh, 2021), de una manera que los árabes que viven alrededor del Golfo Pérsico vienen a caminar en esta región (Mazraeh & Pazhouhanfar, 2018).

CARACTERÍSTICAS ARQUITECTÓNICAS DE BANDAR-LENGEH

La primera muestra de un cazador de viento Baber apareció en casas que tienen más de 70 años (Figura 2A), donde todas las casas tenían un cazador de viento Baber en el techo. Con



Figura 1. Bandar-Lengeh en un mapa de Irán y en el mundo. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 1. Valores (PET) para diferentes meses en Bandar-Lengeh. Fuente: Roshan et al. (2018)

Ene	Feb	Mar	Abr	Mayo	Jun
Cómodo	Cómodo	Ligeramente cálido	Cálido	Caliente	Muy caliente
19,5	21,3	24,9	31,2	37,6	41,4
Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Muy caliente	Muy caliente	Caliente	Cálido	Ligeramente cálido	Cómodo
43,2	43,1	40,1	34,7	27,3	21,8

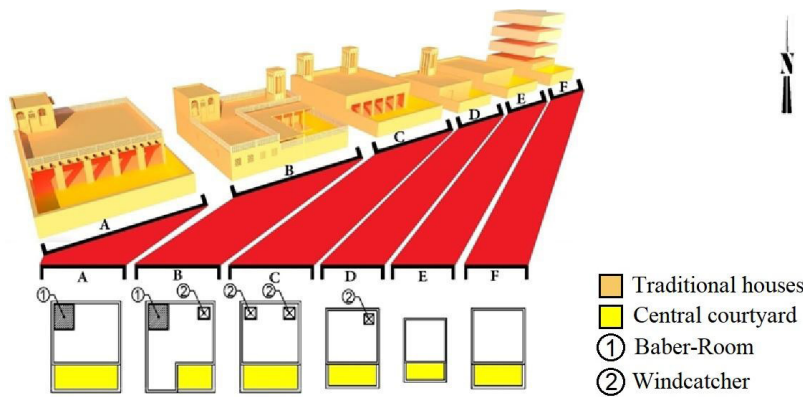


Figura 2. Una variedad de métodos de construcción desde hace 70 años hasta la actualidad. Fuente: Elaboración de los autores.

el tiempo, entre los edificios de entre 50 y 70 años, se puede notar que el cazador de viento Baber se construye a veces con una torre de viento o solo en los techos (Figura 2A y Figura 2B). Sin embargo, en edificios de entre 30 y 50 años, solo hay una o dos torres de viento (Figura 2C y Figura 2D). En edificios más recientes (menos de dos décadas de antigüedad), lo único que se puede observar es la existencia de climatización natural a través de celosías y/o ventanas simples (Figura 2E). Finalmente, en las últimas dos décadas, con la llegada de los departamentos (Figura 2F), además del contexto tradicional, se ha extendido una sensación de insatisfacción entre los usuarios de A, B, C y D por la pérdida de privacidad en los patios, la falta de seguridad ante terremotos y la posibilidad de que nuevos edificios mal contruidos colapsen sobre casas tradicionales.

RESULTADOS

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y COMPONENTES

Una introducción al cazador de viento Baber

En las sociedades tradicionales, las familias requerían lugares que pudieran facilitar actividades como sentarse, comer, dormir, reunirse en familia, para el entretenimiento y la privacidad. (Mohammadi Mazraeh, 2022). Esto se puede percibir en el papel del cazador de viento Baber.

Los cazadores de viento Baber pueden tener forma cuadrada o rectangular y normalmente tienen un tamaño de 4x4, 6x4

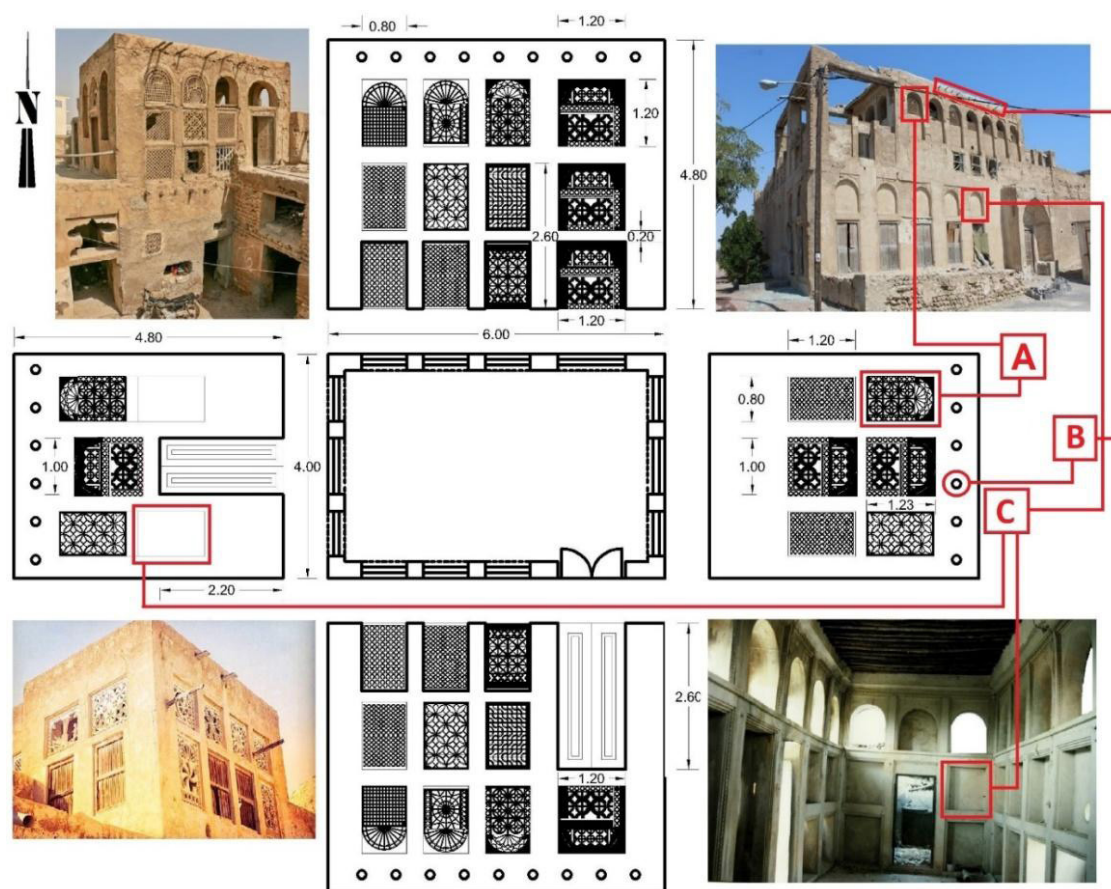


Figura 3. Diseño del cazador de viento Baber, incluidos sus elementos. Fuente: Elaboración de los autores.

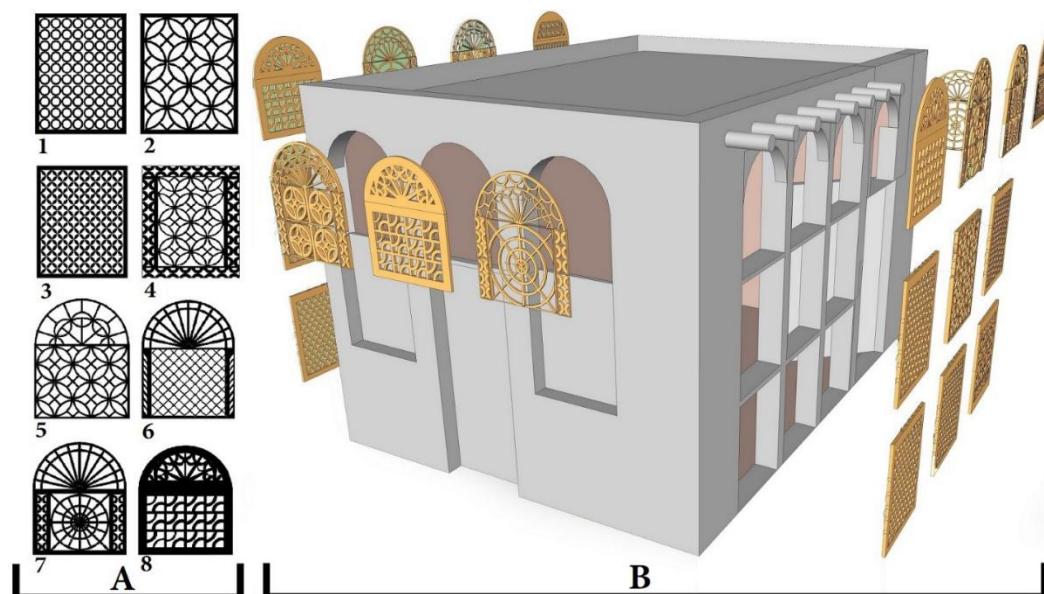


Figura 4. Vista tridimensional del espacio interno del cazador de viento Baber. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 2. La cantidad de área vacía y usada para las ocho celosías más utilizadas. Fuente: Elaboración de los autores.

Fila	Tipo de modelo	Superficie usada	Superficie vacía	Área total (cm)
1	1	39%	61%	960(100%)
2	2	32%	68%	960(100%)
3	3	38%	62%	960(100%)
4	4	34%	66%	960(100%)
5	5	32%	68%	960(100%)
6	6	39%	61%	960(100%)
7	7	32%	68%	960(100%)
8	8	43%	57%	960(100%)

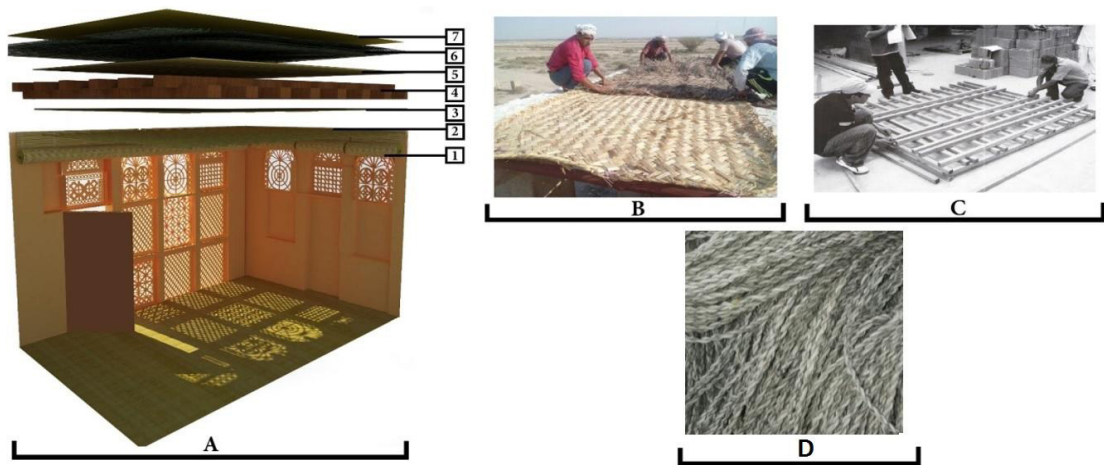


Figura 5. Estructura arquitectónica del techo de cazador de viento Baber. Fuente: Elaboración de los autores.

y 6x6. Se encuentran en el piso superior y se puede acceder a ellas a través de escaleras construidas en la entrada de la casa, o en la sala de estar o sala familiar, hasta el techo/espacio interno del cazador de viento Baber (Mazraeh & Pazhouhanfar, 2018; Mazraeh & Pazhouhanfar, 2020). Esta habitación es un ejemplo perfecto de la arquitectura sustentable de Bandar-Lengeh (Figura 3), dada su variedad de componentes como ventanas con celosías (Figura 3A), madera escuadrada (Figura 3B), y nichos (Figura 3C). Sus paredes brindan las condiciones adecuadas para que los usuarios duerman, coman, lean, etc., al recibir viento del mar y absorber la luz desde primera hora de la tarde hasta última hora de la mañana.

CELOSÍA

Las casas de los musulmanes siguen un diseño único que incluso se ha enfatizado en el Islam (Putri & Sunesti, 2021), donde la privacidad en la arquitectura tradicional ha tenido un impacto notable en la satisfacción del usuario (Philokyprou & Michael, 2021). Sus celosías comúnmente se han ideado como cortinas gruesas desde la dinastía Safavieh en Irán. Con la celosía, el espacio interior no es visible durante todo el día, para mayor privacidad (Babaei, Soltanzadeh et al., 2013). También evita que la luz entre en la casa hasta cierto punto (Mohammadi Mazraeh, 2023) y los habitantes pueden hacer cómodamente

sus quehaceres cotidianos. En el pasado, los arquitectos y usuarios locales intentaban colocar celosías orientadas hacia la mayoría de los vientos regionales (a menudo hacia el mar) para experimentar mejores condiciones de aire dentro del edificio, dirigiendo el viento. Tales edificios se ven a menudo en Bandar-Lengeh. La conclusión es que todas estas funciones están ahí solo para la comodidad del usuario (Nemat Gorgani, 2002; Mazraeh & Pazhouhanfar, 2018). La Figura 4 muestra los ocho modelos de celosía más comunes en Bandar-Lengeh. Por su parte, la Tabla 2 muestra la proporción de áreas vacías en comparación con las que no lo están, que oscila entre el 57% y el 68%. Esto es para traer belleza y luz al espacio interior para la satisfacción del usuario.

Materiales y proceso de construcción

La arquitectura local ha demostrado su actitud positiva hacia la naturaleza y su significado cultural en blanco y negro (Chen, Xie et al., 2020), mientras que el uso de componentes y materiales locales ha sido una acción efectiva para el diseño (Mazraeh & Pazhouhanfar, 2018). Ha considerado que el calor intenso, la humedad y la luz en un grado extremo en Bander-Lengeh requieren aprovechar una arquitectura específica que brinde comodidad a los usuarios, siempre que sea posible. Una de las soluciones es familiarizarse con el cambio climático para poder

hacer frente a las malas condiciones meteorológicas. Indicadores como aprovechar los materiales locales (paja, mortero, piedra y yeso), reconocer espacios y utilizarlos en la dirección opuesta a la luz solar, el grosor de la pared (para proteger el edificio contra el calor/humedad), usar muchas celosías en la pared de la habitación, colocar un cazador de viento Baber a gran altura y usar techos altos, juegan un papel importante en esto. Los principales materiales utilizados para los techos, según la Figura 5, son (de interior a exterior): 1-estera (tipo absorbente de luz) (Figura 5B); 2-cuerda fabricada con hojas de árbol del dátil (Figura 5D); 3-estera de cobertura; 4-madera escuadrada vertical y horizontalmente, una sobre la otra (Figura 5C); 5-estera de cobertura; 6-hojas de dátiles; 7-paja. Cada componente expresa verdaderamente la conexión e interrelación entre la arquitectura y la naturaleza para el papel especial de los cazadores de viento Baber, como esteras absorbentes de luz para evitar que la luz intensa penetre en el lugar, una cuerda para colgar la estera en el techo, una estera de cobertura hecha de hojas del árbol del dátil, y también este mismo material para dispersar y engrosar contra el calor para evitar que el polvo descienda del techo dentro de la casa, madera cuadrada para sostener y soportar el peso del techo, y paja para cubrir las paredes y el techo para proporcionar refrigeración y calefacción en verano e invierno, respectivamente.

SOMBREADO, VENTANAS Y ORIENTACIÓN

Sombreado y ventanas (un lugar para estar alejado de la luz solar)

El sombreado (Figura 6) fue una de las pocas opciones utilizadas para evitar la entrada de luz intensa y viento cálido (en el lado este/oeste del cazador de viento Baber). Este se creó como un porche para expandir las celosías en las paredes de las habitaciones, además de agregar espacio con sombra para que

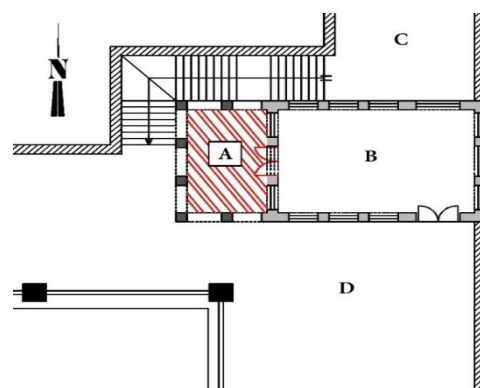


Figura 6. Espacio ocupado por sombra en el suelo (parte A) y a la vista (parte B). Fuente: Elaboración de los autores.

los usuarios pudieran aprovecharlo durante todo el día. Entre los 36 cazadores de viento Baber en Bandar-Lengeh, solo dos incluían una habitación con sombra.

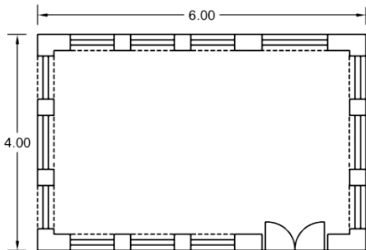
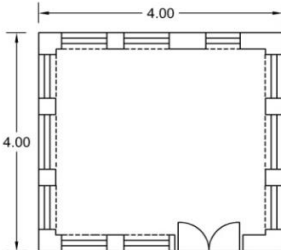
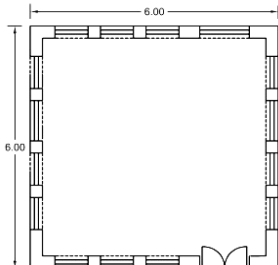
PROPORCIÓN DE ÁREAS UTILIZADAS EN EL CAZADOR DE VIENTO BABER EN TRES ESTILOS.

El cazador de viento Baber incluye áreas como una pared, un nicho en la pared (Figura 3C), el área de la puerta y la ventana de celosía (Figura 3A), que ocupaban un área específica de la pared que se determina a través de las mediciones y los datos de la Tabla 3. De un vistazo, se puede concluir que el promedio máximo de las áreas es (en orden): muro con 13,25 m², ventana de celosía con 6,62 m², nicho con 4,5 m², y puerta con 1,23 m². Como se puede ver, se intentó utilizar ventanas de celosía tanto como fuera posible en la orientación norte y sur, con 8,93 m² y 10,42 m² (en orden), para proporcionar luz natural y aire acondicionado natural dentro de la habitación.

Tabla 3. Tasa de uso de cada área en diferentes lados. Fuente: Elaboración de los autores.

extensión de la habitación (m)	Toda el área de la pared				Área de la pared (m ²)				Área de nicho en la pared (m ²)			
	N	S	W	E	N	S	W	E	N	S	W	E
4*4	19.2	19.2	19.2	19.2	9.9	8.38	11.5	11.5	0	0	7.7	7.7
4*6	28.8	28.8	19.2	19.2	15.84	15.6	11.6	12.96	0	0	2.24	0
6*8	38.4	38.4	28.8	28.8	17.4	16.28	13.28	14.8	12	10	6.4	8
Promedio de componentes	28.8	28.8	22.4	22.4	14.38	13.42	12.13	13.09	4	3.33	5.45	5.23
Promedio					13.25				4.5			
extensión de la habitación (m)	Ventana con celosía (m ²)				Superficie de la puerta				Proporción entre el área total de la pared y el nicho			
	N	S	N	N	N	S	W	E	N	S	W	E
4*4	9.3	7.7	0	0	0	3.12	0	0	2.06	2.49	2.49	2.49
4*6	12.96	10.08	3.12	6.24	0	3.12	3.12	0	2.22	2.86	3.58	3.08
6*8	9	9	6	6	0	3.12	2.24	0	1.83	2.02	2.32	2.06
Promedio de componentes	10.42	8.93	3.04	4.08	0	3.12	1.79	0	2.04	2.46	2.80	2.45
Promedio	6.62				1.23							

Tabla 4. Orientación de los cazadores de viento Baber. Fuente: Elaboración de los autores.

Tipo de habitación						
Modelo	A		B		C	
						
	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje
	28	77.8%	5	13.9%	3	8.3%

ORIENTACIÓN

Al diseñar y construir el cazador de viento Baber para abordar la conciencia climática, los espacios se estructuraron teniendo en cuenta las condiciones climáticas locales. Estos elementos incluyen ubicar las habitaciones más grandes del este/oeste, considerando su uso y longitud (Mazraeh & Pazhouhanfar, 2018). Según la Tabla 4, entre los 36 edificios con habitaciones Baber, se vio que había 28 habitaciones sur/norte de 6x4, cinco habitaciones de 4x4, tres habitaciones de 6x6 (m²) y solo se encontraron dos habitaciones este/oeste. En el modelo C, se muestran dos en el lado este/oeste.

MEDICIONES DE TEMPERATURA

El termómetro Fluke T3000fc (Figura 7), que se usa dentro del cazador de viento Baber para medir la temperatura, se puede usar para determinar las condiciones térmicas en circunstancias difíciles como las de Bandar-Lengeh. Fluke Connect permite a los usuarios registrar mediciones en línea, conectando aplicaciones y compartiendo la temperatura a través de la opción “compartir en vivo”. Otra ventaja de este dispositivo es que puede medir temperaturas que oscilan entre -200 ° C y +1.372° C, con una resolución de 0,1° C, con una temperatura de funcionamiento de -10 ° a +50° C, protección de entrada (IP42) e ITS-90 (escala térmica). Este dispositivo se usa dentro del cazador de viento Baber para medir la temperatura.

La temperatura fisiológica equivalente, o PET por su sigla en inglés, es un indicador bien conocido que se utiliza para medir y comparar diferentes grados de calor y estrés fisiológico en humanos. Aquí se usa para medir la temperatura de Bandar-Lengeh y el espacio interior de las viviendas (Tabla 5).

En el pasado, se suponía que la temperatura era uno de los indicadores sustanciales de confort en un edificio. El cazador de viento Baber podría ser compatible con diferentes situaciones climáticas regionales debido a sus elementos arquitectónicos locales y a que brinda satisfacción a los usuarios. Para determinar la temperatura con precisión en el



Figura 7. Dispositivo “Fluke T3000fc” para medir temperaturas

Tabla 5. Temperatura fisiológica equivalente – PET. Fuente: Matzarakis et al. (1999).

PET (°C)	Sensación térmica	Nivel de estrés fisiológico
<4	Muy frío	Estrés por frío extremo
4–8	Frío	Fuerte estrés por frío
8–13	Fresco	Estrés moderado por frío
13–18	Ligeramente fresco	Ligero estrés por frío
18–23	Cómodo	Sin estrés térmico
23–29	Ligeramente cálido	Leve estrés por calor
29–35	Cálido	Estrés térmico moderado
35–41	Caliente	Fuerte estrés por calor
>41	Muy caliente	Estrés por calor extremo

día 17 de cada mes (durante 24 horas), se colocó el termómetro “Fluke T3000fc” dentro de los cazadores de viento Baber a una altura de 1,2 metros (patrón de espacio para dormir en la Tabla 7) del piso, para examinar si un cazador de viento Baber, con un 63,4% de uso por día (en comparación con otros espacios), puede proporcionar más comodidad para los

Tabla 6. Temperatura interna de la habitación en diferentes momentos del día durante un año. Fuente: Elaboración de los autores.

DATOS	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO		JUNIO	
HORAS	exterior	interior	exterior	interior	exterior	interior	exterior	interior	exterior	interior	exterior	interior
0	19.5	21.7	20.3	22.2	20.8	23.2	22.3	24.7	35.7	29.8	33.7	31.2
1	19.3	21.3	20.2	22	20.5	23.2	21.6	24.6	34.5	28.5	33.2	30.6
2	19.1	21.1	20	21.8	20.1	23	20.8	24.3	33.1	28.8	32.6	30
3	18.8	21	19.8	21.5	19.7	22.8	20	24	31.8	28.4	32.1	29.7
4	18.7	21.4	19.7	21.5	19.2	22.7	19.3	23.9	30.5	28.1	31.6	29.1
5	18.5	21.1	19.6	21.4	18.8	22.6	19.3	23.9	30.8	28.4	32.2	30
6	18.3	21.3	19.8	21.5	19.8	23.2	20.6	24.9	32.1	29.8	33.2	31
7	19.3	21.7	19.8	21.5	21	24.1	22.2	25.7	33.7	31.2	34.6	31.4
8	19.3	21.9	20.3	22.8	22.2	25.2	23.5	27.2	35.2	32.9	35.9	31.9
9	19.5	22.1	21.7	24.3	23.5	26.2	25.1	27.1	36	33.7	37.2	35.2
10	21.3	24.5	22.6	24.9	24.8	26.8	26.6	27.8	36.7	37.3	38.2	35.4
11	22.6	25.3	23.6	25.7	25.5	28	27.8	28	37.1	39	39.1	36.3
12	23.2	25.3	24.3	26.1	26.1	28.6	28.6	28.6	37.3	39.1	39.7	36.7
13	23.6	25.4	24.8	26.5	26.3	28.8	29	28.2	39.5	39.2	40.1	37.1
14	23.8	25.9	25.2	26.8	26.3	29	29.2	27.7	38	38.4	40.1	37.3
15	23.2	25.4	25.1	26.7	26.2	28.8	28.8	27	37.6	37.1	39.7	37
16	22.5	22.4	24.6	25.8	25.5	28.3	28.1	26.6	37	36.3	39.2	36.7
17	22.3	21.8	24	25.4	24.5	26.2	27	25.7	36.1	34.7	38.4	35.4
18	22.2	21.8	23.6	21.8	24.2	23.5	26.3	25	35.4	33.4	37.4	35.1
19	22	21.7	23.3	21.8	23.8	23.5	25.8	25	34.7	31.6	36.7	34.4
20	21.8	21.1	22.8	22.4	23.3	23.6	25.3	25.1	34	30.7	36	33.7
21	21.6	21	22.6	22	23.1	23.7	24.8	25	33.2	30.1	35.2	33.1
22	21.5	21.1	22.2	22.1	22.7	23.6	24.2	24.9	32.5	29.7	34.6	32.4
23	21.3	21	21.8	21.4	22.3	23.5	23.7	24.9	31.8	29.1	33.9	32
Average	20.97	22.43	22.15	23.33	22.93	25.09	24.58	25.83	34.76	32.72	36.03	33.45
DATOS	JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE		OCTUBRE		NOVIEMBRE		DICIEMBRE	
HORAS	exterior	interior	exterior	interior	exterior	interior	exterior	interior	exterior	interior	exterior	interior
0	35.7	33.4	33.9	32.5	30.8	28.4	27.8	25.3	24.5	23.7	20.1	20.4
1	36.2	34.3	33.2	31.8	30.6	28.1	27.5	25.1	23.8	22.8	19.2	19.6
2	36.6	34.8	32.7	31.1	30.3	27.6	27.1	24.5	23.2	22.6	18.3	18.8
3	36.9	34.9	32.2	35.4	30	28.9	26.6	24	22.5	21.8	17.5	17.7
4	37.2	35.5	31.8	30.8	29.8	27.2	26.2	23.8	21.8	20.6	16.6	16.9
5	37.6	35.9	31.8	30.3	29.5	27.4	25.8	23.1	21.2	20.4	15.6	16
6	38.2	36.7	32.4	30.7	30.3	27.9	26.8	24.9	21.6	20.6	14.9	15.3
7	39.1	38.1	33.1	30.9	31.1	29.3	28.1	26.6	22.7	21.9	17.1	17
8	40	38.7	34.2	31.9	32.2	30.8	29.3	27	24.1	23.2	19	18.8
9	40.9	40.1	35.4	32.4	33.2	31.6	30.6	27.2	25.3	24.1	20.3	20.5
10	41.7	40.3	36.2	32.8	34.2	32.4	31.6	27.9	26.3	25.8	21.5	21.8
11	42.7	40.4	36.9	33.4	34.7	32.7	32.4	28.7	27.1	25.3	22.2	22.6
12	43.2	40.8	37.5	33.8	35.2	33.6	32.7	28.9	27.5	25.2	22.7	23
13	43.7	40.3	37.9	34.2	35.4	33.7	33.1	29.5	27.7	25.3	23	23.9
14	43.9	41.1	38.1	34.4	35.2	33.7	32.9	28.6	27.3	25.8	22.5	23.4
15	43.7	40	38	34.1	35	33.4	32.5	28.8	26.7	25.3	21.8	22.4
16	43.5	39.6	37.5	33.9	34.4	32.9	31.6	28.2	25.8	24.2	20.5	22.7

17	42.9	38.2	36.7	33.3	33.7	32	31.1	27.8	25.5	24.7	20.2	20.4
18	42.2	37.5	36.2	32.6	33.2	30.7	30.6	27.2	25.2	24.3	19.8	19.6
19	41.7	37.4	35.7	32.2	32.9	30.3	30	26.9	24.8	24	19.6	19.3
20	41.1	37.4	35.1	31.6	32.6	30	29.5	26.4	24.6	23.4	19.3	19
21	40.6	37.4	34.6	32	32.2	29.6	29	25.8	24.2	23.1	19	19.4
22	40	37.1	34	31.6	31.8	29	28.5	25.3	23.8	22.7	18.7	19.1
23	39.4	37.2	33.5	30.8	31.1	28.6	28	25.1	23.6	22.6	18.3	18.9
Average	40.36	37.8	34.94	32.44	32.49	30.4	29.55	26.53	24.62	23.48	19.49	19.85

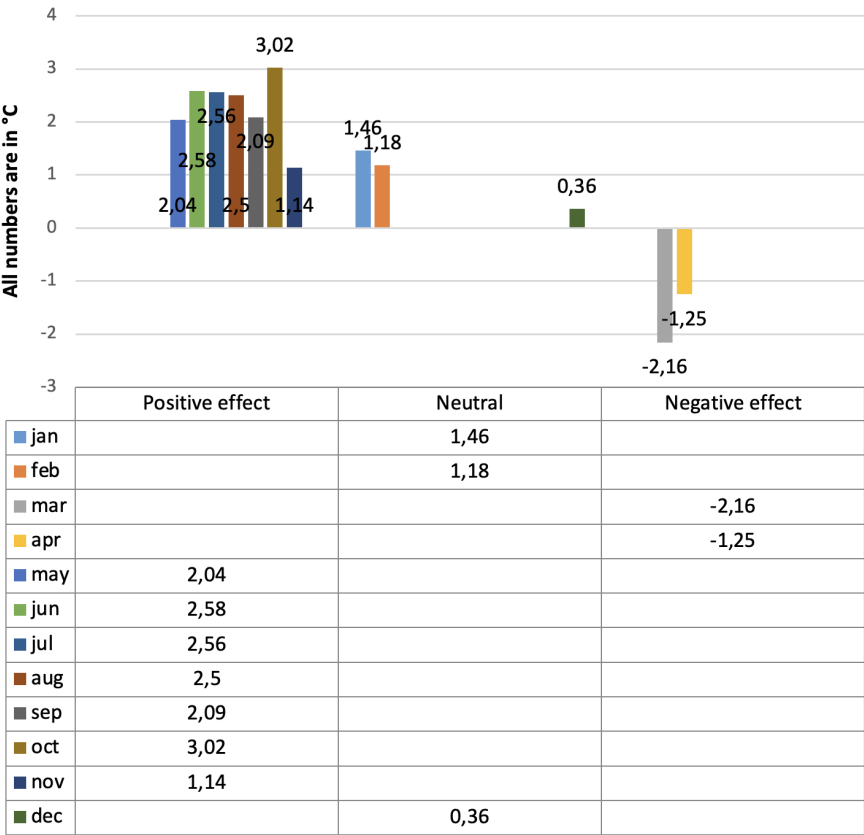


Figura 8. Papel positivo, negativo y neutro del cazador de viento Baber en comparación con la temperatura exterior. Fuente: Elaboración de los autores.

usuarios de construcciones tradicionales. Según los datos de la Tabla 5, la Tabla 6 y Figura 8, se puede observar que el comportamiento del cazador de viento Baber en diferentes meses del año es divergente. En enero y febrero, cuando las condiciones térmicas son cómodas, se puede ver un aumento de temperatura de 1,46 y 1,18 grados (temperatura promedio a diferentes horas, de la Tabla 6), respectivamente, en el interior (observado como neutral). En marzo, se supone que la condición térmica es ligeramente cálida, y se puede percibir un aumento de temperatura de 2,04 grados en el interior (observado como un efecto adverso). Sin embargo, en abril, de manera similar a marzo, un aumento de temperatura de 1,25 grados conduce a condiciones desagradables dentro del cazador de viento Baber. La gente usa estos espacios cada vez menos durante el día/noche en marzo y abril.

Sin embargo, el clima es caluroso en mayo y septiembre, y se se pueden notar temperaturas 2,04 y 2,09 grados más bajas, respectivamente. Mientras tanto, en junio, julio y agosto,

cuando el clima se considera muy caluroso, las temperaturas que son 2,5, 2,56 y 2,58 grados (respectivamente) más bajas conducen a una atmósfera relajante y adecuada en el espacio interior. En octubre, considerado cálido, la temperatura es 3,02 grados más baja, proporcionando un ambiente más seguro y agradable para los usuarios en comparación con el exterior. Por otro lado, en noviembre, que es ligeramente cálido, la habitación tiene una temperatura 1,14 grados más baja. Así también, diciembre es cómodo en sí mismo (señalado como neutral), proporcionando condiciones cómodas para los usuarios del cazador de viento Baber.

Las esteras se colocan en las paredes externas de los edificios para disipar el calor en áreas con luz solar intensa, como se muestra en la imagen de la izquierda de la Figura 8. Esta práctica ayuda a moderar la temperatura al entrar en la habitación, haciéndola más agradable. Además, estas esteras a veces se humedecen para crear una brisa más fresca dentro de la habitación, mejorando el nivel general de comodidad.

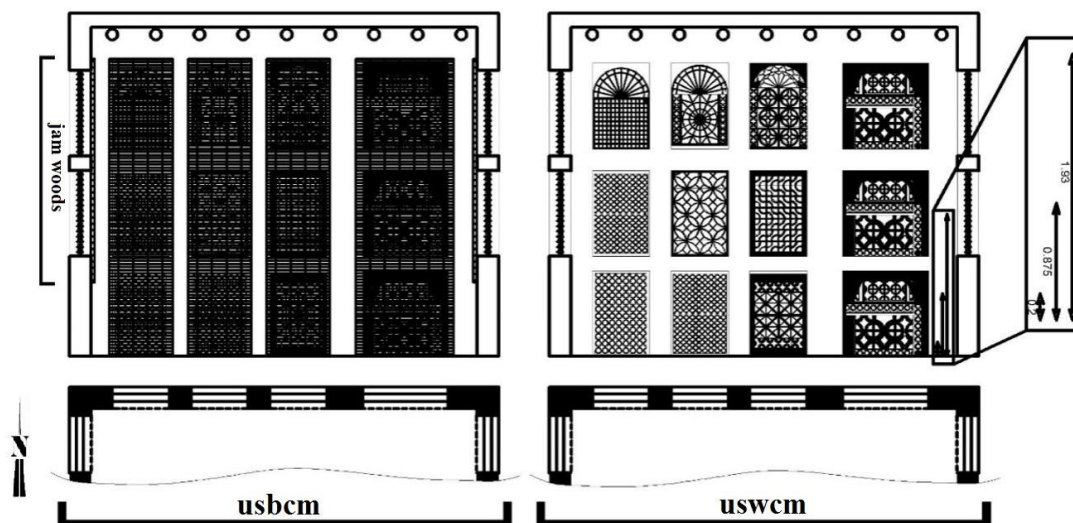


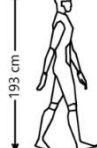


Figura 9. Medidas de luz en USBCM (izquierda) y USWCM (derecha). Fuente: Imagen de los autores.

Tabla 7. Diferentes tipos de uso del cazador de viento Baber. Fuente: Neufert & Neufert (2012).

	1	2	3
Position	Lying down (human body at 20 cm from the floor)	sitting (human body at 87.5 cm from the floor)	standing (human body at 193 cm from the floor)
			

MEDICIONES DE ILUMINACIÓN

Para analizar la luz en el entorno y también la mejora de la eficiencia energética del edificio, se utilizan varios programas de software, incluido "Ecotect". Este software proporciona un método de modelado avanzado para analizar el papel del cazador de viento Baber (Al-Saggaf, Nasir et al., 2020; Lisa, Zuraihan et al., 2021). Según varios estudios, se concluye que el modelado con Ecotect es muy preciso y altamente confiable (Salami, Abba et al., 2023; Xu and Liu, 2023). También es adecuado para diseñar y realizar cálculos iniciales con respecto a los métodos fotométricos en la industria de la construcción. La Figura 9 se utiliza para analizar el papel de la luz en el cazador de viento Baber en dos circunstancias diferentes. Una, con el uso de esteras, a saber, USBCM, y sin USWCM, para ver si el cazador de viento Baber podría brindar comodidad en las horas pico de calor (es decir, a las 14:00) para los usuarios en tres condiciones diferentes, o no.

Dado que las personas pueden aprovechar el entorno asumiendo diferentes posiciones, como acostarse, sentarse y

pararse, necesitan tener un espacio interior con la menor luz posible en las tres alturas. La Tabla 7 considera las condiciones del cuerpo humano a 20 cm (acostado), 87,5 cm (sentado) y 193 cm (de pie) del piso, para evaluar el papel de un cazador de viento Baber con elementos arquitectónicos locales.

Considerando que la luz es el segundo factor más importante bajo observación después de la temperatura en la construcción local, y de acuerdo con los resultados logrados en la Tabla 8 y Tabla 9, se puede notar que el peor período en el que se experimenta un calor extremo es a las 14:00. En las tres posiciones diferentes examinadas en el cazador de viento Baber (acostado, sentado y de pie) y en las dos configuraciones diferentes (USWCM y USBCM), a 20 cm del piso con la menor cantidad de luz, 210 lux, tanto en USWCM como en USBCM fue el mejor lugar para que los usuarios se relajaran. Después de eso, el segundo mejor fue a 87,5 cm del piso con menos luz, 240 lux, en la condición USWCM y a 210 lux, en USBCM. Finalmente, a 193 cm del suelo, la mejor opción era con la menor luz, 280 lux, en USWCM, y 240 lux, en USBCM. El promedio en los tres, sin la estera, es de 243,3 lux. Por otro lado, con la estera, a una media de 220 lux, hay una

Tabla 8. Intensidad de luz del cazador de viento Baber tanto en USWCM como en USBCM. Fuente: Elaboración de los autores.

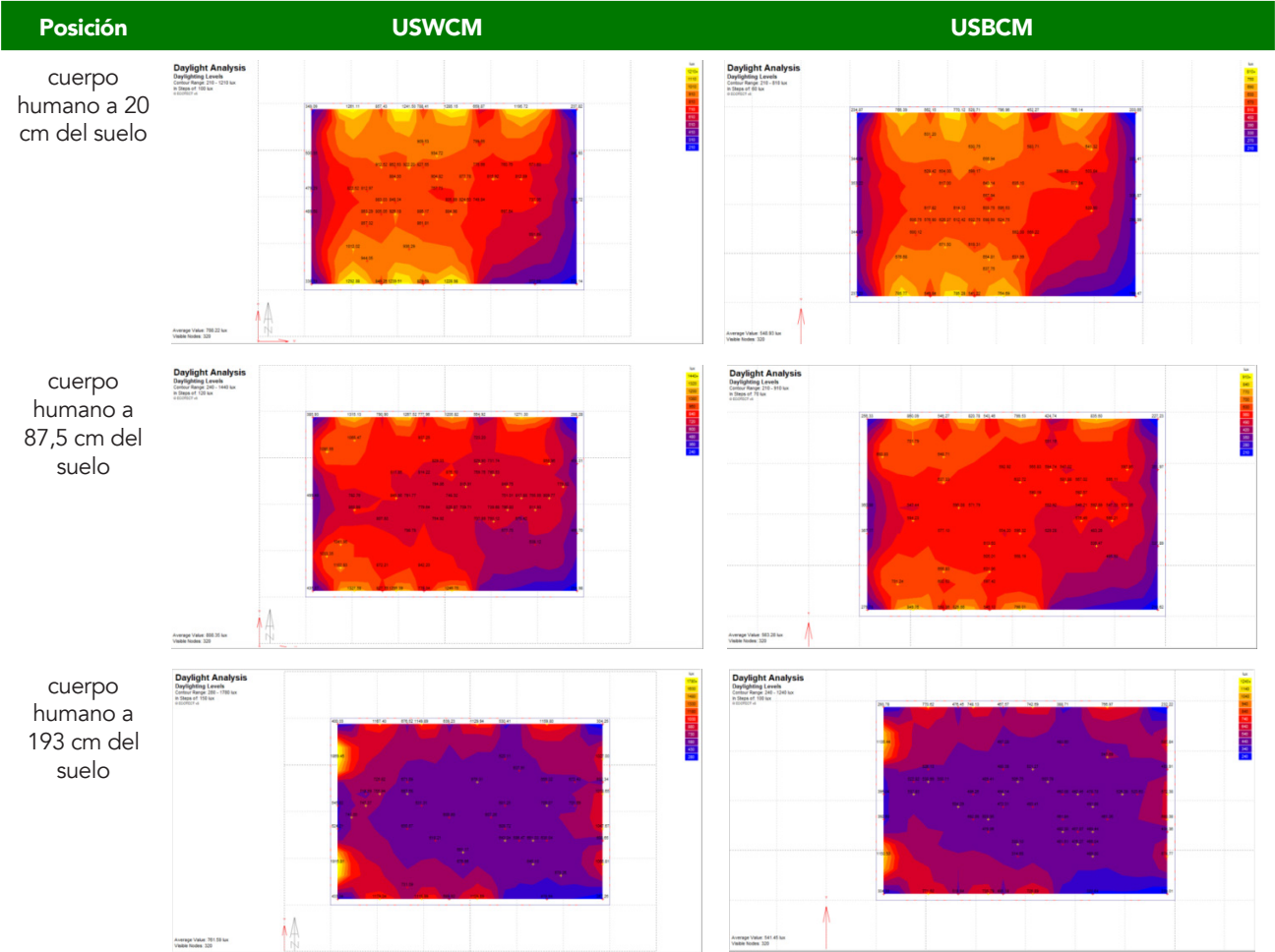


Tabla 9. Intensidad de luz mínima y máxima en USWCM y USBCM. Fuente: Elaboración de los autores.

A una altura de	Posición			
	Sin estera en LUX (USWCM)		Con estera en LUX (USBCM)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
20 cm del suelo	210	1210	210	820
87,5 cm del suelo	240	1440	210	910
193 cm del suelo	280	1780	240	1240
Promedio	243,33	1476,67	220	990

reducción de 23,33 lux. En consecuencia, una condición de luz más relajada y agradable permite a los usuarios descansar o dormir durante la noche en comparación con otras situaciones sin estera.

La información sobre la intensidad máxima de luz que ingresa al espacio se recopila de la siguiente manera: a 20 cm del piso con un máximo de 1210 lux en USWCM y 820 lux en USBCM (una diferencia de 390 lux). A 87,5 cm tiene un máximo de 1440 lux en USWCM y 910 lux en USBCM (una diferencia de 530 lux), y finalmente, a 193 cm del suelo, hay un máximo de 1780 lux (la peor entrada de luz en la habitación) en USWCM, y 1240 lux en USBCM (una diferencia de 540 lux).

Comparando el promedio en los tres, sin estera 1476.67 lux, y con estera 990 lux, se puede percibir una reducción de 486,67 lux, lo que condujo a una mayor satisfacción del usuario para dormir, descansar y relajarse.

Según una investigación similar existente, el rendimiento térmico utilizó el software Ecotect como se ve en el trabajo de Sonawane y Vakhari (2023), que estudió las casas tradicionales de la India con paredes de piedra, arcilla y techos inclinados de paja. Descubrieron que los materiales respetaban al medio ambiente y proporcionaban condiciones de temperatura confortables para los ocupantes del edificio. En el estudio de Ratree et al. (2020), al examinar el estilo de las casas nativas en Bangladesh y Sri Lanka en función del clima de la región, se analizaron las técnicas de construcción, las estrategias de diseño pasivo, el confort térmico, etc. entre las casas de barro en ambos países, utilizando el software Ecotect, y se recomendaron mejoras para recuperar energía pasiva y aumentar la comodidad del usuario en los edificios. Ratree et al. (2020) también examinaron tres estilos de construcción europeos actuales en base a la información recopilada, mostrando que el 74% de los participantes no están satisfechos con este estilo de construcción. A diferencia de aquellos sistemas constructivos que usaron materiales ecológicos, estos eran muy eficientes, y el propósito de esto era analizar el confort térmico durante un período crítico de tiempo. Mientras tanto, Gupta et al. (2020) investigaron el estilo de los edificios nativos rurales cerca de Ranchi, en el estado de Jharkhand en el este de India, donde se utilizaron los software Ecotect y Climate Consultant, utilizando casas hechas con materiales de recursos nativos, que han sido capaces de crear condiciones más adecuadas para la vida humana que los nuevos materiales. En comparación con la investigación actual, según una revisión de la literatura, se encontró que no se ha realizado tal investigación sobre el estilo del cazador de viento Baber. Este estilo de construcción demuestra la atención de los arquitectos y los usuarios de estructuras locales en la región (Hormozgan, Irán) a las condiciones de confort térmico y su conocimiento del clima y los materiales. Los componentes básicos de esta investigación describen que este estilo ha sido capaz de crear satisfacción entre sus usuarios en el sentido de comportamientos térmicos, detección de luz y bloqueo del exceso de luz para aprovechar las corrientes de viento.

CONCLUSIÓN

Entre los seis estilos diferentes de construcción de edificios en Hormozgan-Irán a lo largo de los últimos 70 años, la arquitectura local es importante entre los usuarios y arquitectos de edificios. Un ejemplo de tal edificio se encuentra en el sur de Irán y se conoce como el cazador de viento Baber. Su estilo constructivo único, que abarca la aplicación metódica de técnicas, ha captado el interés de todos, desde turistas hasta usuarios de edificios y arquitectos. Aunque la arquitectura local de Bandar-Lengeh ha sufrido muchos cambios a lo largo del tiempo, ha mantenido su identidad y se ha presentado como evidencia y documentación válidas en el procedimiento de construcción. Esta arquitectura local utiliza elementos específicos (torres de viento y celosías) junto con espacios (cazador de viento Baber) para dar comodidad a los usuarios, especialmente cuando no se utiliza un sistema de refrigeración mecánico. La intención de este artículo era presentar el cazador de viento Baber con análisis estructural para analizar los materiales, el proceso de construcción y sus elementos, como celosías y materiales locales, sombreado y las áreas utilizadas en tres estilos diferentes de cazador de viento Baber, mientras este se evalúa en condiciones USBCM y USWCM a través del análisis funcional de la luz y la temperatura. En la parte fotométrica, la persona fue evaluada en tres posiciones (acostada, de pie y sentada) a las 14:00. En consecuencia, se determina que las mejores condiciones son USWCM y USBCM en posiciones acostada y sentada (a 20 cm y 87,5 cm del suelo) con 210 lux, mientras que la peor condición es bajo USWCM cuando se está de pie.

En comparación, se tomaron medidas de pie (a 193 cm del suelo) con un máximo de 1780 lux. Por otro lado, utilizando la temperatura indicada, las mayores ventajas se brindan en mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre, mientras que enero, febrero y diciembre tuvieron una temperatura neutra y ventajas mínimas. Finalmente, se observaron condiciones adversas en marzo y abril, que resultaron en un menor uso y beneficio para los usuarios.

Tras la revisión, se ha determinado que el cazador de viento Baber muestra fortalezas y debilidades específicas, como se describe en la Tabla 10. Además, en el ámbito de la investigación centrada en el análisis de la luz, el estudio de Ahmad, Prakash et al. (2022) investigó la influencia de los materiales de construcción en la entrada de luz y la temperatura interior. Este estudio reveló que las propiedades térmicas de los nanomateriales de construcción tienen un impacto muy positivo en comparación con los materiales de construcción tradicionales. Barzegar y Sajjadi (2023) exploraron la dinámica de la luz y la temperatura en las casas tradicionales de Shiraz en un estudio relacionado. Sus hallazgos destacaron que el uso de casas locales en las condiciones actuales a menudo conduce a la insatisfacción, ya que no responden adecuadamente a las necesidades modernas. Este aspecto es particularmente relevante cuando se comparan las casas tradicionales con el cazador de viento Baber, lo que sugiere que la aplicabilidad de esta última está restringida a ciertas

Tabla 10. Fortalezas y debilidades del cazador de viento Baber. Fuente: Elaboración de los autores.

Fortalezas	
1	El cazador de viento Baber ha sido un espacio favorito para dormir una noche, atrayendo constantemente la atención de los usuarios vernáculos del edificio desde el pasado hasta el presente.
2	Esta área se usa principalmente para reuniones familiares durante la noche.
3	Al usar ventanas con celosías y el poner este espacio en la parte más alta del edificio, los ocupantes pueden maximizar la ventilación natural del mar.
4	Con su extenso diseño geométrico entre ventanas con celosía, el cazador de viento Baber se ha utilizado con éxito para la ventilación natural y el mantenimiento de la privacidad.
5	Según los análisis de la Tabla 7, la disposición de los elementos dentro de los espacios del cazador de viento Baber es tal que la ubicación más adecuada para recibir el viento es a una altura de 20 centímetros, abarcando el área de descanso del cazador de viento Baber.
6	A diferencia de las construcciones modernas en Bandar Lengeh, las ventanas del cazador de viento Baber se colocaron estratégicamente desde el nivel del piso, mejorando la comodidad de una noche de sueño.
7	Se utilizaron materiales vernáculos y hechos a mano para construir el cazador de viento Baber. Uno de esos materiales es la estera, que se ha utilizado eficazmente como cubierta en diferentes orientaciones de edificios para reducir la dura entrada de la luz solar del mediodía.
Debilidades	
1	Con la llegada de los sistemas mecánicos de aire acondicionado, estos espacios han perdido su funcionalidad y la mayoría de los edificios con cazadores de viento Baber han sido abandonados, demolidos o con todas sus paredes con celosías rellenas de mortero.

condiciones climáticas favorables durante todo el año en lugar de ser universalmente adaptable a las demandas climáticas contemporáneas y, como es bien sabido, el cazador de viento Baber se considera como un tipo único de espacio arquitectónico nativo en Hormozgan-Irán, capaz de brindar comodidad a la vida de las personas mediante el uso de materiales locales, la comprensión de las condiciones ambientales y la satisfacción de las necesidades culturales de la sociedad (mediante la creación de espacios de reunión). Todo esto conduce a la comodidad en la vida humana. Hay siete puntos positivos y un punto débil (donde se perdió el uso del cazador de viento Baber debido al uso de equipos mecánicos de aire acondicionado), lo que indica que esta área puede usarse como una nueva solución para preservar la cultura local de la región, a la vez que se usan métodos modernos.

El uso actual de viviendas locales también ha generado insatisfacción y no aborda adecuadamente las condiciones actuales. Esto es significativo, especialmente cuando se compara con el cazador de viento Baber, lo que indica que solo es factible utilizar estos espacios locales en las condiciones actuales durante ciertas épocas del año cuando el clima es agradable y favorable.

Los resultados obtenidos provienen del cazador de viento Baber en la arquitectura local de Bandar-Lengeh, que indicó que los arquitectos y usuarios han estado buscando funcionalidad y belleza en la arquitectura local en las condiciones cálidas y húmedas de la región. Por lo tanto, muestra la contemplación y el razonamiento de los usuarios y de la arquitectura en el pasado. Con suerte,

esta investigación proporcionará a la arquitectura una estructura estable para lograrlos e implementarlos en nuevas construcciones. Además, los usuarios deben hacer todo lo posible para mantener esta arquitectura como un legado. Otro tema para futuras investigaciones es explorar cómo se puede utilizar el cazador de viento Baber en entornos contemporáneos para preservar la cultura y la arquitectura vernáculos.

REFERENCIAS

Ahmad, A., Om, P., Anil K., Hasnain, S. M. M., Verma, P., Zare, A., Dwivedi, G. and Pandey A. (2022). Dynamic analysis of daylight factor, thermal comfort and energy performance under clear sky conditions for building: An experimental validation. *Materials Science for Energy Technologies*, 5, 52-65. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2021.11.003>

Al-Saggaf, A., Nasir, H., & Taha, M. (2020). Quantitative approach for evaluating the building design features impact on cooling energy consumption in hot climates. *Energy and Buildings*, 211, 109802. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109802>

Babaei, M., Soltanzadeh, H., & Islami, S. Y. (2013). A study of the lighting behaviour of Moshabak in Kashan's houses with emphasis on the notion of transparency. *Architectural Science Review*, 56(2), 152-167. <https://doi.org/10.1080/00038628.2012.729309>

Baheretibeb, Y. & C. Whitehead (2024). It takes a village to raise a child," university teachers' views on traditional education, modern education, and future I integration in Ethiopia. *Frontiers*

in Education, Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1348377>

Barzegar, Z. & K. Sajjadi (2023). Analogy of thermal comfort with the influence of openings by PMV method in traditional houses and apartments in Shiraz. *Journal of Iranian Architecture & Urbanism (JIAU)*, 14(1), 117-131. <https://doi.org/10.30475/isau.2023.231996.1424>

Dwijendra, N. K. A. & I. M. Adhika (2022). The Resilience of Undagi's Role in Traditional Balinese Architecture Based on Asta Kosala Kosali in Bali, Indonesia. *Res Militaris*, 12(6): 1099-1113.

Foruzanmehr, A. (2015). People's perception of the loggia: A vernacular passive cooling system in Iranian architecture. *Sustainable cities and society*, 19, 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.002>

Gupta, J., Chakraborty, M., Rallapalli, H. S. & Nevidhitha, R. (2020). Climate-Responsive Architecture in Rural Vernacular Dwellings: A Study in Composite Climate in Ranchi, Jharkhand, India. *AEGAUEM Journal*, 8(7).

Jaradat, H., Alshboul, O. A. M., Obeidat, I. M., & Zoubi, M. K. (2024). Green building, carbon emission, and environmental sustainability of construction industry in Jordan: Awareness, actions and barriers. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(2), 102441. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102441>

Li, J., Zhai, Z., Li, H., Ding, Y., & Chen, S. (2024). Climate change's effects on the amount of energy used for cooling in hot, humid office buildings and the solutions. *Journal of Cleaner Production*, 442, 140967. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.1409>

Lisa, N. P., Zuraihan, Z., Fernand, R., & Siska, D. (2021, April). Estimation of energy consumption efficiency in office rooms cooling systems to create thermal comfort for the user. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 738, No. 1, p. 012016). IOP Publishing.

Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International journal of biometeorology*, 43, 76-84. <https://doi.org/10.1007/s004840050119>

Mazraeh, H. M. & M. Pazhouhanfar (2018). Effects of vernacular architecture structure on urban sustainability case study: Qeshm Island, Iran. *Frontiers of architectural research*, 7(1): 11-24. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2017.06.006>

Mazraeh, H. M. & M. Pazhouhanfar (2020). Functionalism of wind renewable energy in vernacular elements of wind catcher and Moshabak (Case Study: Qesh Island). *Journal of Urban & Environmental Engineering*, 14(1). <https://periodicos.ufpb.br/ojs/index.php/juee/article/view/51925/30532>

Mohammadi Mazraeh, H. (2021). Position of Entrance in the Architecture of Vernacular Buildings of Bandar-Lengeh. *Journal of Urban Development and Architecture-Environment Identity (JUDA-EI)*, 2(6): 21-39. https://www.armanshahrjournal.com/article_80507_c10c85bd9676bec9be9e5b07ea2bc694.pdf

Mohammadi Mazraeh, H. (2022). The Role of the Function of Semi-Open Space in the Structure and Architecture of the Native Buildings of Bandar-Lengeh. *Journal of Urban Ecology*

Researches 13(Series 27), 1-18. <https://doi.org/10.30473/grup.2022.58150.2607>

Mohammadi Mazraeh, H. (2023). Recognition of Designs and Motifs of Architectural Windcatchers and Openings Native to City of Bastak. *Journal of Iranian Handicrafts Studies*, 5(2), 115-128. <https://doi.org/10.22052/HSI.2022.246448.1026>

Nemat Gorgani, O. (2002). Light Background in Architecture and Lighting Fixtures in Iran Islamic Art, Asar.

Neufert, E. & P. Neufert (2012). *Architects' Data*, John Wiley & Sons.

Philokyprou, M. & A. Michael (2021). Environmental sustainability in the conservation of vernacular architecture. The case of rural and urban traditional settlements in Cyprus. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(11), 1741-1763. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1719235>

Putri, A. K. & Y. Sunesti (2021). Sharia branding in housing context: A study of halal lifestyle representation. *Journal Sosiologi Walisongo*, 5(1): 77-92. <https://doi.org/10.21580/jsw.2021.5.1.7268>

Ratree, S. M., Farah, N., & Shadat, S. (2020, June). Vernacular Architecture of South Asia: Exploring Passive Design Strategies of Traditional Houses in Warm Humid Climate of Bangladesh and Sri Lanka. In *Proceedings of the International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism-ICCAUA* (Vol. 3, No. 1, pp. 216-226).

Razavian, F., Alemi, B., Kamali Zarchi, S., & Tafreshi, F. (2023). Studying and Proposing an Energy-efficient Residential Design for Kashan with a Hot and Dry Climate. *Journal of Solar Energy Research*, 8(2), 1559-1573. https://jser.ut.ac.ir/article_92582.html#:~:text=10.22059/JSER.2023.354267.1273

Roshan, G., Yousefi, R., Kovács, A., & Matzarakis, A. (2018). A comprehensive analysis of physiologically equivalent temperature changes of Iranian selected stations for the last half century. *Theoretical and applied climatology*, 131, 19-41. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1950-3>

Salami, B. A., Abba, S. I., Adewumi, A. A., Dodo, U. A., Otukogbe, G. K., & Oyedele, L. O. (2023). Building energy loads prediction using bayesian-based metaheuristic optimized-explainable tree-based model. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02676. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02676>

Sargazi, M. A. (2023). The Effect of Natural Materials-Based Climate Adaptation Techniques on Thermal Comfort in the Vernacular Architecture of Sistan, Iran. *Iranian Journal of Archaeological Studies*, 13(2). https://ijas.usb.ac.ir/article_8042.html

Sonawane, M. & A. B. Vakharia (2023). Comparative Analysis of Thermal-performance of vernacular dwelling in Arid climate of India. *International Journal of Technology Engineering Arts Mathematics Science*, (1), 403-408. https://aismsioitresearch.com/wp-content/uploads/2023/12/SB_IJTEAMS_61.pdf

Toroxel, J. L., & Monteiro Silva, S. (2024) A Review of Passive Solar Heating and Cooling Technologies Based on Bioclimatic and Vernacular Architecture. *Energies* 17(5), 1006. <https://doi.org/10.3390/ener17051006>

[org/10.3390/es17051006](https://doi.org/10.3390/es17051006)

Xu, F. & Liu, Q. (2023). Building energy consumption optimization method based on convolutional neural network and BIM. *Alexandria Engineering Journal*, 77, 407-417. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.06.084>

INTEGRACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CIRCULARIDAD AL DISEÑO ARQUITECTONICO MEDIANTE BIM

INTEGRATION OF CIRCULARITY STRATEGIES INTO ARCHITECTURAL DESIGN THROUGH BIM

INTEGRAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CIRCULARIDADE AO PROJETO ARQUITETÔNICO POR MEIO DO BIM

Viviana Duran-Navarrete

Arquitecta, Estudiante de Postgrado
Departamento de Diseño y Teoría de la Arquitectura, Facultad Arquitectura, Construcción y Diseño
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<https://orcid.org/0009-0007-4927-2858>
vduran@egresados.ubiobio.cl (Autora de Correspondencia)

Rodrigo García-Alvarado

Doctor en Representación Arquitectónica, Profesor Titular
Departamento de Diseño y Teoría de la Arquitectura, Facultad Arquitectura, Construcción y Diseño
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<https://orcid.org/0000-0003-2216-2388>
rgarcia@ubiobio.cl

Mabel Vega-Coloma

Doctora en Ingeniería, Académica
Departamento de Ingeniería en Maderas, Facultad Ingeniería
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<https://orcid.org/0000-0003-1599-6747>
mvega@ubiobio.cl



RESUMEN

La industria de la construcción representa gran parte del consumo de recursos naturales, proyectándose el aumento de residuos de construcción y demolición (RCD) a nivel mundial en un 70% al año 2050 si no se toman medidas urgentes. La aplicación de economía circular en la construcción, requiere selección de productos en base a su potencial circular, en la fase de diseño, para optimizar la reutilización y minimizar residuos. Se propone metodología mixta combinando componentes cualitativos, explorando cómo los actores involucrados en la construcción integran, múltiples factores que influyen en la recuperación del material, asignándoles valores porcentuales que reflejan el potencial circular del producto. Esta información cuantitativa, se visualizará gráficamente en BIM (Building Information Modeling), obteniendo cuantificación sintética en porcentaje de RCD. Se compara la circularidad del modelo de estudio, con uno más favorable, y otro menos favorable. Detectándose diferencias sustanciales en la circularidad, y una determinación en porcentaje de RCD, para formular diseños informados.

Palabras clave

diseño circular, recuperación de materiales, escala transición circular, BIM

ABSTRACT

The construction industry represents a large part of the consumption of natural resources, with construction and demolition waste (CDW) projected to increase worldwide by 70% by 2050 if urgent measures are not taken. Applying circular economy in construction requires product selection in the design phase based on their circular potential, optimizing reuse to minimize waste. A mixed methodology is proposed, combining qualitative components and exploring how the actors involved in construction integrate multiple factors that influence the recovery of the material, assigning them percentage values that reflect the circular potential of the product. This quantitative information will be displayed graphically in BIM (Building Information Modeling), obtaining a synthetic quantification of the percentage of CDW. The circularity of the study model is compared with a more favorable one and a less favorable one, detecting substantial differences in circularity and determining the CDW percentage to formulate informed designs.

Keywords

circular economy, materials recovery, circular transition scale, BIM

RESUMO

O setor de construção é responsável por uma grande parte do consumo de recursos naturais, com a projeção de que os resíduos globais de construção e demolição (CDW) aumentem em 70% até 2050, se não forem tomadas medidas urgentes. A aplicação da economia circular na construção exige a seleção de produtos com base em seu potencial circular, na fase de projeto, para otimizar a reutilização e minimizar o desperdício. Propõe-se uma metodologia mista que combina componentes qualitativos, explorando como os atores envolvidos na construção integram vários fatores que influenciam a recuperação de materiais, atribuindo valores percentuais que refletem o potencial circular do produto. Essas informações quantitativas são visualizadas graficamente no BIM (Building Information Modelling), obtendo-se uma quantificação sintética em porcentagem de RCD. A circularidade do modelo de estudo é comparada com um modelo mais favorável e outro menos favorável. São detectadas diferenças substanciais na circularidade e uma determinação em porcentagem de RCD, para formular projetos informados.

Palavras-chave:

projeto circular, recuperação de materiais, escala de transição circular, BIM

INTRODUCCIÓN

El sistema productivo lineal de la industria de la construcción a nivel mundial ha generado que el planeta transforme modelos de producción insostenibles (Lacouture, 2013) consumiendo grandes volúmenes de materias primas (Fiel, 2022), generando grandes cantidades de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) (Mora, 2021). Esto se traduce en el agotamiento del 40% de los materiales naturales, el consumo del 40% de la energía y el 15% de los recursos de agua dulce (Akanbia et al., 2018).

Según Kibert (2008), el 50% de los residuos generados por la industria de la construcción a nivel mundial se deben a demolición (Ghisellini et al., 2018), mientras que sus impactos indirectos están relacionados con la eliminación de residuos de construcción (Ossio, 2021). Por lo tanto, es considerada una de las industrias clave para una transición hacia la economía circular (EC) (Prieto-Sandoval et al., 2017).

Según un informe del Banco Mundial, "si no se adoptan medidas urgentes, los desechos a nivel mundial aumentarán en un 70% para 2050" (Climent Salvador, 2021). El objetivo es hacerse cargo de la sobreexplotación de materias primas y los residuos antes de que se produzcan, e implementar conceptos de sustentabilidad y circularidad en el proceso de diseño (Mora, 2021).

La Economía Circular busca el desarrollo sostenible a través de un trabajo colaborativo y el cierre de los flujos de energía y materiales (Mercader Moyano et al., 2019), diseñando productos para ser reutilizados y reciclados (Climent, 2021). Para lograrlo, debe considerar indicadores que promuevan circularidad (Corantioquia, 2022) en diseño y uso de materiales reciclables (Potting et al., 2017).

La evaluación de la capacidad de recuperación de los materiales, centrada en la percepción y experiencia de los representantes de las empresas constructoras, puede ser un método innovador que respalde un marco holístico para definir el potencial circular de los recursos (Ulgiati, 2018). Sin embargo, muchas empresas carecen de la información (Ca et al., 2013) necesaria para seleccionar las herramientas y técnicas adecuadas a sus necesidades (Enshassi et al., 2014).

La integración de estrategias circulares en el diseño conceptual a través del entorno BIM (Building Information Modeling) software Revit, facilitaría la visualización gráfica de circularidad de los materiales permitiendo una mejor elección, a través de una base de datos integrada de geometría con datos numéricos (Climent, 2021).

Esta investigación desarrolla un estudio y aplicación de estrategias circulares (EC), mediante BIM, para medir el

potencial circular (Salehabadi y Ruparathna, 2022) de los elementos constructivos, considerando factores que ayuden a optimizar la reutilización y reciclaje con el fin de minimizar el volumen de residuos y la complejidad del reciclado de materiales (Zhang & Jia, 2021).

Es por ello que, se sondea una Metodología sencilla que integre base de datos de una encuesta de percepción aplicada a los representantes de las empresas constructoras, quienes poseen el conocimiento holístico de los valores locales y de los proyectos, pudiendo converger en un solo indicador múltiples factores que influyen en la recuperación de los materiales (Mesa & Esparragoza, 2018). Luego, la información cuantitativa resultante será integrada en el entorno BIM para una visualización gráfica en los modelos y una cuantificación sintética en porcentaje de RCD, mediante una aplicación genérica.

METODOLOGÍA

La investigación adoptará un enfoque mixto que combina componentes cualitativos y cuantitativos para comprender la viabilidad de incorporar (EC) a partir del diseño conceptual BIM.




Los diseñadores sostenibles deben medir el potencial circular de los materiales, mediante métodos y herramientas disponibles.

Linder et al. (2017) y (Prieto-Sandoval et al., 2017) recomiendan que una métrica de circularidad se centre en medir la circularidad; "la fracción recuperable de un producto que proviene de productos usados", como atributo único de la calidad de cada material (Lacouture, 2013).

Para medir circularidad, consideraremos propuesta del Informe de Potting et al. (2017), que declara "recopilar datos semicuantitativos y compilarlos en indicadores que brinden información significativa. Los indicadores semicuantitativos pueden organizarse en clases; "rojo, amarillo, verde" (Mora, 2021).

En base a lo anterior la medición de la fracción recuperable del material, se determinará en tres atributos (Nieroa & Kalbar, 2019) que definirán el potencial circular; (a) Casi todo es recuperable (b) Algunas partes son recuperables (c) Casi nada es recuperable. La información sobre los potenciales circulares de los materiales se obtiene por medio de un trabajo de campo, aplicando una encuesta de percepción a los representantes de las empresas constructoras, por su conocimiento holístico en los múltiples factores que afectan la capacidad de recuperación de un material.

Tabla 1. Estrategias de circularidad. Fuente: Informe político Potting et al. (2017).

Economía Circular		Estrategias Circulares	Conceptos Estrategias circulares
 Creciente circularidad	Uso y fabricación de productos más inteligente	Ro Rechazar	Utilizar el producto desechado o sus partes en un nuevo producto con una función diferente.
		R1 Repensar Rediseñar	Hacer que el uso del producto sea más intensivo, compartiendo productos o poniendo productos multifuncionales en el mercado.
		R2 Reducir	Aumentar la eficiencia en la fabricación o el uso de productos al consumir menos recursos naturales y materiales.
 regla general: mayor nivel de circularidad menos recursos naturales y menos presión ambiental	Extender la vida útil del producto y sus partes	R3 Re-Usar Recuperar	Reutilización por otro consumidor del producto desechado que todavía está en buenas condiciones y cumple su función original.
		R4 Reparar	Reparación y mantenimiento del producto defectuoso para que pueda ser utilizado con su función original.
		R5 Restaurar Renovar	Restaurar un producto antiguo y actualizarlo.
 Economía Lineal	Aplicación útil de materiales	R6 Remanufacturado	Utilizar partes del producto desechado en un nuevo producto con la misma función.
		R7 Reutilizar	Utilizar partes del producto desechado o sus partes en un nuevo producto con una función diferente.
		R8 Reciclar	Procesar materiales para obtener la misma (grado alto) o menor (grado bajo) de calidad.
		R9 Recuperar	Recoger materiales o productos que ya han sido utilizados, y que aún mantienen su utilidad y reintroducirlos en el proceso productivo.
		R10 Valorizar energéticamente	Incineración de materiales con valorización energética.

COMPONENTE CUALITATIVO

La investigación cualitativa se adecua al análisis de contenido y la encuesta explora cómo los actores involucrados en la construcción conceptualizan y comprenden los significados atribuidos a la circularidad.

ESTRUCTURA ENCUESTA DE PERCEPCION; ESCALA TRANSICION DE POTTING

Conocido como estrategias 10R. es el marco que permitirá estructurar la encuesta (Javier y Xavier, 2019) de medición de la capacidad de recuperación de los materiales, recopilando datos semicuantitativos y compilarlos en indicadores que brinden información significativa (Tabla 1).

Las EC, R0 a R2; no serán materia de estudio no se relacionan directamente con la fase de ejecución (Mora, 2021). La investigación se definirá en función de las EC, R3 a la R10.

METODOLOGÍA ENCUESTA DE PERCEPCIÓN

Se reviso el contenido, por un experto, profesor UBB. Validándose redacción, compresión de preguntas de encuesta piloto, aplicada a tres constructoras de la zona, diferentes de la muestra. El cuestionario de la encuesta se complementó con una definición de las EC del Informe de Potting et al. (2017), para aunar criterios de respuesta de la muestra.

La encuesta se estructuró en tres categorías. La primera mide percepciones de capacidad de recuperación

Tabla 2. Cuantificación porcentajes RCD. Fuente: Elaboración de los autores.

TABLA DE CUBICACION DE ESTRUCTURA DE MUROS								
			A	B	C	D	E	F
VIVIENDA	PARTIDA	ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS	VOLUMEN (m ³)	%DE RESIDUO (%) (c)	(A)*(B) %RCD POR MATERIAL	PESO ESPECIFICO PROMEDIO (Kg/m ³)	(D)*(A) CALCULO PESO TOTAL DE MATERIALES (Kg)	(E)*(B) CALCULO DE PESO TOTAL DEL RESIDUO (Kg)

Tabla 3. Rangos de corte potencial circular en Revit. Fuente: Elaboración de los autores.

Partida Constructiva	Material	(c) Casi nada %	(a) Casi todo %	(b) Algunas partes %	% Potencial circular total (a)+(b)
Datos	(Incluir del proyecto)	(Incluir de resultados encuesta de percepción)			(sumatoria)
%Rango Corte		xx			yy
		Max. Baja circularidad			Min. Alta circularidad

de materiales. La segunda, complementa con factores que afectan en la capacidad de recuperación de los materiales. La tercera pregunta datos personales del entrevistado. (Anexo A). Estas se realizaron durante 5 días, el autor, dio una breve introducción verbal e instrucciones para completar el instrumento de medición. Además de resolver dudas y leer el consentimiento informado antes de realizar preguntas.

UNIVERSO DE LA MUESTRA

Se utilizó un método de muestreo no-probabilístico seleccionando 10 constructoras representativas, que abarcan el 67% de las empresas de la Provincia de Arauco, con experiencia en proyectos de viviendas sociales rurales. La muestra no es aleatoria, se seleccionó por contactos profesionales del investigador. Por motivos de confidencialidad, los nombres de empresas específicas se han excluido aquí.

COMPONENTE CUANTITATIVO: VALORACIÓN ATRIBUTOS (A), (B), (C)

Los múltiples factores que influyen en la recuperación material se enmarcan en tres atributos circulares reflejando la frecuencia de una percepción circular;

(a) Casi todo...

(b) Algunas partes... ... de esa fracción del material residual es recuperable

(c) Casi nada...

Los valores tabulados se representan en porcentajes, facilitando la interpretación objetiva.

Tabla 4. Rangos corte Tipo semáforo; visualización Revit. Fuente: Elaboración de los autores.

Indicador Circular	Color asignado	Rango corte %
(a)Casi todo	Verde	yy% a 100%
(b)Algunas partes	Amarillo	xx+1% a yy-1%
(c)Casi nada	Rojo	1% a xx%

Las variables dependientes incluyen el indicador de circularidad; capacidad de recuperación de los materiales, y las EC, son variables independientes

Fracción no recuperable (b)

Porcentaje del material que puede mejorar su recuperabilidad, incorporando factores que mejoran el diseño.

Fracción no recuperable (c)

Para calcular el porcentaje del peso de los residuos de la obra, se utilizarán los datos tabulados desde las encuestas, junto con el peso específico de los materiales en la base de datos de Revit, (Fernández & Raposo, 2022) permitirán determinar el peso de reciclaje de cada partida en obra. (Tabla 2). acercándose a los protocolos de gestión de residuos en Chile; "Hoja de ruta RCD-2035" como en todos los países de la Unión Europea; Norma de la directiva Europea 2008/98/CE.

Tabla 5. Materiales caso de estudio. Fuente: Elaboración autores

Partida Constructiva		Base	Propuesta 1	Propuesta 2
muros		Tabiquería 2"x3"	Tabique Metalcom	Muros hormigón armado
Estructura	techumbre	Cercha 2"x4" costaneras 2x2"	Cercha y costanera de Metalcom	Cercha 2"x4" costaneras 2x2"
piso		Radier 8cm	Placa madera	Radier 8 cm
Fundación		Cimentación corrida	Poyos hormigón 30x30x60 Viga madera 3"x8"	dados de Hormigón 80x80x40
Cubierta		Zinc alum	Teja de Zinc alum.0.35cm	Tejuela asfáltica 0.35 cm
Rev. Interior		Yeso Cartón (Z.S) Fibrocemento (Z.H)	Placa de madera. (Z.S) Fibrocemento (Z.H)	Hormigón a la vista
Rev. Exterior		Siding fibrocemento	Madera Machihembrada	Siding fibrocemento
Ventanas		4 de Aluminio de 130x120cm 1 de Aluminio de 100x100cm 1 de Aluminio de 60x60cm 1 de Aluminio de 60x90cm	4 de PVC de 130x120cm 1 de PVC de 100x100cm 1 de PVC de 60x60cm 1 de PVC de 60x90cm	4 de madera de 130x120cm 1 de madera de 100x100cm 1 de madera de 60x60cm 1 de madera de 60x90cm
Puertas		1 madera Maciza 90x200cm 5 placarol 70cm	1 metálicas 90x200cm 5 metálicas 85cm	6 madera Maciza 85x200cm

RANGOS DE CORTE; INTEGRACIÓN A REVIT

A través del software Revit (Jalaei & Jrade, 2014) se asignará un color para facilitar visualización gráfica, el potencial circular total del material será el resultado de (a) + (b) el valor del porcentaje es proporcional a su circularidad, mientras que en (c), su porcentaje inversamente proporcional a la circularidad del elemento, individualizándose esta variable como el material residual o porcentaje de RCD (Tabla 4).

Definiéndose a través de una ecuación matemática sencilla el promedio de los porcentajes más altos, del potencial circular total de los materiales (a)+(b), este valor dará el rango de corte de mayor circularidad. Mientras que el promedio de los porcentajes más altos de (c), dará el rango de corte de menor circularidad (Tabla 3).

Cada rango (Tabla 3). para incorporarse en cuadro "reglas de Filtro" del paso del Tutorial; IV.) debe asimilarse a colores de acuerdo con:

IMPLEMENTACIÓN CASO DE ESTUDIO A REVIT

Se proporcionará un Tutorial para integrar el potencial circular de materiales en el software Revit. asociando indicadores tipo "semáforo". (Anexo D). Verificándose la viabilidad del método a través de la consulta a dos

expertos en la herramienta de modelado 3D. Para ello se comparó una vivienda base, con una propuesta 1 más favorable, y propuesta 2 menos favorable. (Tabla 5).

PLANIMETRÍA CASO DE ESTUDIO

Vivienda de Madera de 62.24 m2, características de diseño (Figura 1, Figura 2 y Figura 3). Se desarrollará modelo con Autodesk Revit.

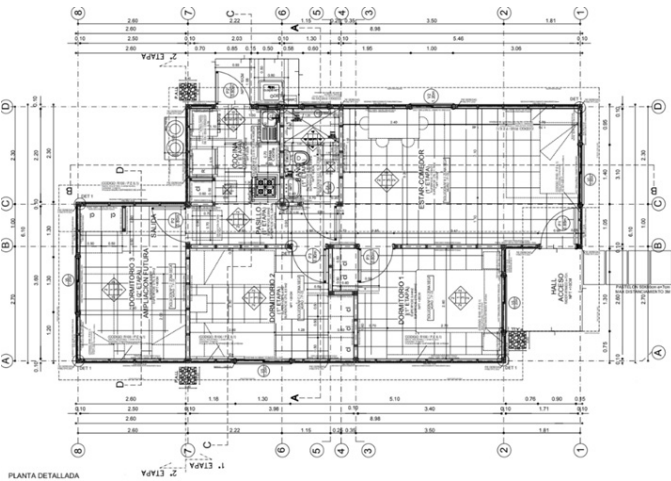


Figura 1. Planta arquitectura, tipología masiva. Fuente: Elaboración de los autores

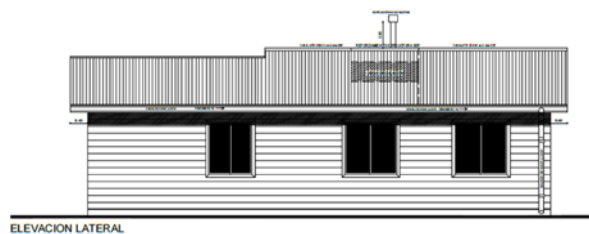
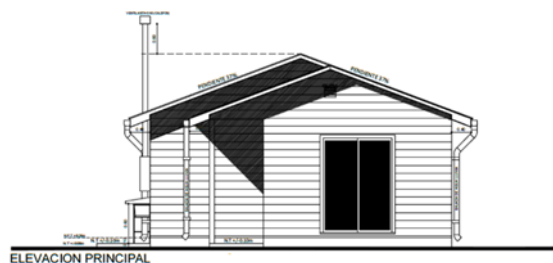


Figura 2. Elevación principal y lateral izquierda. Fuente: Elaboración de los autores

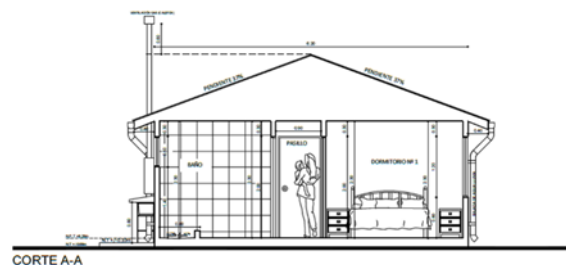


Figura 3. Corte transversal y elevación lateral derecha. Fuente: Elaboración de los autores

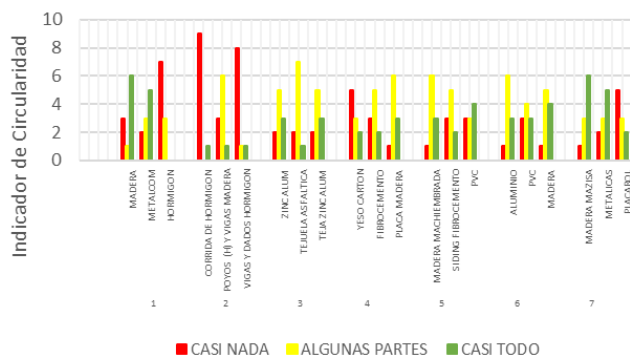


Figura 4. Tabulación Recuperar. Fuente: Elaboración de los autores

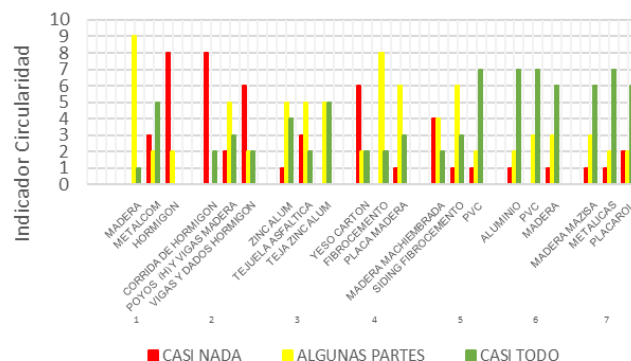


Figura 5. Tabulación Reutilizar. Fuente: Elaboración de los autores

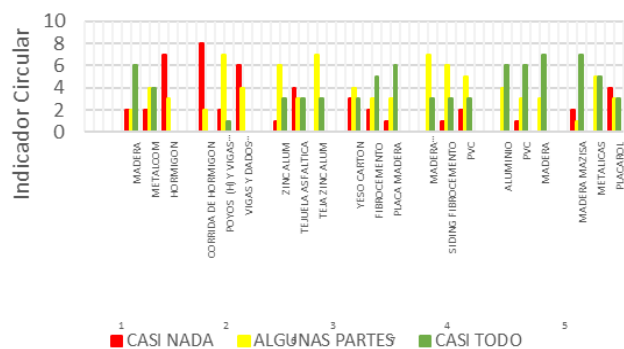


Figura 6. Tabulación Reciclar. Fuente: Elaboración de los autores

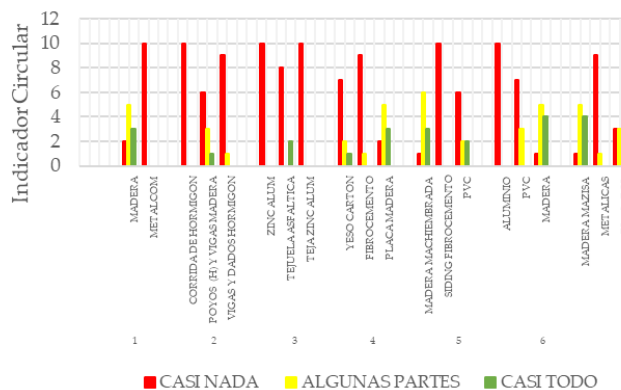


Figura 7. Tabulación Incinerar. Fuente: Elaboración de los autores



Figura 8. Estructura y Fundación. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 9. Cubierta y Rev. Interior. Fuente: Elaboración de los autores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las empresas consideraron el mismo concepto para las estrategias Recuperar (Figura 4) Reutilizar (Figura 5). Observándose que, el hormigón en las partidas de estructura y fundaciones presenta un bajo porcentaje de circularidad, al contrario, la madera se presenta con un alto potencial de ser reutilizada.

Reparar y Restaurar; Se refiere a recuperar el valor histórico y por falta de mantención. Los resultados definieron estas EC no vinculantes para la construcción.

Remanufactura; El concepto, indica la inaplicación de la EC en la fase de construcción, al inclinarse los votos a la opción (c) Casi nada.

Reciclar; EC más conocida y aplicada por los contratistas, visualizamos la tendencia a una media-alta circularidad. (Figura 6)

Se observa que los encuestados en las EC, Recuperar Reutilizar y Reciclar, reconocen el elemento más pesado como el hormigón y los elementos de menor calidad en su composición como el yeso cartón y la puerta de placarol, de menor potencial circular.

Incinerar; Las repuestas reflejan una tendencia a no incorporar esta Estrategia (Figura 7). Solo en las alternativas que consideran madera la tendencia a la incineración es media-alta.

Dado los resultados; “no todas las estrategias Circulares pueden ser inherentemente sostenibles, requiere un análisis previo que defina donde situar esta estrategia”. Este análisis encontró igualdad entre los resultados de Recuperar y Reciclaje del 100% y Recuperar y Reutilizar 57%. Aunque el reciclaje de materiales de construcción es práctica común requiere más uso de energía, la reutilización está orientado al valor. Se considera entonces la recuperación por sobre el reciclaje (Salehabadi & Ruparathna, 2022), entendiendo que este se da cuando y ya no se puede recuperar el material.

MEDIR LA CIRCULARIDAD

No es posible llegar a determinar un porcentaje absoluto de recuperación por cada material.

Por ello se asignan valores numéricos a las respuestas traduciendo a porcentaje los rangos de atributos circulares estableciendo cuanto “puede recuperarse.”; (a)Casi todo, (b)Algunas partes, (c)Casi nada (Figura 8, Figura 9, Figura 10 y Figura 11).



Figura 10. Rev. Exterior y ventanas. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 11. Puertas. Fuente: Elaboración de los autores.

Figura 12. Factores que impiden reciclar. Fuente: Elaboración de los autores.

La grafica "tipo semáforo", reitera el hormigón, placarol y el yeso cartón, los materiales que menor circularidad presentan.

FACTORES DE DISEÑO QUE POTENCIAN LA RECUPERACIÓN

La tendencia en las acciones de las Empresas Constructoras es incluir factores básicos que influyen en la capacidad de recuperación de los materiales, se demuestra en la encuesta una fuerte tendencia a la sostenibilidad, tanto en su incorporación en el diseño de ensambles, estratificación, calidad, etc. como en la incorporación de acciones en terreno de separación de materiales.

Se evidencia fuertemente la falta de instalaciones para el Reciclaje en la Zona (Figura 12).

RANGOS DE CORTE INTEGRACIÓN A REVIT

Determinaremos el potencial circular total como el resultado de (a) + (b), (Tabla 6). el promedio de los porcentajes más altos, del potencial circular total de los materiales, dará el rango de corte de los porcentajes de mayor circularidad. Mientras que el promedio de los porcentajes más altos de (c), dará el rango de corte de los porcentajes de menor valoración (Tabla 7).

VISUALIZACIÓN GRÁFICA EN REVIT Y APROXIMACIÓN SINTÉTICA.

La información geométrica de Revit con la incorporación de los porcentajes de (c) obtenemos el volumen de los materiales del proyecto, con ello el porcentaje de RCD que se emite por material. Para cumplir con la meta propuesta en la Hoja de Ruta RCD Economía Circular en Construcción. "Al menos el 30% del volumen de los RCD se valoriza: Reutilización..." Mientras que la meta para el 2035, debe alcanzar al 70% del volumen de los RCD valorizados. Como se detalla en (Tabla 8).

De este modo, la valoración de dichos materiales y/o sistemas constructivos, debiese aumentar en promedio un 3.7% al año 2025 y un 8.65% al año 2035.

Analizamos la vivienda base a las políticas de la Unión Europea, para 2020, se debería reciclar o reutilizar el 70% del total del peso de los residuos procedentes de RCD., nos da un peso de 31.257,28, RCD, el 70% que se debería estar valorizando son 21,880,96 RCD al año 2020 para cumplir con la meta propuesta según la directiva europea 2008/98/CE.

Tabla 6. Cálculo rangos corte. Fuente: Elaboración de los autores.

Partida Constructiva	Material	(a) Casi nada %	(b) Casi todo %	(c)Algunas partes	Potencial circular total
Estructura	Madera	30	10	60	70
	Metalcom	20	30	50	80
	Hormigón	70	30	0	30
Fundaciones	Corrida de Hormigón	90	0	10	10
	Poyos y vigas	30	60	10	70
	Vigas y dados H	80	10	10	20
Cubierta	Zinc Alum	20	50	30	80
	Tejuela asfáltica	20	70	10	80
	Plancha zinc alum	20	50	30	80
Rev. Interior	Yeso Cartón	50	30	20	50
	Fibro cemento	30	50	20	70
	Placa madera	10	60	30	90
Rev. Exterior	Mad. Machihembrada	10	60	30	90
	Siding Fibro cemento	30	50	20	70
	PVC	30	30	40	70
Ventanas	Aluminio	10	60	30	90
	PVC	30	40	30	70
	Madera	10	50	40	90
Puertas	Madera maciza	10	30	60	90
	Metálica	20	30	50	80
	Placarol	50	30	20	50
%Rango Corte		48.5			84.2
		Max.Baja circularidad		Min.Alta circularidad	

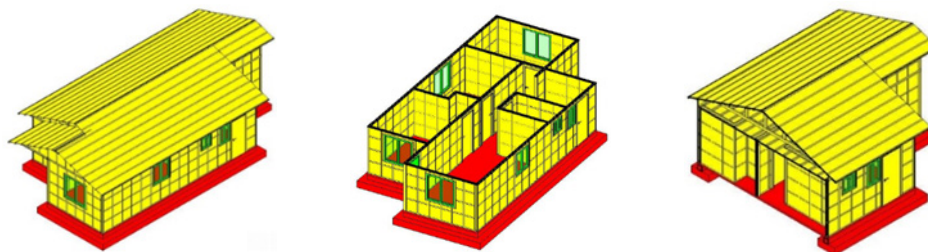
Tabla 7. Rangos corte indicador Tipo semáforo. Fuente: Elaboración de los autores.

Indicador de Circularidad	Color	Rangos de Valor %
Casi Todo	Verde	84% a 100%
Algunas Partes	Amarillo	50% a 83%
Casi Nada	Rojo	0% a 49%

Tabla 8. Cálculo porcentaje volumen y peso de RCD. Fuente: Elaboración de los autores.

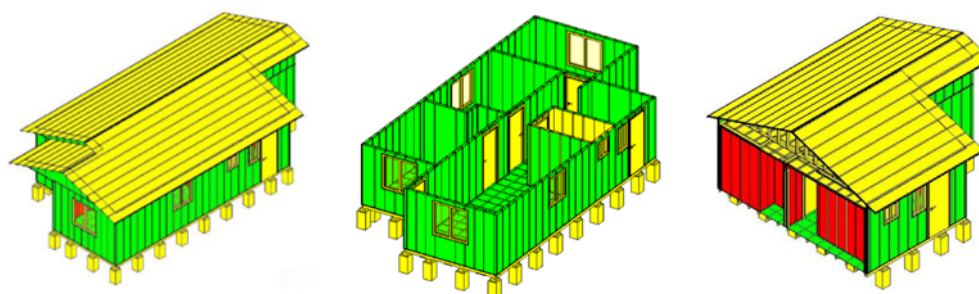
Meta Hoja de Ruta (CORFO, 2020b). Chile.				Normativa Unión Europea	
Modelo	Volumen Total RCD por vivienda (v)*(c)	30%volumen RCD al 2025 (v)*0.3	70%volumen RCD al 2035 (v)*0.7	Peso Total RCD (p)	70% del peso RCD al 2020 (p)*0,7
Vivienda Base Estructura Madera	14.328	4.2984	10.0296	31257.28	21880.096
Propuesta 1 Estructura liviana	2.159	0.6477	1.513	7574.02	5301.814
Propuesta 2 Estructura Hormigón	20.518	6.1743	14.4067	48022.68	33615.876

Tabla 9. Vivienda base. Fuente: Elaboración de los autores.



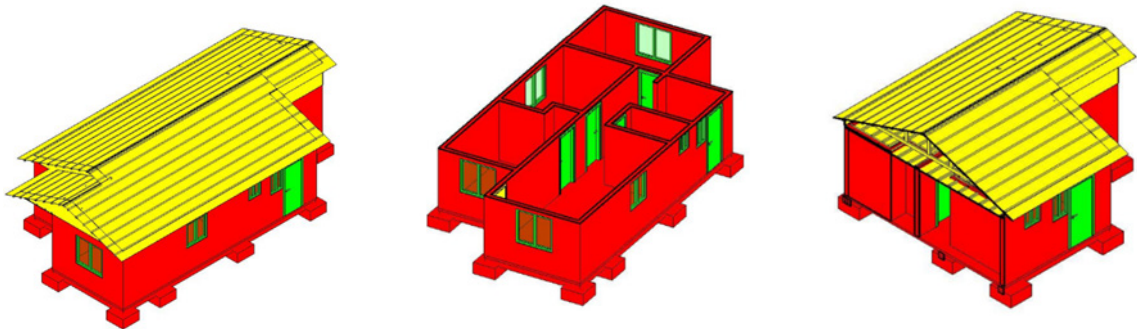
Modelo Vivienda base	Materiales	%Potencial circular Total (a)+(b)	Volumen Total (v)	Porcentaje de RCD (c)	% RCD por material (v)*(c)	D Peso Total materiales (v)*(pe)	Peso Total RCD D*(c)
Estructura	Madera	0.7	8.84	0.3	5,64	14319,71	11462,62
Fundación	Corrida hormigón	0.1	8,49	0.9	7,641	20367,36	18330,62
Cubierta	Zinc alum	0.8	0,3	0.2	0,06	2130,74	426,15
Rev. Exterior	Yeso Cartón	0.5	0,53	0.5	0,159	640,34	192,1
Rev. Interior	Siding Fibrocemento	0.7	1,55	0.3	0,755	1604,43	771,71
Ventanas	aluminio	0.9	0,18	0.1	0,018	20,35	2,04
Puertas	1 madera 5 placarol	0.5	0,19	0.5	0,055	176,39	72,04
Totales			20.08		14.328%	39259.32	31257.28

Tabla 10. Propuesta 1. Fuente: Elaboración de los autores.



Modelo Propuesta 1	Materiales	%Potencial circular Total (a)+(b)	Volumen Total (v)	t de RCD (c)	% RCD por material (v)*(c)	D Peso Total materiales (v)*(pe)	Peso Total RCD D*(c)
Estructura	Metalcom	0.8	3,81	0,2	0,717	22257,53	4430,73
Fundación	Poyos Hormigón	0.7	3,55	0,3	1,065	8511,6	2553,47
Cubierta	Teja Zinc alum	0.8	0,3	0,2	0,06	2130,74	426,15
Rev. Exterior	Madera machihembrada	0.9	0,54	0,1	0,054	352,57	35,26
Rev. Interior	Placa de madera	0.9	1,51	0,1	0,171	928,4	123,34
Ventanas	PVC	0.7	0,18	0,3	0,054	16,28	4,88
Puertas	Metálicas	0.8	0,19	0,2	0,038	0,93	0,09
Totales			10,08		2,159%	34198,05	7573,92

Tabla 11. Propuesta 2. Fuente: Elaboración de los autores



Modelo Propuesta 2	Materiales	%Potencial circular Total (a)+(b)	Volumen Total (v)	Porcentaje de RCD ©	% RCD por material (v)*©	D Peso Total materiales (v)*(pe)	Peso Total RCD D*©
Estructura	Hormigón armado	0.3	20,89	0,9	17,553	46352,82	40904,97
Fundación	Dados de Hormigón	0.3	3,58	0,8	2,864	8601,6	6881,28
Cubierta	Tejuela asfáltica	0.8	0,3	0.2	0,06	600,21	120,04
Rev. Exterior			0,09	0.3	0,027	107,22	32,17
Ventanas	Madera	0.9	0,18	0.1	0,018	15,47	1,55
Puertas	Madera	0.9	0,19	0.5	0,059	193,08	82,67
Totales			25,23		20,581%	55870,4	48022,68

La visualización grafica Revit en conjunto con la base de datos (Tabla 9), evidencia que la estructura y las fundaciones por su volumen y peso, son las partidas que mayor RCD generan, siguiendo la partida cubierta con gran peso y la tercera partida en volumen el Rev. Interior. Definiéndose como las principales partidas que deben mejorar su selección y factores que permitan la recuperación de estos.

La propuesta 1, deja de eliminar un 84.93% de RCD con respecto del caso base. La elección de materiales en las fundaciones, se complementan para reducir el volumen de materiales pesados e incluir sistemas desmontables, aumentando el potencial de recuperación de los materiales (Tabla 10).

Respecto al volumen de RCD del base, el volumen de la propuesta 2 es 30% mayor. Corroborado el bajo nivel de circularidad en la gráfica, donde estructura y fundación se visualizan en rojo (Tabla 11).

Al comparar el modelo base, con el más favorable, y otro menos favorable, encontramos que la metodología detecta con una visualización grafica en los modelos y una cuantificación sintética en porcentaje de RCD, claras tendencias entre los distintos sistemas constructivos analizados.

Los acercamientos a la norma nacional e internacional nos permiten evidenciar la brecha hacia la transición circular del sector de la construcción.

REFLEXIONES DE LOS USUARIOS

Como Modelador BIM en planificación y coordinación de proyectos, la plantilla de reciclabilidad es una herramienta valiosa agregando valor al diseño en la construcción. Implementar esta herramienta en el software Revit mejoraría el aprovechamiento de recursos sostenibles la planificación de obras.

DISCUSIÓN

Esta investigación busca superar la falta desconocimiento y/o integración tecnológica ofreciendo un enfoque basado en la experiencia para evaluar la capacidad de recuperación de los recursos de manera accesible en proyectos de construcción.

La incorporación de EC mediante la cualificación de atributos sostenibles de los materiales es efectiva para las constructoras. Se integran múltiples datos en un indicador que evalúa las EC de manera completa. La experiencia de las constructoras proporciona información holística. Integrándose en la base de datos del software Revit a través de Tutorial, que permite visualización gráfica.

La metodología utilizada respalda la medición Circular mediante indicadores significativos (Potting et al., 2017).

Este enfoque simplifica la transición hacia una mayor circularidad (Calzolari & Genovese, 2022). El objetivo es proporcionar un indicador más simple pero riguroso y accesible para los actores del desarrollo de proyectos acercando las EC a los diseñadores en etapas iniciales de diseño.

La plataforma BIM proporciona resultados gráficos, facilitando la comparación de soluciones y la toma de decisiones informadas, en combinación de BIM con información entregada por los actores involucrados en el proceso abre nuevas posibilidades para promover la sostenibilidad en la construcción y facilitar la implementación de estrategias de EC en proyectos, asociando la baja adopción de herramientas de economía circular a su complejidad y falta de información (Dufrene et al., 2013).

CONCLUSIÓN

Se exploró la integración de EC en la etapa de diseño conceptual mediante BIM en el contexto de la construcción de viviendas. La investigación incluyó a los principales actores del proceso de construcción para evaluar el potencial de circularidad de diferentes elementos de construcción y su aplicación en un modelo de vivienda en BIM.

La asignación de valores numéricos a la encuesta determinó la fluctuación de rangos porcentuales, obteniendo alta media y baja circularidad, donde el rango medio, permite incorporar factores que mejoren la circularidad, mediante el uso de conexiones desmontables, pasadores, pernos, etc.

Al complementar esta información con los datos geométricos de Revit, observamos que la estructura y la fundación definen el mayor porcentaje de los RCD, al concentrar el mayor volumen y peso de la vivienda. La vivienda base, arroja un 9.35% de volumen del RCD, la vivienda de la propuesta 1 arroja un 2.15% volumen de RCD, mientras que la Propuesta 2, estructurada en hormigón, presenta un 15.63% de volumen de RCD. Al analizar los valores para el cumplimiento de meta del 2025 de la Hoja de ruta 2025.

Al analizar las alternativas por partida constructiva, se evidencia que, al involucrar el hormigón en las partidas, materiales de baja calidad como puertas de chapa o materiales frágiles como placas de yeso cartón, el porcentaje de baja circularidad se incrementa. Mientras que la incorporación de la madera en cualquier formato incrementa el porcentaje de valoración de la alta circularidad.

En los materiales livianos, se observa que el potencial circular alto se potencia fuertemente con el porcentaje

de potencial parcial del material generando una mayor oportunidad de mejorar la recuperación de estos materiales, al incorporar sistemas que favorezcan la recuperación de las partes del proyecto. En definitiva, (b) representa el potencial para maximizar la recuperación a través del diseño.

A pesar de las contribuciones del estudio, existen limitaciones, ya que se basó en apreciaciones cualitativas de los materiales a través de encuestas sin una especificación detallada de los factores considerados para evaluar la capacidad de recuperación de los elementos. Se sugiere que futuras investigaciones integren factores como ensambles y fijaciones en el modelado Revit para una evaluación más completa del potencial circular.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akanbi, L. A., Oyedele, L. O., Akinade, O.O., Ajayi, A. O., Dávila Delgado, M., Bilal, M., y Bello, S. A. (2018). Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 175-186. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.026>
- Calzolari, T., Genovese, A., y Brint, A. (2022) Circular Economy indicators for supply chains: A systematic literature review. *Environmental and Sustainability Indicators*, 13, 100160. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100160>
- Climent, A. (2021). Economía circular aplicada a la arquitectura espejismo o realidad. *Limaq*, 7(007), 29-71. <https://doi.org/10.26439/limaq2021.n007.5178>
- Corantioquia. (2022). Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible. *Negocios Verdes Crecim. Sosten.*, 33, pp. 820-830
- Dufrene, M., Zwolinski, P., y Brissaud, D. (2013). How the Integration of Environmental Concerns Modifies the Integrated Design Process. In: Abramovici, M., Stark, R. (eds) *Smart Product Engineering. Lecture Notes in Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 845-854. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30817-8_83
- Enshassi, A., Kochendoerfer B., y Rizq, E. (2014). An evaluation of environmental impacts of construction projects. *Revista Ingeniería de Construcción*, 29(3), 234-254. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732014000300002>
- Fernández, R., y Raposo, J. (2022). Economía circular y BIM. Optimización, sostenibilidad y construcción [Trabajo de Fin de Grado]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Fiel, M. (2022). Sustainable and Eco-Effective Architecture: Pushing BIM Limits with a Cradle-to-Cradle Approach. *Aus*, (32), 12-19. <https://doi.org/10.4206/aus.2022.n32-03>
- Ghisellini, P., Ji, X., Liu, G., y Ulgiati, S. (2018). Evaluating the transition towards cleaner production in the construction and demolition sector of China: A review. *Journal of Cleaner Production*, 195, 418-434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.084>

Jrade, A., y Jalaei, F. (2014). Integrating Building Information Modeling (BIM) and energy analysis tools with green building certification system to conceptually design sustainable buildings. *Journal of Information Technology in Construction*, 19, 494–519. <https://www.itcon.org/2014/29>

Mesa, J., Esparragoza, I., y Maury, H. (2018) Developing a set of sustainability indicators for product families based on the circular economy model. *Journal of Cleaner Production*, 196, 1429-1442. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.131>

Mercader Moyano, M., Camporeale, P. E., y Cózar-Cózar, E. (2019). Indicadores a Un Modelo Bim De Vivienda Social. *Hábitat Sustentable*, 9(2), 78–93. <https://doi.org/10.22320/07190700.2019.09.02.07>

Mora, D. (2021). Reciclaje y reutilización de materiales de construcción en Colombia como aporte a la economía circular [Tesis Ingeniería Civil]. Universidad de La Salle, Bogotá.

Niero, M., y Kalbar, P. P. (2019). Coupling material circularity indicators and life cycle based indicators: A proposal to advance the assessment of circular economy strategies at the product level. *Resources, Conservation and Recycling*, 140, 305-312. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.002>

Ossio, F. (2021). Políticas para la implementación de una estrategia circular en la construcción, cap. 6 en Propuestas para Chile. Concurso de Políticas Públicas, Centro de Políticas Públicas UC, Santiago.

Potting, J., Hekkert, M.P., Worrell, E., y Hanemaaijer, A. (2017). Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain. Technical Report

Prieto-Sandoval, V., Jaca-García, C., y Ormazabal-Goenaga, M. (2017). Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación. *Memoria de Investigaciones en Ingeniería*, 15, 85-95. <https://hdl.handle.net/10171/53653>

Salehabadi, Z. M., y Ruparathna, R. (2022). User-centric sustainability assessment of single family detached homes (SFDH): A BIM-based methodological framework. *Journal of Building Engineering*, 50, 104139. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104139>

Zhang, K., y Jia, J. (2021). Promotion of the Application of BIM in China—A BIM-Based Model for Construction Material Recycling. *Recycling*, 6(1), 16. <https://doi.org/10.3390/recycling6010016>

Aimón
Cámara Mirador
Nicolás Sáez,
2018



BARRIA 2023

Objeto singular columena