

ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE EN EDIFICACIONES: CASOS DE ESTUDIOS EN EL NORTE DE MÉXICO


**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA**



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

**María Guadalupe Alpuche Cruz
Ana Cecilia Borbón Almada
(coordinadoras)**

Energía y medio ambiente en edificaciones: casos de estudios en el Norte de México

MARÍA GUADALUPE ALPUCHE CRUZ
ANA CECILIA BORBÓN ALMADA
(coordinadoras)



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA**



**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA** PUBLICACIONES
ARBITRADAS
HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS

CC+I

COLECCIÓN
**CIENCIA e
INVESTIGACIÓN**

Cada libro de la Ciencia e Investigación es evaluado para su publicación mediante el sistema de dictaminación doble ciego por especialistas en la materia.

Lo invitamos a ver el proceso de dictaminación de este libro transparentado en



[DOI.ORG/ 10.52501/cc.072](https://doi.org/10.52501/cc.072)

www.comunicacion-cientifica.com

Ediciones Comunicación Científica se especializa en la publicación de conocimiento científico en español e inglés en soporte de libro impreso y digital en las áreas de humanidades, ciencias sociales y ciencias exactas. Guía su criterio de publicación cumpliendo con las prácticas internacionales: dictaminación de pares ciegos externos, comités y ética editorial, acceso abierto, medición del impacto de la publicación, difusión, distribución impresa y digital, transparencia editorial e indexación internacional.

Energía y medio ambiente en edificaciones: casos de estudios en el Norte de México

MARÍA GUADALUPE ALPUCHE CRUZ
ANA CECILIA BORBÓN ALMADA
(coordinadoras)



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA**

Energía y medio ambiente en edificaciones: casos de estudios en el Norte de México / María Guadalupe Alpuche Cruz, Ana Cecilia Borbón Almada (coordinadoras). — Hermosillo, Sonora : Universidad de Sonora ; Ciudad de México : Comunicación Científica, 2022.

172 páginas : ilustraciones. — (Colección Ciencia e Investigación)

ISBN (Universidad de Sonora) Impreso: 978-607-518-499-9 ; Digital: 978-607-518-500-2

ISBN (Comunicación Científica) Impreso: 978-607-59473-2-7 ; Digital: 978-607-59473-3-4

DOI 10.52501/cc.072

1. Edificios — Conservación de energía. 2. Arquitectura sustentable. 3. Norte de México. I. Alpuche Cruz, María Guadalupe, coordinador. II. Borbón Almada, Ana Cecilia, coordinador. III. Serie.

LC: NA2542.36

Dewey: 720.472

Fotografía: “Edificio Inmobiliaria Negoplaza SA de CV”, Carlos Galindo, 2022

Primera edición, 2022

D.R. © María Guadalupe Alpuche Cruz, Ana Cecilia Borbón Almada, 2022

Reservados todos los derechos conforme a la Ley

D.R. © 2022, Universidad de Sonora

Av. Rosales y Blvd. Luis Encinas Johnson s/n

Col. Centro, Hermosillo, Sonora,

México, C.P. 83000.

www.libros.unison.mx

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana Reg. No. 3661

D.R.© Ediciones Comunicación Científica S.A. de C.V., 2022

Av. Insurgentes Sur 1602, piso 4, suite 400, Benito Juárez,

Ciudad de México, C.P. 03940,

www.comunicacion-cientifica.com

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana Reg. No. 3976

ISBN (USON): Impreso: 978-607-518-499-9 ; Digital: 978-607-518-500-2

ISBN (ECC): Impreso: 978-607-59473-2-7 ; Digital: 978-607-59473-3-4

DOI: 10.52501/cc.072



Esta obra fue dictaminada mediante el sistema de pares ciegos externos. El proceso
transparentado puede consultarse, así como el libro en acceso abierto, en

<https://doi.org/10.52501/cc.072>

Índice

Introducción. <i>María Guadalupe Alpuche Cruz y Ana Cecilia Borbón Almada</i>	9
Capítulo 1. Análisis de iluminación natural a través de simulaciones en modelos a escala y modelos computacionales. <i>José Manuel Ochoa de la Torre, Cecilia María Galindo Borbón e Irene Marincic Lovriha</i>	13
Capítulo 2. Influencia de la densificación urbana en el consumo de energía en las edificaciones residenciales. <i>Fátima Anahí Córdova Borbón, María Guadalupe Alpuche Cruz, Glenda Bethina Yanes Ordiales</i>	37
Capítulo 3. Influencia en las demandas energéticas para vivienda residencial en clima cálido seco, en función de los materiales y sistemas constructivos. <i>Carlos Eduardo Quijada González, Ana Cecilia Borbón Almada, Gema Karina Ibarra Torúa, Jesús Quintana Pacheco, Armando Ayala Corona</i>	77
Capítulo 4. Incorporación de caucho en polvo en materiales aislantes como alternativa de la valorización de neumáticos de desecho. <i>María de los Ángeles Villarreal Andrade, Norma Alejandra Rodríguez Muñoz, José R. Irigoyen Campuzano, Liliana Reynoso Cuevas, Ana Cecilia Borbón Almada</i> ..	109

Capítulo 5. Determinantes sociodemográficos de urbanización y climáticos en el consumo doméstico de energía eléctrica en Hermosillo, Sonora. <i>Arturo Ojeda de la Cruz, Gerardo Ramírez Uribe, Aldo Apodaca Mendoza</i>	135
<i>Sobre las coordinadoras y autores</i>	165

Introducción

Los temas relacionados con la energía y asociados al comportamiento térmico de los edificios han tomado un auge en los últimos años, debido a la problemática global en cuanto a la optimización del recurso energético, el cual, a su vez, genera temáticas muy diversas en cuanto a la conservación de estos recursos, a su uso, optimización y, sobre todo, en el tema del ahorro.

En este libro se abordan distintas problemáticas que ofrecen un acercamiento al conocimiento de los temas edificación-energía, tratados con una perspectiva muy práctica y particular del análisis de las problemáticas y de las posibles propuestas de solución a cada uno de los planteamientos.

Los proyectos arquitectónicos abordados desde la aplicación de la tecnología han marcado una diferencia en las últimas décadas al tener herramientas más tecnológicas para su análisis, que suelen ser más exactas y optimizan tiempos de ejecución; como es el caso del que nos habla el capítulo desarrollado por Ochoa de la Torre, Galindo Borbón y Marincic Lovriha, referente a una metodología para el diseño lumínico de un edificio educativo y a los resultados de su evaluación utilizando un programa de cómputo complementada con mediciones de iluminación en un modelo a escala, montado sobre un heliodón, que simula el recorrido del sol en los días de diseño seleccionados, con el objetivo de demostrar cuál es el método más fiable para una óptima iluminación natural.

Otro abordaje también relacionado con la energía y los edificios es el tema de Córdova Borbón, Alpuche Cruz y Yanes Ordiales, donde se analiza

el impacto de la densificación urbana en el consumo energético de las edificaciones. En particular, se evalúa la intensidad de consumo de energía en el uso de refrigeración y calefacción de las viviendas, por medio de una selección de parámetros descriptivos de la densidad física y la morfología de la ciudad en un barrio de la ciudad de Hermosillo, Sonora, México, con potencial de densificación; y se compara con seis distintos escenarios hipotéticos densificados. Los resultados muestran que la estrategia de densificación y el cambio en la morfología urbana, a través de la vivienda vertical, reducen considerablemente la intensidad de uso de energía en aire acondicionado y calefacción en el clima cálido seco.

Sin duda, otro de los temas de relevancia es el desarrollado por Quijada González, Borbón Almada, Ibarra Torúa, Quintana Pacheco y Ayala Corona, el cual se refiere a la aplicación de normativas donde se consideren las características termo-físicas de los materiales y sistemas constructivos, así como el clima donde están emplazados, tema que tiene una gran influencia en el comportamiento térmico de los edificios y su relación con el ahorro de energía. Para ello, presentan resultados de la aplicación de la NOM-020-ENER-2001, tomando como caso de estudio una muestra de viviendas de tipo residencial ubicadas en un clima cálido-seco, como lo es el de Hermosillo, Sonora, México, las cuales son analizadas bajo estas normas y se determina el nivel de cumplimiento, lo cual permite inferir recomendaciones muy prácticas para desarrolladores de vivienda y usuarios en general.

Los materiales de construcción convencionales que existen en el mercado en México, para edificar vivienda formal urbana, sobre todo de tipo económico, no han demostrado ser adecuados cuando se trata de acondicionar térmicamente los edificios. Existen muchas necesidades en el tema de innovar y diversificar los materiales, así como de conocer las propiedades térmicas que los definen o no, como materiales con propiedades aislantes. A partir de esta premisa es interesante atender el contenido del capítulo presentado por Villarreal Andrade, Rodríguez Muñoz, Irigoyen Campuzano, Reynoso Cuevas, Borbón Almada, donde presentan una alternativa sustentable para darle uso a los neumáticos de desecho, para ser reutilizados como insumos para fabricar elementos de construcción. Dentro del estudio realizado, evalúan el comportamiento térmico de una propuesta de material para uso como aislante en los sistemas constructivos para las edificaciones.

Los resultados de conductividad térmica obtenidos varían entre 0.041 y 0.058 W/m·K. Estos hacen a la propuesta una opción viable y adecuada para mejora del medio ambiente, ya que se encuentran entre los principales contribuyentes al deterioro ambiental debido a su compleja disposición final.

No sólo las condicionantes físicas determinan factores o variables a considerar para el análisis de consumos energéticos en zonas urbanas. El capítulo elaborado por Ojeda de la Cruz, Ramírez Uribe y Apodaca Mendoza presenta resultados de una investigación donde se realizó un estudio estadístico de las determinantes sociodemográficas, urbanización y climáticas, para detectar su influencia en el consumo de energía eléctrica de las viviendas. Los casos de estudio fueron de la ciudad de Hermosillo, Sonora, México.

Sin duda las temáticas relacionadas con la energía y los edificios son muy diversas. Se han seleccionado estos temas con la intención de tocar aspectos abordados de diferentes perspectivas, pero que convergen en un mismo objetivo, que es el de ampliar el conocimiento y ofrecer soluciones prácticas a las problemáticas que continúan pendientes de resolver y que cada vez son más apremiantes, en función del correcto uso de la energía para beneficio del medio ambiente y combate al cambio climático.

MARÍA GUADALUPE ALPUCHE CRUZ

ANA CECILIA BORBÓN ALMADA

Capítulo 1. Análisis de iluminación natural a través de simulaciones en modelos a escala y modelos computacionales

JOSÉ MANUEL OCHOA DE LA TORRE*

CECILIA MARÍA GALINDO BORBÓN**

IRENE MARINCIC LOVRIHA***

Resumen

El proceso de proyectación se ha vuelto cada vez más exigente, al disponer los diseñadores de herramientas de simulación que permiten hacer proyectos más complejos y al mismo tiempo más cercanos a la realidad; esto abarca ámbitos como el diseño estructural, instalaciones, acondicionamiento ambiental e iluminación artificial, sin embargo, la iluminación natural y el control de la radiación solar son aspectos a los que, en la mayoría de los casos, no se les da suficiente importancia o bien se abordan de forma empírica. En este capítulo se describe el proceso del diseño lumínico de un edificio educativo, así como los resultados del análisis de la distribución de la iluminación natural. Con el objetivo de demostrar cuál es el método más fiable, el análisis se realizó mediante el software de simulación Design Builder, así como a través de mediciones de la iluminación en un modelo a escala instalado en un heliodón de precisión donde se simuló el recorrido del sol para los días de diseño seleccionados. Asimismo, se destaca el papel de las tecnologías de reproducción digital 4.0 en la fabricación de modelos a escala que son cada vez más precisos. Se puede afirmar que ambos méto-

* Doctor en Arquitectura. Departamento de Arquitectura y Diseño, Universidad de Sonora, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6035-1249>

** Maestra en Ciencias Ambientales. Departamento de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Sonora, México. ORCID: 0000-0002-9637-7173

*** Doctora en Ingeniería. Departamento de Arquitectura y Diseño, Universidad de Sonora, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8609-2748>

dos son pertinentes para la evaluación de la iluminación en el interior de espacios educativos; la selección de alguno de los dos dependerá de los medios con los que disponga el proyectista durante el proceso de diseño. Sin embargo, siempre será conveniente hacer una verificación en el sitio una vez que el edificio esté en funcionamiento.

Palabras clave: *Factor de iluminación natural, heliodón, iluminación natural, maqueta, simulación modelo a escala, modelo computacional, impresión 3D.*

Abstract

The design process has become increasingly demanding, as designers have simulation tools that allow them to create more complex projects that are simultaneously closer to reality. This includes areas such as structural design, installations, HVAC, and artificial lighting; however, daylighting and solar radiation control are aspects that, in most cases, are considered less important or are approached empirically. This chapter describes the lighting design process of an educational building, as well as the results of the daylighting distribution analysis. To demonstrate which method is the most reliable, the analysis was carried out using the Design Builder simulation software, as well as lighting measurements on a scale model installed on a precision heliodes where the sun's path was simulated for the selected design days. The role of digital modeling technologies 4.0 in creating increasingly accurate scale models is also highlighted. It can be affirmed that both methods are relevant for the evaluation of lighting inside educational spaces. The selection of either of the two systems will depend on the resources available to the designer during the design process. However, it will always be a good idea to make an on-site verification once the building is in operation.

Keywords: Daylight factor, heliodes, daylighting, scale model, scale model simulation, computational model, 3D printing.

Introducción

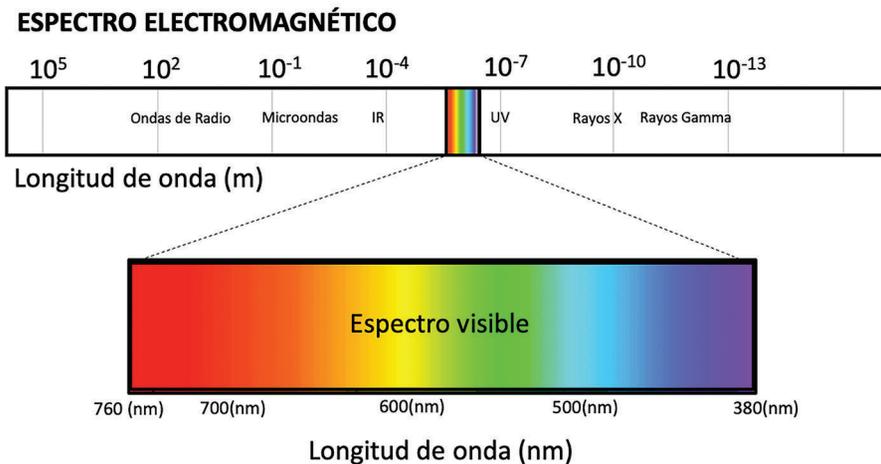
El ojo humano está adaptado para percibir como luz visible la porción del espectro electromagnético que se ubica en una franja muy estrecha entre 380 y 760 nanómetros de longitud de onda (ver figura 1). Una parte de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra se encuentra en esta franja visible del espectro.

Esto no es casual, el sistema visual de los animales que pueblan la tierra se adaptó, lógicamente, a la radiación presente en mayor cantidad en su entorno, y que sus órganos de visión tengan la máxima sensibilidad donde hay más radiación vista es uno de los sentidos que permite al ser humano percibir su entorno con mayor precisión (Serra, 1999), y en conjunto con la luz solar le es posible realizar eficientemente todas sus actividades.

Si bien existen fuentes de luz artificial, que nos han permitido prolongar el tiempo de nuestras actividades con niveles aceptables de iluminación después del ocaso y durante la noche, la luz natural es la mejor para realizar la mayoría de las actividades durante el día.

En el interior de las edificaciones, es frecuente que se sobrevalore la iluminación artificial, relegando la natural a un segundo plano, iluminando

Figura 1. *Espectro Electromagnético*



Fuente: Elaboración propia a partir de (Centro Mario Molina, 2016).

incluso durante el día con luz artificial. Esto ocasiona un mayor consumo de energía y posibles problemas de bienestar a los usuarios; asimismo, el exceso de luz solar directa mal manejada al interior de los edificios también puede causar problemas de confort y mayor consumo de energía por acondicionamiento ambiental, además de posible deslumbramiento. En parte, este problema se debe a que los reglamentos de construcción; al menos en México,¹ no especifican con suficiente detalle las exigencias de iluminación natural: las normas oficiales y otras reglamentaciones, se limitan a prescribir niveles adecuados de iluminación según diferentes actividades, sin ponderar el uso de la luz natural (Instituto Nacional de Infraestructura Física Educativa, 2011; Secretaría de Energía, 2014; Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2008).

Los efectos positivos más evidentes de la iluminación natural bien controlada sobre la habitabilidad de los edificios son el bienestar ambiental (visual y térmico), así como el uso eficiente de la energía para iluminación y acondicionamiento ambiental.

También son conocidos los efectos de la luz natural sobre la salud de los seres humanos: uno de ellos es su capacidad para aumentar el suministro de vitamina D del cuerpo, sin embargo, tiene muchos otros efectos como estimular la producción de endorfinas o mejorar el sistema inmune (Erem y Razzaque, 2021). Otros efectos beneficiosos de los espacios bien iluminados naturalmente son mejoras en el desempeño académico y laboral, la realización de tareas cognitivas y el mejor estado de ánimo de los ocupantes, entre muchos otros beneficios (Erem y Razzaque, 2021).

El diseño sustentable desde el punto de vista ambiental considera el aprovechamiento de la iluminación natural como una de las principales estrategias de eficiencia en las edificaciones (Chen, Zhang y Du, 2020; Papatsimpa y Linnartz, 2020). Es esencial la consideración de este aspecto en el proceso del diseño arquitectónico. Por lo tanto, las técnicas y herramientas que posee el diseñador, para predecir los efectos de la iluminación natural en el espacio proyectado, es un tema que requiere particular atención.

En este capítulo se describe el proceso del diseño lumínico de un edificio educativo, incluyendo la metodología y los resultados del análisis de la

¹ Reglamento de construcciones para el Distrito Federal. Última reforma publicada en la *Gaceta Oficial* de la Ciudad de México el 19 de abril de 2021.

distribución de la iluminación natural mediante un software de simulación (Desing Builder, 2022), así como mediante un modelo a escala, evaluado en un heliodón Orange Pro V (Nitter-betanit.com, 2016a).

Este análisis se hace en una etapa intermedia del proceso de diseño arquitectónico, donde ya están definidos los criterios generales del proyecto, las dimensiones de las ventanas y las protecciones solares, las cuales se calcularon con base en aspectos funcionales y medidas comerciales, evitando el sobredimensionamiento.

El objetivo es mostrar el proceso de diseño lumínico integrado a un análisis que, además de cumplir con la normatividad vigente, considera las necesidades de iluminación de acuerdo con las actividades que se realizarán en los espacios, tomando en cuenta el confort lumínico, su relación con el confort térmico (ventilación natural y soleamiento) y con eficiencia energética.

Evaluación de la iluminación natural en el proceso de diseño arquitectónico

Para los arquitectos, la importancia de las técnicas y herramientas de simulación, en este caso de la iluminación natural, radica en generar información confiable para la correcta toma de decisiones durante el proceso de diseño. Estas técnicas y herramientas deben proveer la flexibilidad suficiente para la evaluación de una diversidad de posibles soluciones, tomando en cuenta la mayor cantidad de variables y reduciendo la incertidumbre del resultado final.

Existen diversidad de herramientas para el análisis del desempeño de la iluminación en la edificación, por ejemplo, modelos matemáticos y software de simulación. Estos últimos se han desarrollado particularmente rápido debido, entre otros factores, a que los avances tecnológicos computacionales son cada vez más accesibles económicamente, con interfaces más amigables y con resultados que pueden ser bastante exactos, haciendo que la popularidad de estos haya aumentado enormemente (Ayoub, 2019; Bodart y Cauwerts, 2017; Ochoa, Aries y Hensen, 2010; Wong, 2017). En el ámbito del diseño, el arquitecto se ha encontrado con el hecho de que no siempre

es sencilla la integración del uso de simuladores, sobre todo en etapas tempranas del proceso de diseño, y aunque sus resultados parecieran ser más precisos, estos pueden estar sujetos a errores debido a los todavía insuficientes datos de entrada (Ayoub, 2019; Wong, 2017). Para su correcto uso, es necesario definir una serie de detalles, tales como como materiales y características ópticas de las superficies interiores, dimensiones de ventanas y contar con bases de datos climáticos confiables, entre otros, para obtener resultados cercanos a la realidad. Además, los resultados pueden ser complejos en su interpretación para alguien que no es especialista en el tema, lo cual resulta un inconveniente para el flujo de trabajo del diseñador (Bodart y Cauwerts, 2017; Ochoa *et al.*, 2010; Wong, 2017). La preferencia de muchos arquitectos es entonces, utilizar su intuición y experiencia para la estimación de la iluminación natural, argumentando que no poseen los conocimientos, que el cliente no paga por ello, que las herramientas son muy costosas o que estas no se ajustan a sus necesidades (Wong, 2017). Para aquellos diseñadores que sí evalúan la iluminación natural a través de la simulación, los resultados más comúnmente utilizados son el factor de iluminación natural (*daylight factor*) (F.I.N.) y la iluminancia interior (*interior illuminance*). Esto responde a que generalmente son los requeridos por los reglamentos y normas de construcción y que pueden ser calculados por la mayoría de los simuladores (Wong, 2017). Además, dichos resultados son muchas veces utilizados para desarrollar análisis cualitativos o comparaciones entre posibles soluciones. Asimismo, los resultados pueden presentarse a los clientes con el objetivo de convencerlos de ciertas soluciones o inversiones antes de finalizar el proyecto ejecutivo (Wong, 2017). Sin embargo, los programas informáticos o *software de simulación lumínica* también pueden generar información muy detallada, considerándose como una herramienta para desarrollar análisis cuantitativos más específicos como la evaluación de nuevas estrategias para mejorar la eficiencia o el desarrollo de dispositivos especializados, entre otros.

Por otro lado, una opción más tradicional es el uso de modelos a escala para el análisis de iluminación natural. Esta es una técnica que se ha utilizado durante siglos en la práctica del diseño arquitectónico con diversos propósitos (Bodart y Cauwerts, 2017; Wong, 2017), y aunque en las últimas décadas el uso de esta herramienta ha disminuido drásticamente, debido a

los simuladores computacionales (Ayoub, 2019; Bodart y Cauwerts, 2017; Ochoa *et al.*, 2010; Wong, 2017), la apreciación intuitiva o según la experiencia del diseñador sobre el modelo a escala provee información cualitativa con relación a la percepción del espacio, misma que la computadora no puede generar (Bodart y Cauwerts, 2017; Wong, 2017); aunque se ha documentado que el uso de modelos a escala puede generar imprecisiones en los resultados, pudiendo ser consecuencia de omisiones geométricas en el modelo, incorrecta selección de materiales, posición de sensores o cuando la evaluación se hace con un modelo expuesto directamente a la luz solar (Bodart y Cauwerts, 2017; Wong, 2017). Para disminuir esta situación, es recomendable realizar modelos lo más precisos posible (Boccia y Zazzini, 2015; Bodart y Cauwerts, 2017; Wong, 2017).

Para la evaluación de la iluminación de los modelos a escala se puede utilizar el cielo real, aunque esta evaluación es limitada porque la afecta el estado del tiempo en un determinado momento, así como la variabilidad de la disponibilidad de iluminación del cielo a lo largo del año. Sin embargo, esta es la opción más económica y frecuentemente usada. Los cielos artificiales pueden simular diferentes condiciones del cielo, aunque la condición más complicada de simular desde el punto de vista técnico es el cielo despejado (*clear sky*), que es la condición que se presenta la mayor parte del año en nuestro caso de estudio. Los cielos artificiales para este tipo de condición se representan mediante la distribución no homogénea de la iluminación en el cielo, con la mayor iluminación en la posición del sol (que por supuesto varía a lo largo del día y la fecha), la cual va atenuándose hacia el horizonte (Baker y Steemers, 2014). Otra opción es la utilización de un heliodón, que es un aparato de precisión que nos permite simular físicamente la proyección de los rayos solares sobre un modelo, teniendo como fuente de luz una lámpara de halógeno de alta intensidad lumínica. La precisión de las mediciones dependerá de la relación entre el tamaño del modelo y la distancia entre éste y la fuente de iluminación, de tal manera que los rayos de luz incidentes sean lo más paralelos posible al eje de la proyección. El uso del heliodón permite desarrollar el análisis de las propuestas en cualquier día y hora del año y donde quiera que se sitúe el proyecto. Esta técnica es particularmente útil para proyectos en un contexto de cielo despejado (García Quintero y Morales Guzmán, 2021).

Materiales y métodos

En este apartado describiremos el análisis del diseño lumínico y solar de un edificio educativo universitario, ubicado en el Estado de Morelos en México, específicamente, de un aula tipo, representativa de la mayoría los laboratorios y aulas. Las coordenadas del sitio son 18.85° N y -99.22° O. Los objetivos de diseño que se plantearon fueron controlar el ingreso de radiación solar directa y, al mismo tiempo, permitir el ingreso y la distribución adecuada de la luz natural para iluminación, de acuerdo con las actividades que se realizarán en los espacios mencionados.

Como condiciones de partida tenemos:

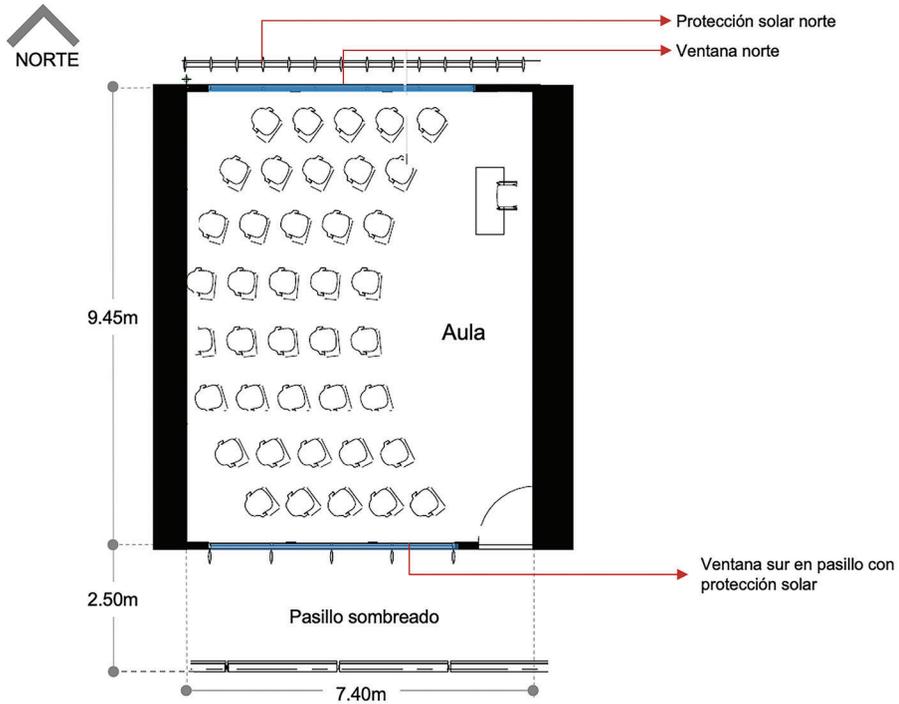
- a) La dimensión de las aulas en módulos de 7.40 por 9.45 metros con orientación Norte-Sur en su eje más largo, así como un pasillo de 2.5 metros de anchura en la fachada sur, protegido por un alero de las mismas dimensiones.
- b) La dimensión, modulación y ubicación de las ventanas en las fachadas norte y sur están predefinidas por los cálculos de ventilación natural.
- c) Los colores y reflectancias de los muros de ladrillo extruido, esmaltado en blanco y plafones y suelos de concreto son aparentes, definidos por el proyecto arquitectónico.

Como primer paso se calcularon y diseñaron las protecciones solares para las ventanas de ambas fachadas, considerando que no deberá entrar en ningún momento la radiación solar directa, resultando en parteluces verticales para ambas fachadas, cubriendo la altura total de los vanos. Para la fachada sur, miden 30 centímetros de profundidad, espaciados cada 1.1 metros, de acuerdo con la modulación preestablecida de la ventana. Para la fachada norte resultaron parteluces también de 30 centímetros de profundidad, pero espaciados cada 55 cm.

Una vez diseñadas las protecciones solares, se realizó la simulación por computadora de la distribución de la iluminación interior, para obtener así el factor de iluminación natural en los días de diseño seleccionados, que aparecen en la tabla 4.

Cuando los resultados de la simulación fueron satisfactorios, se construyó un modelo físico o maqueta a gran escala (1:20), con características

Figura 2. Planta del aula tipo en edificio educación superior



físicas muy similares a las utilizadas en la simulación lumínica. Este modelo se evaluó en un heliodón programable modelo Orange Pro (Nitter-betanit.com, 2016a), donde se simularon nuevamente los días de diseño y se obtuvieron mediciones de la distribución del factor de iluminación natural dentro de la maqueta, para corroborar y, en su caso, ajustar el diseño. Con este procedimiento fue posible obtener un diseño lumínico y solar más confiable, cuyos parámetros sirvieron de base para las especificaciones del proyecto ejecutivo.

Una vez que el edificio esté construido, se realizará la evaluación mediante la medición y análisis de las variables lumínicas con sensores incorporados a la estructura del edificio, así como con datos de la interacción constante con los usuarios, lo que permitirá comparar los resultados con las simulaciones y mediciones en el modelo a escala, obteniendo retroalimentación para futuros proyectos, así como una posible incidencia en la

normatividad correspondiente. En la figura 2 se presenta el aula tipo correspondiente al edificio educativo analizado.

Criterios para el análisis

Factor de iluminación natural y Factor de reflectividad

Para el análisis de la distribución de iluminación natural dentro del aula tipo, tanto en el modelo a escala como en la simulación, se utiliza el *factor de iluminación natural*, definido como la proporción de iluminación que incide en un punto al interior con relación a la que incide en el exterior en el mismo momento, expresada en porcentaje (ecuación 1).

$$\text{Factor de iluminación natural} = \frac{\text{iluminancia interior}}{\text{iluminancia exterior}} * 100 (\%) \quad (1)$$

Para la definición de los valores de referencia, se tomó en cuenta el criterio del factor de iluminación establecido en las *Normas y Especificaciones para Estudios, Proyectos, Construcción e Instalaciones* del Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (Instituto Nacional de Infraestructura Física Educativa, 2011). Este es un organismo mexicano que tiene facultades normativas y de certificación para garantizar la calidad de la infraestructura física educativa del país. El criterio del INIFED especifica los valores mínimos requeridos por tipo de actividad en espacios educativos, en nuestro caso, el factor mínimo requerido para las aulas será de 2% (ver tabla 1).

Tabla 1. Factores de iluminación natural mínimos por tipo de actividad según especificaciones del INIFED (Instituto Nacional de Infraestructura Física Educativa, 2011)

Tipo de Actividad	Cociente
Actividades escolares normales	2%
Clases de primaria y secundaria	4%
Laboratorios y talleres de máquinas	6%
Talleres de dibujo y costura	10%

En el análisis también se consideran los valores de porcentaje de luz reflejada sobre las superficies, para procurar una difusión uniforme y así evitar contrastes bruscos y deslumbramientos. El factor de reflexión (K_f), entonces, se refiere a la fracción de radiación reflejada por una superficie (E_2) con relación a la incidente (E_1), expresada en porcentaje (ecuación 2).

$$K_f = \frac{E_1}{E_2} * 100 (\%) \quad (2)$$

La tabla 2 presenta valores de referencia máximos sugeridos para el factor de reflexión (K_f) para complementar todas las superficies y proponer un rango aceptable, considerando que si se supera el valor se generará deslumbramiento. Se utilizaron como referencia los valores de la NOM-025-STPS-1999 (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 1999), dado que en la normativa del INIFED (Instituto Nacional de Infraestructura Física Educativa, 2011) y la NOM-025-STPS-2008 vigente (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2008) no consideran los valores máximos permisibles para el piso.

Tabla 2. Factor de reflexión de luz reflejada Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-1999.

Elemento	NOM-025-STPS-1999
Techo	90%
Muros	60%
Piso	50%

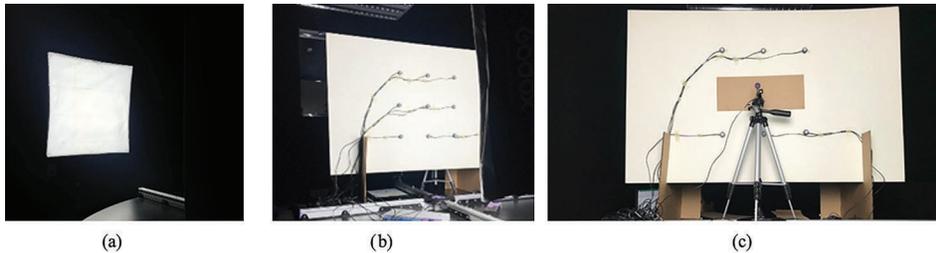
Con el objetivo de utilizar las mismas condiciones tanto en la medición del modelo a escala como en los datos de entrada para el simulador, respetando los valores establecidos en la tabla 2, se determinó de forma experimental el factor de reflexión de los materiales usados en la maqueta equivalente a los propuestos en el proyecto, a través de un procedimiento experimental basado en la metodología propuesta en la Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008 (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2008) con algunas modificaciones, utilizando una retícula de luxómetros²

² La retícula de luxómetros está formada por sensores (Nitter-betanit.com, 2015) de 20 mm de diámetro clase C CIE69 que son parte del sistema de medición del Heliódón Organge Pro V (Nitter-betanit.com, 2016a), mismos que se utilizarán en la medición de las iluminancias interiores.

y una fuente fija y uniforme de iluminación,³ como se describe a continuación (ver figura 3):

- a) Para medir la luz incidente (E_2), se colocó la fuente de iluminación dirigida perpendicularmente hacia la retícula de luxómetros, haciendo varias series de mediciones hasta que las lecturas permanecieron constantes y uniformes entre sí.
- b) Se efectúa una segunda serie de mediciones (E_1), esta vez con un luxómetro colocado de cara a la superficie del material a evaluar, a una distancia de 10 cm, hasta que la lectura permaneció constante. Algunos sensores de referencia utilizados en el paso “a” permanecieron en el sitio para asegurar que la luz incidente sea igual de uniforme y con la misma intensidad.
- c) Con las mediciones de luz incidente sobre los luxómetros (E_2) y la luz reflejada por el material evaluado (E_1), se define el factor de reflexión (K_f) expresado en la ecuación (2). En la figura 3 se muestran imágenes del montaje experimental.

Figura 3. Montaje experimental para la medición del factor de reflexión en materiales (a) fuente de iluminación difusa, (b) retícula de medición de la iluminación incidente y (c) medición de la iluminación reflejada por una muestra de material para el modelo.



Los resultados se ordenaron por tipo de material y factor de reflexión de las superficies, conformando un catálogo que se utilizará en la selección de materiales para la construcción de modelos a escala en proyectos futuros.

Los materiales seleccionados para este análisis, según su porcentaje de reflexión, se definen en la siguiente tabla 3.

³ Como fuente de iluminación se utilizaron dos lámparas fluorescentes de 65 W, con temperatura del color de 5500°K, cada una montada dentro una pantalla difusora, generalmente utilizadas para iluminación difusa en fotografía.

Tabla 3. *Porcentajes de luz reflejada por materiales medidos*

Elemento	Material para modelo a escala	Porcentaje medido de reflectividad
Techo	Batería natural	78%
Muros	Triplay	62%
Piso	Batería pintado gris	46%
Protecciones solares de aluminio	Filamento blanco	81%

Días de diseño

Para ejecutar la evaluación, tanto al modelo a escala como al simulador, las fechas que fueron seleccionadas son las menos favorables, es decir, para los días del año en que es más difícil controlar el ingreso solar directo. De esta forma, se simularon dos fechas estimadas: un extremo en invierno, que corresponde al último día estimado antes de vacaciones, 7 de diciembre; otro extremo en verano, correspondiente al último día estimado antes de vacaciones, 30 de junio (ver la tabla 4). Como horas de análisis, se seleccionaron a las 8, 13 y 17 horas, correspondientes al inicio y fin de las actividades educativas en horario diurno, además de una hora intermedia.

Tabla 4. *Fechas analizadas por cada modelo*

Fechas y horas de análisis		
07 de diciembre	Último día de clases antes de vacaciones de invierno	8, 13 y 17 horas
30 de junio	Último día de clases antes de vacaciones de verano	

Mediciones en modelo a escala

Para la construcción del modelo a escala se utilizan las dimensiones finales del anteproyecto arquitectónico del aula tipo. La escala del modelo se establece en 1:20, con el objetivo de obtener vistas detalladas del interior y de hacer registro de la distribución de la iluminación y su penetración, así como el espacio suficiente para la instrumentación (Boccia y Zazzini, 2015; Bodart y Cauwerts, 2017; Wong, 2017), considerando que se ajuste a las

dimensiones del heliodón. Para mayor precisión, se cortan los muros y ventanas del modelo en una cortadora láser para luego proceder al armado. Además, para la construcción de las protecciones solares, los archivos con sus características se exportan del modelo BIM en 3D y se envían al software de la impresora MakerBot Replicator+ (MakerBot Industries, 2018), ya impresos los elementos, se integran al modelo (ver figura 4).

Para la evaluación de la iluminación, el modelo a escala es instrumentado con luxómetros (Nitter-betanit.com, 2015) de 20 mm de diámetro clase C CIE69; 6 en el interior y 3 en el exterior, montados en el heliodón computarizado de alta precisión que cuenta con una plataforma móvil y una fuente de iluminación fija. El heliodón utilizado es el Heliodon Orange Pro V (Nitter-betanit.com, 2016a) que cuenta con una plataforma robótica previamente calibrada, la cual es controlada por computadora mediante el Software HeoGui4 (Nitter-betanit.com, 2016b) (ver figura 5).

Figura 4. Proceso de fabricación del modelo a escala utilizado para el análisis en el heliodón

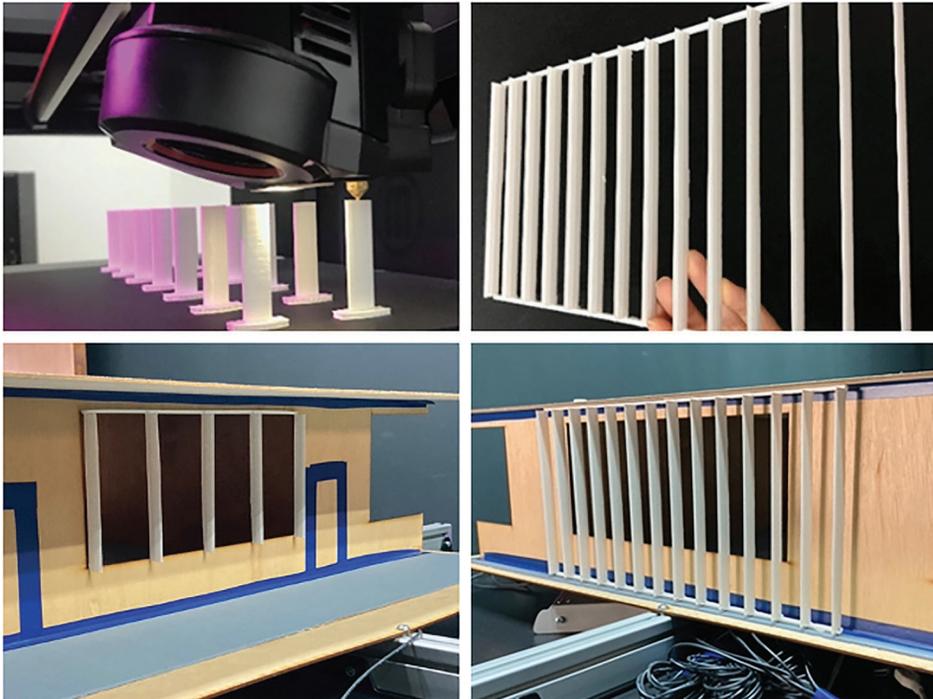


Figura 5. Heliodón automático de dos ejes (Nitter-betanit.com, 2016a).



En el suelo de la maqueta, se trazó una retícula para 36 mediciones, asimismo, se definió la altura del plano de trabajo en 0.75 m (a escala, dentro de la maqueta). Los luxómetros interiores se fijaron en una base que soporta los 6 sensores disponibles, los cuales se desplazan hasta tener las lecturas de los 36 espacios de la retícula. Una vez ubicados los luxómetros dentro del modelo, se conectan al adquisidor de datos del heliodón. Además, se colocan otros 3 luxómetros en diferentes puntos exteriores del modelo, como referencia de la iluminación natural exterior.

Con el modelo fijado sobre la plataforma del heliodón, se instala la cámara GoPro modelo HERO 6 (GoPro, 2017) para hacer registro fotográfico y de video de las proyecciones de sombras. El posicionamiento de la plataforma del heliodón se define de acuerdo con la latitud del proyecto, además de la fecha y hora específicas de los días de diseño, de tal manera que la fuente de iluminación incida sobre el modelo, proyectando las sombras correspondientes.

Los valores obtenidos por los luxómetros son ordenados en una retícula, de esta forma es posible identificar cada valor en un cuadrante específico. Los cuadrantes se componen de ejes orientados norte-sur representados con números y ejes orientados este-oeste representados con letras, de esta forma se representa el espacio en planta con los valores correspondientes. Con los luxómetros colocados en el exterior del modelo, se obtuvieron las mediciones por fecha y hora correspondientes (ver figura 6 para el acom-

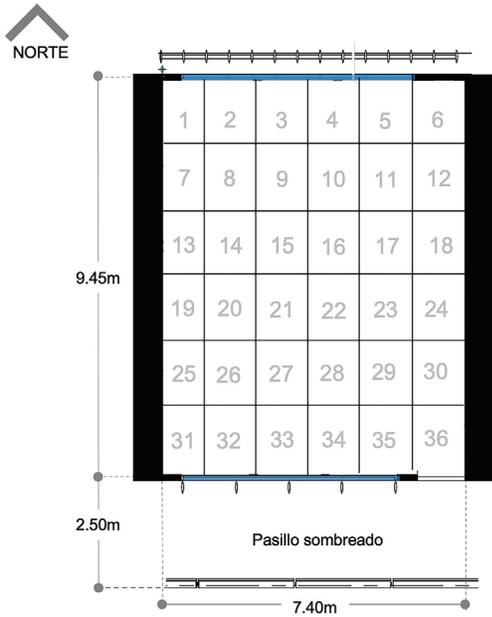


Figura 6. Planta del aula tipo en el modelo a escala y ubicación de sensores, el número en cada celda identifica al sensor

do de sensores). Para la definición del factor de iluminación natural se consideró el valor máximo obtenido de las lecturas de los luxómetros exteriores.

Simulación

Para el desarrollo del análisis de iluminación por computadora se utilizó el Software Design Builder v7 (Desing Builder, 2022), el cual tiene un módulo para iluminación mediante el motor de cálculo Radiance⁴ que permite la evaluación de diversos parámetros del desempeño lumínico, como el factor de iluminación. El archivo con la información arquitectónica se trabajó previamente en Revit (Autodesk Inc., 2021) y se exportó a través del *plug in* DesignBuilder Add-In for Revit 2021 (DesignBuilder, 2020) convirtiéndolo al formato para el simulador. Una vez en el simulador, se cargó en el archivo de datos climáticos que incluye los valores de iluminancia exterior. A cada elemento del 3D, se le asignó el valor correspondiente de reflectan-

⁴ Es un Software libre desarrollado, principalmente, por el Departamento de Energía de los EE. UU., los derechos de autor pertenecen a la Universidad de California.

cia, según los establecidos en la tabla 3. Se simuló el aula con las dimensiones correspondientes, ya mencionadas, y para la obtención del factor de iluminación natural se dividió la planta en una retícula equivalente a la de las mediciones en el modelo a escala. En las opciones de cálculo se definió el modelo de cielo como cielo estándar, en particular, el modelo de día claro soleado (cielo despejado). Se hizo una corrida según las fechas y horas de análisis establecidos en la tabla 4, obteniendo un total de 6 evaluaciones del factor de iluminación.

Resultados

Como se mencionó en el apartado precedente, se midió y simuló la iluminación interior en el aula tipo estudiada un día muy próximo al periodo de invierno y un día de verano, en tres horarios diferentes a lo largo del día (ver tabla 4).

Los resultados se presentan a continuación sobre la planta del aula, de acuerdo con la retícula propuesta, con valores de factor de iluminación natural según una escala de colores. Asimismo, se puede apreciar los valores numéricos.

Resultados de las mediciones en el modelo a escala

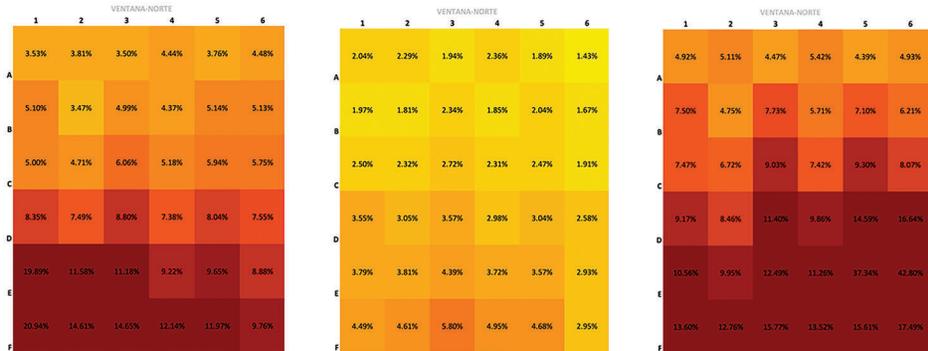
Se efectuaron mediciones de iluminancias al interior del modelo a escala, según una retícula a la altura del plano de trabajo, como ya se mencionó. Con los valores medidos y una referencia externa se calculó para cada celda el factor de iluminación natural. Para poder visualizar en planta el factor de iluminación natural de una manera más comprensible, se incorporaron a los valores numéricos sobre cada celda de la retícula y además se utilizaron diferentes colores, según rangos de factor de iluminación preestablecidos. Se graficaron entonces los resultados (ver figuras 8-11) de acuerdo con una escala de colores, de la siguiente manera:

Figura 7. Escala gráfica para rangos de factores de iluminación natural



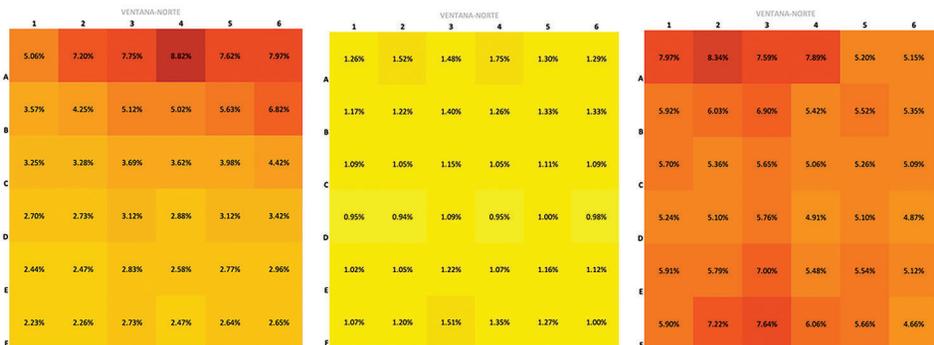
A continuación, se presenta la distribución del factor de iluminación natural obtenida con el heliodón para el 7 de diciembre (que consideraremos invierno) a las 8 hr, 13 hr y 17 hr.

Figura 8. Planta del aula tipo en el modelo a escala y distribución de factor de iluminación natural, un día de invierno a las 8, 13 y 17 hr



Se presentan resultados obtenidos con el heliodón correspondientes para el 30 de junio, día de verano, a las 8 hr, 13 hr y 17 hr.

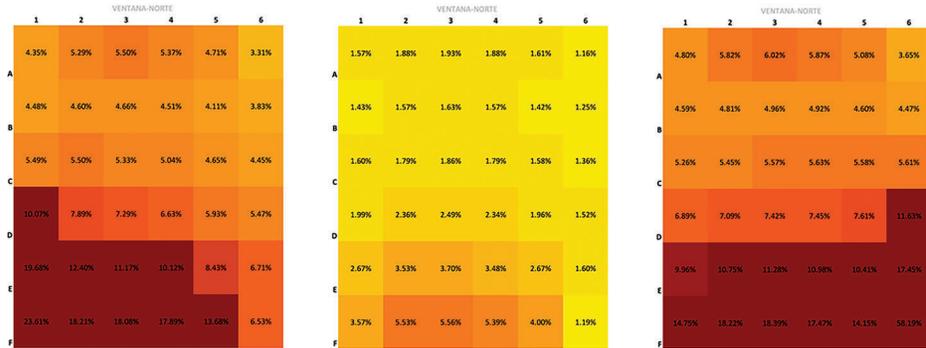
Figura 9. Planta del aula tipo en el modelo a escala y distribución de factor de iluminación natural, un día de verano a las 8, 13 y 17 hr



Resultados de las mediciones en el simulador

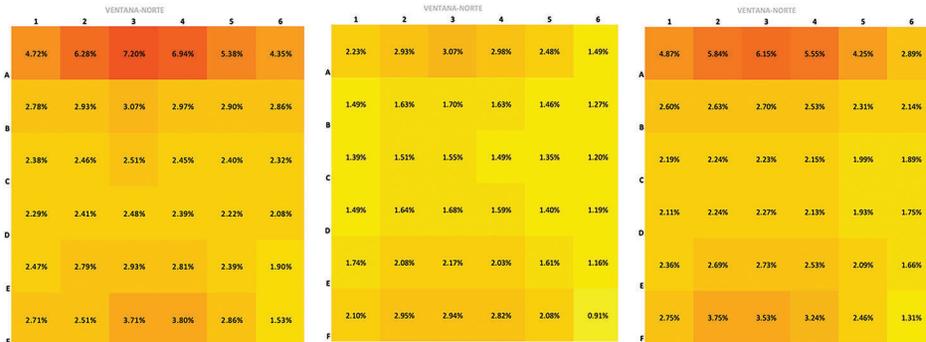
Se presentan a continuación la distribución del factor de iluminación natural, obtenida mediante simulación para el 7 de diciembre (que consideraremos invierno) a las 8 hr, 13 hr y 17 hr.

Figura 10. Planta del aula tipo en el modelo de simulación y distribución de factor de iluminación natural, un día de invierno a las 8,13 y 17 hr



Se presentan resultados obtenidos mediante simulación correspondientes para el 30 de junio, día de verano, a las 8 hr, 13 hr y 17 hr.

Figura 11. Planta del aula tipo en el modelo de simulación y distribución de factor de iluminación natural, un día de verano a las 8,13 y 17 hr



En el siguiente apartado se comentarán los resultados y las diferencias entre los resultados obtenidos con el heliodón y los de la simulación.

Discusión de resultados

Al ver los resultados de las dos estaciones del año en conjunto, resulta evidente, debido a la inclinación y orientación del recorrido solar, cómo la mayor fuente de iluminación proviene ya sea de la fachada norte o de la sur. Cabe recalcar, como ya se mencionó, que ambas fachadas cuentan con protecciones solares para evitar el ingreso del sol directo. En invierno el recorrido del sol es el más bajo del año y está inclinado todo el día hacia el Sur, por lo que la mayor fuente de iluminación proviene de esa fachada. En el verano, en cambio, el recorrido del sol es el más alto del año y está inclinado todo el día hacia el Norte. Por esto, la mayor fuente de iluminación proviene de la fachada norte. Sin embargo, como las alturas solares se encuentran próximas al cenit, a la fachada sur le llega también bastante iluminación.

Continuando con apreciaciones cualitativas, se puede observar que las distribuciones para una misma estación del año, obtenidas con ambos métodos son similares, aunque no idénticas. A simple vista (escala de colores) puede notarse que en la mayoría de los casos los resultados del heliodón registran más iluminación y en un área mayor que los de la simulación.

Si efectuamos un análisis en cuanto a qué porcentaje del área interior (sobre el plano de trabajo) cuenta con menos del mínimo de factor de iluminación natural, según INIFED (ver tabla 1), observamos lo siguiente:

En invierno, como el recorrido del sol es más bajo y hay más penetración de la luz en profundidad, sólo a las horas cercanas al mediodía un 22% (según heliodón) o un 64% (según simulación) cuentan con iluminación por debajo de la normatividad.

En verano, con el recorrido del sol más alto y con menos penetración de la luz, a las horas cercanas al mediodía, toda el área (100%) tiene un factor de iluminación por debajo de la normatividad (según heliodón) y un 64% (según simulación). Adicionalmente, según la simulación, a las 17 hr, un 17% del área tiene un factor de iluminación por debajo de la normatividad.

Esto último nos muestra que, a pesar de la mayor intensidad de iluminación exterior en verano, es en invierno, con mayor penetración de la iluminación, cuando se alcanzan mayores áreas con suficiente iluminación.

Finalmente, se analizan las diferencias en valor absoluto entre uno y otro método de evaluación, mediante la comparación para cada una de las situaciones de los promedios de factor de iluminación en ambos modelos de evaluación, lo que se resume en la tabla 5.

Tabla 5. *Factor de iluminación natural promedio según el modelo físico y según la simulación*

Época	Hora del día	F. I. N. del modelo físico (%)	F. I. N. de la simulación (%)	Diferencia Físico-simulación
Invierno	8	7.96	8.19	0.97
	13	2.95	2.35	1.25
	17	11.10	9.80	1.13
Verano	8	4.06	3.14	1.29
	13	1.19	1.85	0.64
	17	5.90	2.80	2.11

En los valores de la tabla 5 se puede apreciar cómo, en la mayoría de los casos, el promedio de factor de iluminación natural es mayor en el modelo físico.

Si bien las diferencias en promedio entre ambos modelos no son grandes, si pueden apreciarse. Como se comentó, se tuvo muy en cuenta la escala adecuada del modelo físico y de los sensores, la precisión de su geometría y uso de materiales con reflectancias similares al modelo proyectado. Sin embargo, una posible causa de estas diferencias puede ser, precisamente, los valores de coeficientes de reflexión asignados tanto al modelo físico como al modelo de simulación. Ésta es una suposición que no podemos corroborar y, probablemente la mejor manera de tener certeza al respecto es el monitoreo post-construcción del edificio estudiado, que al momento de elaborar este capítulo se encuentra en construcción.

Considerando la dificultades y posibles errores en la evaluación con ambos métodos, creemos que ambos, correctamente instrumentados, son útiles y suficientemente precisos para una etapa intermedia de diseño del proyecto.

Conclusiones

Se realizaron simulaciones en modelos digitales y físicos a escala del aula tipo del proyecto de un edificio educativo ubicado en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM en Temixco, Morelos, México, utilizando las herramientas de mayor precisión disponibles al momento de la evaluación.

Se verificó que los dispositivos de protección solar implementados fueron efectivos para impedir que la radiación solar directa penetrara en el aula, mejorando la distribución de la iluminación interior en los días críticos de diseño seleccionados, asegurando que el resto de los días del año el funcionamiento sea adecuado.

Se puede afirmar que ambos métodos son pertinentes para la evaluación de la iluminación en el interior de espacios educativos, la selección de alguno de los dos dependerá de los medios con los que disponga el proyectista durante el proceso de diseño, sin embargo, siempre será conveniente hacer una verificación una vez que el edificio esté en funcionamiento.

En el caso del modelo a escala, es muy importante conocer las propiedades ópticas de los materiales con los que se construya, ya que de eso dependerá la calidad de los resultados. En cuanto al modelo digital, es muy importante que la fuente de las propiedades ópticas de los materiales sea fiable, generalmente las fichas técnicas de los fabricantes son suficientes, sin embargo, los materiales no industrializados o fabricados en sitio no poseen estas especificaciones, por lo que sería recomendable hacer las mediciones en muestras correspondientes.

Cabe destacar que las tecnologías de reproducción digital utilizadas en la construcción del modelo a escala son la cortadora CNC Laser y la impresora 3D, que permiten realizar modelos muy precisos; otro punto importante es que la información para construir tanto el modelo digital para la simulación, como el modelo físico, proviene del modelo BIM del edificio lo que facilita enormemente el proceso y lo hace más exacto.

Aun cuando se haya cuidado el proceso de la simulación, tanto de un modelo digital como de uno físico a escala, siempre habrá algunas discrepancias con la realidad, debido a factores no controlables, como variaciones en las propiedades físicas, especificaciones o tipo de los materiales de cons-

trucción, inclusive cambios en el proyecto, esto no invalida el valor de las simulaciones como una herramienta útil de diseño arquitectónico.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de las estudiantes: María Fernanda Nieto Rueda, Brenda Eliza Miranda Mendivil, Rosa María Salazar Fuentes, así como de la Arq. Jacqueline Magaña Encinas, técnica del laboratorio. Asimismo, se agradece el apoyo del proyecto CONACYT-SENER FSE-2017-01-291600 y del Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sostenibles de Conacyt.

Bibliografía

- Autodesk Inc. (2021). *Revit*. <https://www.autodesk.mx>
- Ayoub, M. (2019). 100 Years of Daylighting: A Chronological Review of Daylight Prediction and Calculation Methods. *Solar Energy*, 194, 360–390. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.072>
- Baker, N. y Steemers, K. (2014). *Daylight Design of Buildings*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315073750>
- Boccia, O. y Zazzini, P. (2015). Daylight in Buildings Equipped with Traditional or Innovative Sources: A Critical Analysis on the Use of the Scale Model Approach. *Energy and Buildings*, 86, 376–393. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.003>
- Bodart, M. y Cauwerts, C. (2017). Assessing Daylight Luminance Values and Daylight Glare Probability in Scale Models. *Building and Environment*, 113, 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.033>
- Centro Mario Molina. (2016). *Libro de Química. Programa en educación en cambio climático*. México, D.F.: Centro Mario Molina. <https://centromariomolina.org/libro/libros/LibrodeQuimica/156/>.
- Chen, X., Zhang, X. y Du, J. (2020). The Potential of Circadian Lighting in Office Buildings Using a Fibre Optics Daylighting System in Beijing. *Building and Environment*, 182, 107118. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107118>
- DesignBuilder (2020). *DesignBuilder Add-In for Revit 2021*. <https://designbuilder.co.uk>
- Erem, A. S. y Razaque, M. S. (2021). Vitamin D-Independent Benefits of Safe Sunlight Exposure. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 213, 105957. <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2021.105957>
- García Quintero, T. B. y Morales Guzmán, C. C. (2021). Diseño y construcción de proto-

- tipos de heliodón para simulador de trayectorias solares. *Procesos Urbanos*, 8(2), e541. <https://doi.org/10.21892/2422085X.541>
- GoPro (2017). *GoPro HERO6*. <https://gopro.com>
- Instituto Nacional de Infraestructura Física Educativa (2011). *Normas y Especificaciones para Estudios, Proyectos, Construcción e Instalaciones* (Vol. 3, Tomo I). http://www.inifed.gob.mx/doc/normateca/tec/V3-HF/Volumen_3_Tomo_I_Disenio_Arquitectonico.pdf.
- MakerBot Industries, L. (2018). *MakerBot Replicator+*.
- Nitter-betanit.com. (2015). *Luxmeter System Manual*. www.betanit.com
- (2016a). *Heliodon Orange Pro V*. www.betanit.com
- (2016b). *Orange Heliodon GUI*. www.betanit.com
- Ochoa, C. E., Aries, M. B. C. y Hensen, J. L. M. (2010). Current Perspective on Lighting Simulation for Building Science. *Proceedings IBPSA-NVL 2010 Event*, 14, 1–9.
- Papatsimpa, C. y Linnartz, J. P. (2020). Personalized Office Lighting for Circadian Health and Improved Sleep. *Sensors*, 20(16), 4569. <https://doi.org/10.3390/s20164569>
- Secretaría de Energía (2014) *Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en edificios no residenciales*. Pub. L. No. NOM-007-ENER-2014. México. <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/5437/sener/sener.html>.
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social (1999). *Condiciones de Iluminación en los Centros de Trabajo.*, Pub. L. No. NOM-025-STPS-1999. México. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4948966&fecha=31/05/1999#gsc.tab=0.
- (2008). *Condiciones de iluminación en los centros de trabajo.*, Pub. L. No. NOM-025-STPS-2008. México. <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/3581/stps/stps.htm>.
- Serra, R. (1999). *Arquitectura y Climas*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Wong, I. L. (2017). A Review of Daylighting Design and Implementation in Buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 959–968. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.061>

Capítulo 2. Influencia de la densificación urbana en el consumo de energía en las edificaciones residenciales

FÁTIMA ANAHÍ CÓRDOVA BORBÓN*

MARÍA GUADALUPE ALPUCHE CRUZ**

GLENDA BETHINA YANES ORDIALES***

Resumen

En América Latina, la globalización y la idealización de la vida campestre han incentivado el crecimiento en un modelo disperso, conocido también como crecimiento en baja densidad. Este tipo de estructura trae consigo una serie de problemáticas para la gestión de recursos económicos, aumento en tiempo de traslados, dependencia en el uso del automóvil, deficiencia en los sistemas de transporte no motorizados, segregación social, encarecimiento del mantenimiento de la infraestructura urbana, inseguridad y un aumento general en la demanda de energía y combustibles. Como medida de contraste, se ha establecido que las estrategias relacionadas a la contención horizontal del crecimiento, tales como la densificación, crecimiento vertical, *infill* urbano y crecimiento compacto, pueden traer múltiples beneficios.

El objetivo principal de este estudio es analizar el impacto de la densificación urbana en el consumo energético de las edificaciones del clima cálido seco de México. En particular, se evalúa la intensidad de consumo de energía en el uso de refrigeración y calefacción de las viviendas, por medio de una selección de parámetros descriptivos de la densidad física y la mor-

* Maestra en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente. Universidad de Sonora, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5554-377X>

** Doctora en Ingeniería con Especialidad en Diseño Bioclimático. Universidad de Sonora, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7641-0538>

*** Doctora en Ciencias Sociales. Universidad de Sonora. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6219-8978>

fología de la ciudad en un barrio de la ciudad de Hermosillo, Sonora, con potencial de densificación, y se compara con seis distintos escenarios hipotéticos densificados.

La metodología utilizada consiste en el análisis del contexto y preexistencias ambientales de la ciudad para determinar una muestra de morfología, para después definir los escenarios densificados en un sentido vertical y horizontal hasta los límites normativos, conservando las características actuales de la trama urbana (derechos de vía, manzanas y banquetas). Seguido, se procede a la evaluación energética de los escenarios para obtener la Intensidad de Uso de Energía anual (IUE).

Finalmente, los resultados muestran que, la estrategia de densificación y el cambio en la morfología urbana, a través de la vivienda vertical, reducen considerablemente la intensidad de uso de energía en aire acondicionado y calefacción en el clima cálido seco, por lo que deberá ser un factor relevante en el diseño de estrategias en el crecimiento de las ciudades.

Palabras clave: *Densificación urbana, ciudad compacta, Intensidad de Uso de Energía.*

Abstract

In Latin America, globalization and the idealization of country life have encourage growth in a dispersed model, also known as urban sprawl. This type of structure comes with a series of problems for the management of economic resources, increase in travel times dependence on car use, deficiency in non-motorized transport systems, social segregation, higher maintenance costs for urban infrastructure, insecurity, and an increase in energy use. As a contrast measure, it has been established that strategies related to compact and vertical growth, such as densification, can bring multiple benefits.

The main objective of this study is to analyze the impact of urban densification on energy consumption of buildings in an arid climate of Mexico. In particular, the intensity of energy consumption in the use of cooling and heating of the dwellings. This is evaluated through a selection of the most

descriptive parameters of the physical density and morphology of the city in a neighborhood of Hermosillo, Sonora, through the analysis and comparison of six different densified hypothetical scenarios.

The applied methodology consists of the analysis of context and environmental pre-existence of the city to determine a Morphology Sample to later define the densified scenarios in a vertical and horizontal direction up to the normative limits, conserving the current characteristics of the urban fabric (streets, blocks, and sidewalks). Next, the energy evaluation of the scenarios is carried out to obtain the annual Energy Use Intensity.

Finally, the results show that the densification strategy and the change in urban morphology through vertical housing considerably reduce the intensity of energy consumption in air conditioning and heating in the arid climates. Therefore, it should be a relevant factor in the design of growth strategies for cities, especially those with a hot dry climate.

Keywords: Urban densification, compact cities, Energy Use Intensity.

Introducción

Desde hace tres décadas, a partir de la Conferencia de las Naciones Unidas, mejor conocida como Cumbre de la Tierra, realizada en 1992 en la ciudad de Río de Janeiro, Brasil, se realizaron compromisos por parte de diferentes jefes de Estado, representantes de asociaciones civiles y empresarios, para ejecutar acciones diversas en pro del desarrollo sostenible.

Actualmente, sabemos que la cuestión ambiental y la manera de consumir los recursos naturales es una materia de suma importancia en todas las ramas de profesiones e investigación. Además, está comprobado, que el aumento de combustibles fósiles y la excesiva emisión de gases de efecto invernadero por fuentes antropogénicas son la causa del aumento de temperatura promedio a nivel global en las últimas décadas. Y ha llegado a tal situación que no existen medidas que recuperen el daño ya hecho a los ecosistemas naturales, por lo que sólo medidas de mitigación urgentes lograrán reducir el continuo calentamiento global.

En un planeta donde el 54% de las personas viven en ciudades, éstas se convierten en una variable clave para ejecutar medidas de acción de gran impacto en la reducción de gases de efecto invernadero, por lo que la forma en la que se edifican y las repercusiones ambientales de su funcionamiento estarán estrechamente ligadas a sus lineamientos de diseño.

La demanda energética en las zonas áridas del mundo representa un reto para el desarrollo y la adecuación ambiental. De acuerdo con R. Calderón, en el 2011 “el consumo eléctrico anualizado de la vivienda social en México demuestra que las ciudades de zonas áridas evaluadas presentan niveles por encima del consumo medio nacional” (Calderón *et al.*, 2011).

La vivienda, como unidad a reproducirse en un conjunto urbano, precisa de tener las características morfológicas adecuadas para su correcta interacción con los demás edificios para buscar beneficio entre sí. En el caso de las viviendas en serie en las ciudades en vías de desarrollo —caracterizada por su tamaño, costo económico, materiales de baja calidad y procedimientos constructivos poco adecuados para adaptarse al clima—, no han evolucionado en las últimas décadas y no suelen ser energéticamente eficientes en su etapa de uso (Borbon Almada, Perez, Miranda P. y Cabanillas,

2012), debido a su construcción con materiales inadecuados para el clima y a tener una relación nula con la geometría urbana que la rodea.

La combinación de la vivienda energéticamente ineficiente y la falta de planeación urbana sostenible, en una ciudad con clima extremo, generan una mayor demanda energética para la ciudad y los ciudadanos (ver figura 1). De acuerdo con el estudio de Francesco Indovina (2007), “la ciudad de baja densidad”, la dispersión urbana y baja densidad lleva consigo problemas relacionados con movilidad, consumo de suelo, mantenimiento de servicios básicos (luz, agua, alcantarillado, residuos), seguridad, baja calidad del espacio público, riesgos de incendios, excesivo consumo energético, falta de equipamientos, etc.

Figura 1. *Problemática del consumo energético*

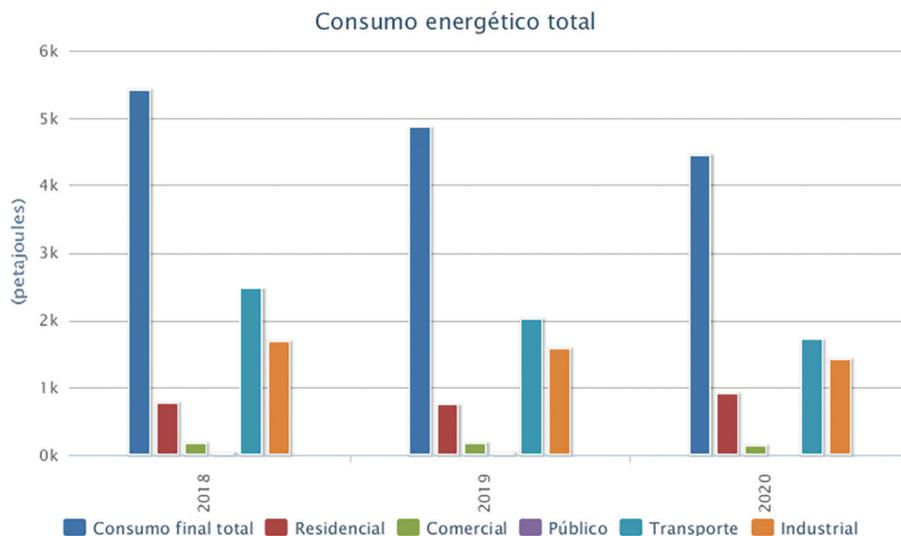


Fuente: Elaboración propia.

En México, del consumo energético total informado por la Secretaría de Energía (SENER, 2021), en el Balance Nacional de Energía durante el 2020, el 20.87% corresponde al sector residencial, el cual ha ido en aumento, ya que, en el 2018, el porcentaje correspondía a un 14.4% del total, como se muestra en la figura 2.

Sara Topelson —subsecretaria de Desarrollo Urbano y Ordenación del Territorio de la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol)— indica que, en México, el costo del crecimiento disperso de la ciudad resulta insostenible para los gobiernos estatales y municipales, debido a que no pueden mantener un territorio tan grande con los mismos impuestos que paga el ciudadano, los comercios y toda la actividad en la ciudad (Serrano Cruz, 2012). La situación de crecimiento disperso de la ciudad de Hermosillo, en las últimas décadas con el modelo de vivienda multifamiliar, en desarrollos urbanos tipo suburbios, crea un efecto multiplicador del alto consumo energético de las viviendas con condiciones ineficientes, además de la inversión y gasto público que conlleva el sistema de redes de distribución eléctrica (Robles, 2020).

Figura 2. Consumo energético total del sector residencial



Fuente: SENER, 2021.

Es entonces necesario contar con valores más precisos, sobre las ventajas o desventajas de los criterios urbanos, que permitan replantear la forma de construir ciudad en las ciudades en crecimiento del clima cálido seco, relacionando tres conceptos: morfología urbana, energía y vivienda.

El presente documento surge de una investigación doctoral donde se tuvo como objetivo general analizar el impacto de la densificación urbana en el consumo energético de las edificaciones, tomando como caso de estudio una colonia de la ciudad de Hermosillo, Sonora, México, con grandes posibilidades de densificación, para evaluar la intensidad de consumo de energía de las viviendas utilizando parámetros de densidad física y morfología urbana.

El presente trabajo intenta contribuir al estudio de las ventajas del crecimiento compacto a través de la densificación urbana enfocándose en su impacto en el consumo energético de las viviendas. Puesto que el desempeño energético de una edificación es considerado dependiente de la geometría urbana (Ratti *et al.*, 2005; Salvati, Palme, Chiesa y M., 2020), los cambios que ejercen las estrategias de densificación alteran la geometría del contexto al modificar la ocupación que se ejerce sobre los suelos y su intensidad

de utilización, por lo que será necesario estudiar sus efectos en el rendimiento energético de las edificaciones.

Descripción del método de estudio

La metodología de análisis se basó en la escala propuesta por T.R. Oke (Oke, 1987) para definir las escalas horizontales de estudio, con base en los objetivos de observación de las características construidas (edificios, su altura, la forma y configuración de la calle, la geometría del cañón urbano, los elementos de mayor relevancia) y los fenómenos climáticos observados.

La relación de variables dependientes e independientes que fueron evaluadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. *Variables dependientes e independientes*

Variables Independientes	Variables Dependientes
-Temperatura Exterior de Bulbo Seco	-Temperatura Superficial de muros
-Humedad relativa	- Consumo de sistemas HVAC
-Coeficiente de Ocupación de Suelo (cos)	- Intensidad de Uso de Energía
-Coeficiente de Utilización de Suelo (cus)	
-Proporción Volumen/Superficie de terreno (Vol/Lot)	
-Relación de Aspecto (H/W)	
-Proporción Fachada/Área de construcción (Fach/Const)	

Fuente: Elaboración propia.

A partir de estas variables se propone la siguiente secuencia de cinco etapas, como lo muestra la figura 3, para el desarrollo de la metodología de evaluación.

Determinación de la muestra

La cantidad y tipo de información contenida en cualquier muestra de morfología urbana puede ser muy variada y extensa. Para el presente estudio, se analizan los parámetros de mayor relación con los objetivos del estudio que

Figura 3. Esquema de metodología de evaluación



Fuente: Elaboración propia.

permitan familiarizar al lector con el contexto de trabajo. Los rubros de análisis se extienden a las características de la población, de la vivienda, tipología de construcción, edad de la construcción, y características del tejido urbano.

Se obtienen valores medios de densidad neta y bruta para los siguientes parámetros a estudiar: COS, CUS, proporción volumen/superficie de terreno, relación de aspecto H/W del cañón urbano, y proporción de fachada/superficie de terreno. Los valores COS y CUS se calcularon en el escenario existente de la muestra de manera neta y bruta. La primera escala es un promedio de ocupación y utilización tomando en cuenta la manzana completa, y la segunda contempla la totalidad de la superficie de la muestra incluyendo vialidades, banquetas y equipamientos.

La manipulación de las variables independientes seleccionadas COS y CUS busca intencionalmente observar los efectos que tienen en la morfología urbana y sus repercusiones en el consumo energético de las edificaciones. Para ello, se han determinado 4 grados de manipulación o escenarios que modifican la intensidad del estímulo en las variables independientes. Cabe aclarar que los escenarios no son limitativos en cuanto a número o grado de manipulación.

La evaluación de los escenarios será la fase donde se calcularán cuantitativamente los efectos del cambio de morfología en los escenarios determinados. El objetivo será observar el comportamiento de los parámetros de densidad física urbana con los valores antes mencionados, relacionados con

la intensidad de uso de energía de las edificaciones (IUE) desde dos perspectivas: el análisis paramétrico y la evaluación energética.

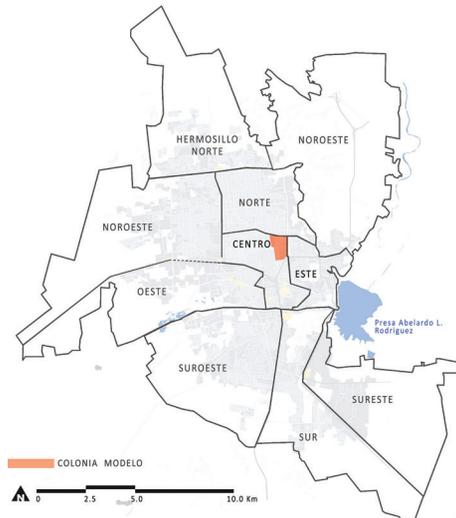
Descripción del caso de estudio

Después de realizar un análisis acorde a lo antes mencionado, se selecciona la colonia Modelo como caso de estudio.

Descripción de la colonia Modelo

La colonia Modelo, dentro de la ciudad de Hermosillo, es una zona con potencial de densificación. Tiene una extensión de 107 hectáreas y es mayormente ocupada por viviendas unifamiliares y cuenta con equipamientos diversos como el panteón Yáñez, parques y hospitales. Su céntrica ubicación (ver figura 4) y tamaño de lotes han hecho que en los últimos años se observe una transformación en el uso de las viviendas hacia ofertas de tipo comercial, departamentos y oficinas.

Figura 4. Ubicación de colonia Modelo según sectores delimitados en la ciudad de Hermosillo



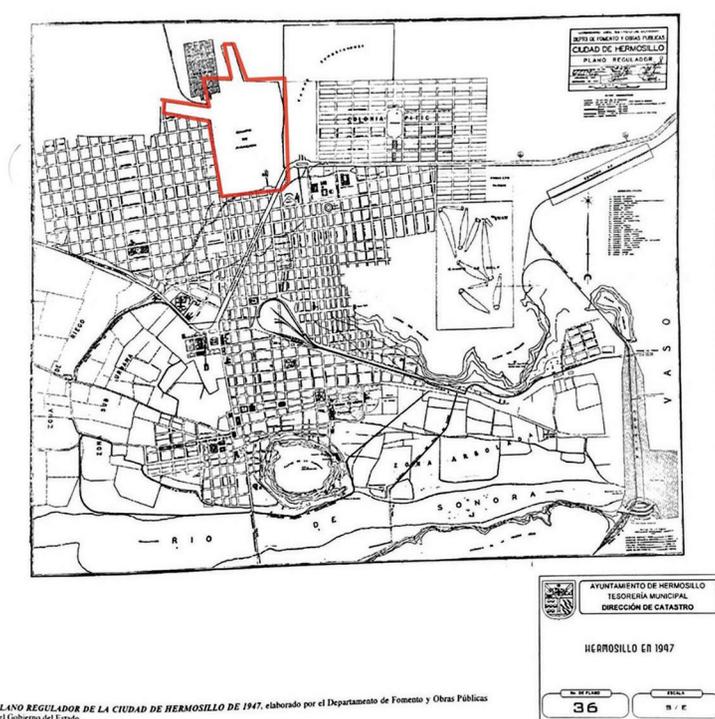
Fuente: Elaboración propia a partir de IMPLAN, 2016.

Figura 5. Aeropuerto Civil de Hermosillo previo a su demolición



Fuente: Recuperado de sitio (Hermosillo, 2015).

Figura 6. Ubicación de la colonia Modelo dentro del fragmento del plano regulador de la ciudad de Hermosillo de 1947



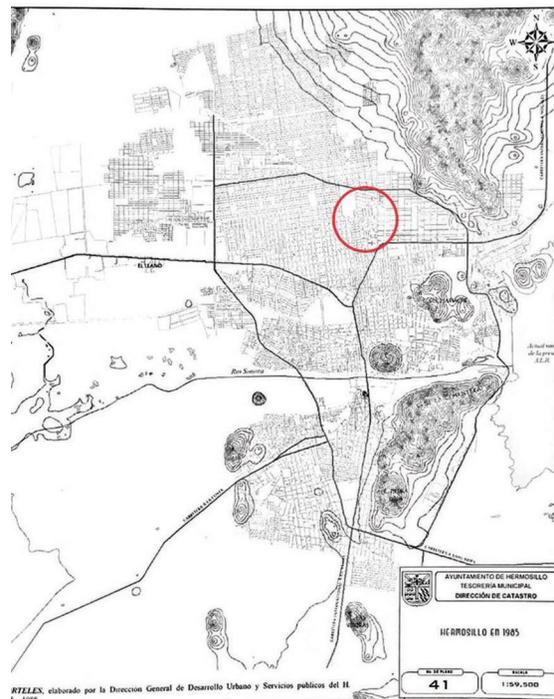
PLANO REGULADOR DE LA CIUDAD DE HERMOSILLO DE 1947, elaborado por el Departamento de Fomento y Obras Públicas el Gobierno del Estado.

Fuente: Lagarda, Landeros y Noriega, 2009.

La colonia Modelo fue fundada durante el sexenio del gobernador Ignacio Soto Martínez, entre 1949 y 1955, en los terrenos del entonces Aeropuerto Civil de Hermosillo (ver figura 5), llamado en un inicio “Campo de Aterrizaje General Joaquín Amaro” (Romero Navarrete, 2022). Dicha transformación sucedió bajo la aprobación del “Aeropuerto de La Manga”, antecesor del actual Aeropuerto Ignacio Pesqueira al poniente de la ciudad.

En el Plano Regulador de la Ciudad de Hermosillo de 1947 (ver figura 6), aún se observa la traza del campo de aviación al norte de la ciudad y al oeste de la ya consolidada Colonia Pitic, pero no es hasta el “Plano elaborado por cuarteles”, elaborado en 1985 por la Dirección General de Desarrollo Urbano y Servicios públicos de. H Ayuntamiento de Hermosillo, que la colonia Modelo figura en el mapa de la ciudad (ver figura 7).

Figura 7. Ubicación de la colonia Modelo dentro del fragmento del plano regulador de la ciudad de Hermosillo de 1947, elaborado por el Departamento de Fomento y Obras Públicas del Gobierno del Estado



Fuente: Lagarda, Landeros y Noriega, 2009.

La morfología de la colonia Modelo se caracteriza por la cantidad de equipamientos de jardines, parques, panteón, hospitales, iglesias y vivienda unifamiliar. Su estructura vial es única en la ciudad, una parte formada por curvas y figuras irregulares que se encuentran entre sí y otra sección de vialidades ortogonales, que forman manzanas rectangulares con orientación norte-sur en su cara de mayor longitud (ver figura 8).

Figura 8. Panorámica de la traza urbana de la colonia Modelo en Hermosillo



Fuente: Arvizu, ND.

Actualmente, su mezcla de uso de suelo es bastante heterogénea y su centralidad, con respecto a la mancha urbana, la convierten en una zona de continua transformación y movimiento.

Tamaño de la muestra de análisis

El tamaño de la muestra de análisis fue determinada a partir de la extensión total de la colonia y fueron utilizadas como fuentes de información las plataformas abiertas de *Google Earth*, datos estadísticos de INEGI del intercensal 2015, datos geoestadísticos de la herramienta en línea Espacio y Datos de México e Información catastral GIS para la ciudad de Hermosillo. El cálculo de la muestra contempló un tamaño de universo de 107 hectáreas y se obtuvo a través de la herramienta *Decision Analyst STATSTM 2.0.*, con un

resultado de una muestra de análisis de 43 hectáreas. La selección de la muestra se localiza en la zona sur de la colonia Modelo. Al norte colinda con la av. Seguro Social que corre en un sentido oriente a poniente, al sur con la av. Aguascalientes, al este con la calle Benito Juárez y al oeste con la calle General José María Yáñez (ver figura 9).

Figura 9. Muestra de análisis de colonia Modelo



Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth, 2022.

Para una mejor comprensión de la situación actual del estudio de la colonia Modelo, se describen en los siguientes párrafos los aspectos de tipo de población, características generales de vivienda y construcción, densidad, cronología y valor dentro de la muestra de análisis.

De acuerdo con el último censo publicado por INEGI, al 2015 habitan 1952 personas en la muestra de análisis, con una mayoría de edad de entre 30 a 59 años, seguido por la población adulta mayor a 60, y cerca del 5% cuenta con algún tipo de discapacidad. La densidad bruta de población es de 45.4 habitantes/ha menos que la tendencia total de Hermosillo al 2015.

La muestra cuenta con 825 viviendas particulares, de las cuales el 15% se encuentran deshabitadas (ver figura 10), resultando una densidad de 14 viviendas por hectárea. El 89% de la construcción se encuentra edificada a nivel de calle (ver figura 11), el 11% en un segundo nivel y sólo un 1% se ubica en un tercer nivel de edificación. En promedio, las construcciones tienen una antigüedad de 46 años. La importancia del análisis destaca en la pérdida de valor de la construcción misma.

Figura 10. Porcentaje de viviendas habitadas y deshabitadas en muestra de análisis de la colonia Modelo

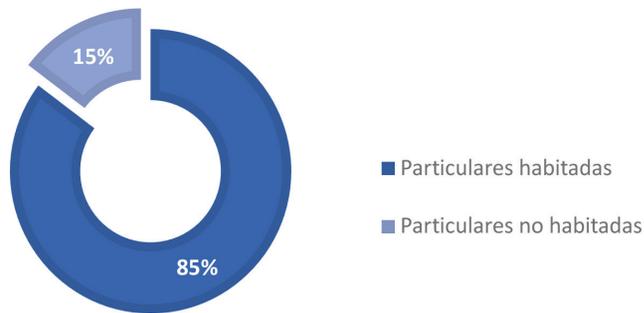


Figura 11. Tipología de viviendas dentro de la Muestra de Análisis (MA) de la Colonia Modelo



Fuente: Elaboración propia.

Para determinar el valor aproximado de los terrenos y las viviendas que integraron la muestra analizada, se consultó el documento “Planos y tablas de valores unitarios de suelo y construcción y depreciación por edad de la

construcción”, publicado en 2021 por el H. Ayuntamiento de Hermosillo. La muestra se localiza en la región catastral 4 dentro del mapa de regiones y comprende las zonas homogéneas 4M, 4N y 4O, con valores que oscilan entre los \$1,990.00 hasta los \$2,805.00 pesos por metro cuadrado de terreno. La tabla 2 muestra el incremento de valor en los últimos tres años publicados con una tasa de crecimiento anual aproximado del 8% entre el 2019 y 2021.

Tabla 2. Valor promedio de terreno por metro cuadrado para la Muestra de Análisis (MA) de la colonia Modelo

	2019	2020	2021
4M MODELO	\$1,755.00	\$1,880.00	\$1,990.00
4N MODELO	\$2,350.00	\$2,495.00	\$2,805.00
4O MODELO	\$1,835.00	\$2,000.00	\$2,180.00

Fuente: H. Ayuntamiento de Hermosillo, 2021.

Según los datos obtenidos del mapa catastral de vivienda, dentro de la muestra de análisis, el 86% fueron construidas en los setenta, resultando en una antigüedad promedio entre 10 y 50 años. Un 7% de la vivienda fue construida en los últimos 20 años, observando un inicio de tendencia a suplir construcciones existentes con nuevas. Dicha antigüedad tiene como consecuencia un factor de demérito de entre 0.4331 y 0.2253, según los datos publicados al 2021 por el catastro municipal.

La siguiente tabla (ver tabla 3) muestra una ficha resumen de los datos recolectados para la muestra de análisis de la colonia Modelo. En las 43 hectáreas fueron procesados 894 lotes y 206 202 m² de construcción.

Parámetros morfológicos

A continuación, se describen las características morfológicas (ver tabla 4). La medición de estos valores contempla la superficie total de la muestra de análisis en su estado actual y serán utilizados como referencia para ser comparados con los escenarios densificados. Estos valores fueron calculados utilizando mapas GIS actualizados, mediciones *in situ*, procesados en hoja

Tabla 3. Ficha resumen de muestra de análisis de colonia Modelo

FICHA RESUMEN - MUESTRA DE ANÁLISIS				
Escenario: Estado actual	MODELO			
Colindancias	Norte	Av. Seguro Social		
	Este	Calle Benito Juárez		
	Oeste	Calle Gral. José María Yáñez		
	Sur	Av. Aguascalientes		
Superficie de muestra	430,000	m ²		
	43	ha.		
	0	km ²		
Lotes	894	lotes		
Superficie lote promedio:	385	m ²		
Construcción total:	206,202	m ²	100%	
Un nivel	182,979	m ²	89%	
Dos niveles	23,223	m ²	11%	
Sección de vialidad	11	m (Este-Oeste)		
	15	m (Norte-Sur)		
Población	1,952			
Vivienda	825			
Comercios	187			
Densidad vivienda	19	viv/ha		
Densidad población	45	personas/ha		
Densidad por unidad mixta	24	Unidad mixta/ha		

Fuente: Elaboración propia.

de cálculo. Para lograr simplificar el cálculo, se utilizó un valor promedio de altura de 2.85 metros en exteriores por cada nivel de vivienda. Los valores netos contemplan sólo la superficie de los predios, mientras que los valores brutos abarcan la totalidad de la muestra de análisis (43 hectáreas).

Definición de los escenarios

Este estudio involucra múltiples escenarios densificados modificando su densidad física y morfología urbana, manteniendo el arreglo y características generales de anchos de calles, bloques de manzana y orientaciones.

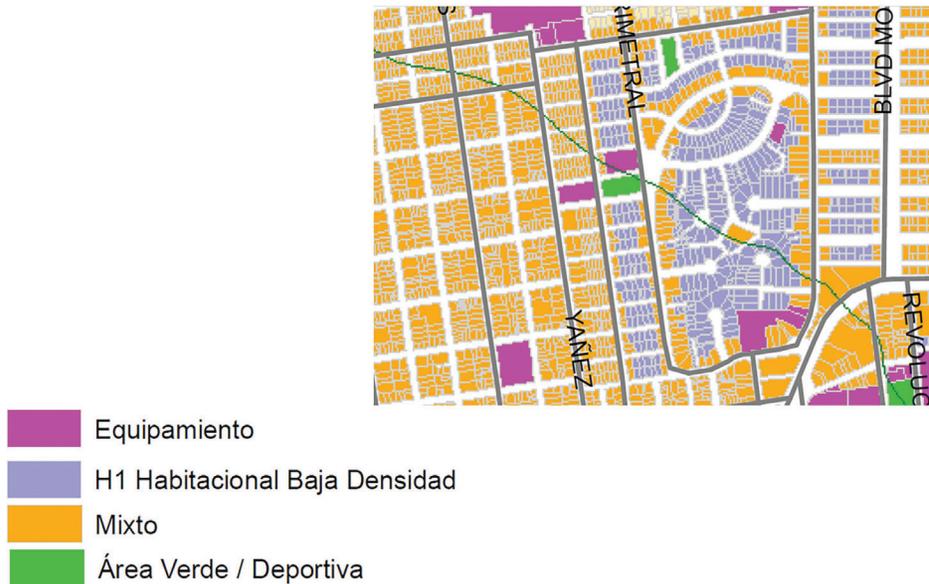
Tabla 4. Resumen de parámetros morfológicos de la muestra de análisis de la colonia Modelo

Parámetro	Valor
Coefficiente de Ocupación de Suelo	NETO 0.53 / BRUTO 0.43
Coefficiente de Utilización de Suelo	NETO 0.60 / BRUTO 0.48
Proporción de volumen/superficie de terreno	1.62
Relación de aspecto	0.23
Proporción de fachada/superficie de terreno	0.89
Proporción fachada/superficie de construcción	1.48

Según el PDUCP-2015, la muestra de análisis está conformada, principalmente, por usos de tipo habitacional de baja densidad (H1) y uso mixto (ver figura 12).

Para el diseño de los escenarios, se contempla el reglamento de construcción de la ciudad de Hermosillo y el documento de ordenamiento territorial, los cuales permiten una edificabilidad máxima de 12 niveles en el uso mixto con un cos neto de 0.70 y un cus neto de 8.40. En cuanto al uso H1 habitacional de baja densidad, el valor cos se mantiene con 0.70, pero

Figura 12. Uso de suelos de la muestra de análisis



Fuente: PDUCP, 2015.

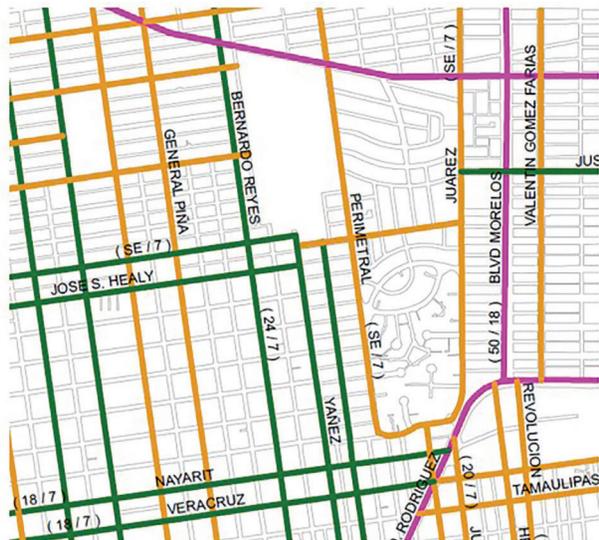
la utilización decrece a 1.40 limitando la verticalidad. Sin embargo, según este mismo documento, este uso tiene una compatibilidad con el uso mixto, lo cual permite la densificación en dichas zonas.

Además del COS especificado en el PDMH, deberá considerarse, según la norma de construcción, un área permeable del 5% de la cual la mitad deberá ser vegetada, con el objetivo de mejorar la permeabilidad de la ciudad frente a los periodos de lluvia y generar un aumento de la masa vegetal en la ciudad.

Otra consideración importante será la que marca el plano de vialidades E8 del Programa de Desarrollo Urbano que clasifica algunas de las vialidades como Vialidad Secundaria Existente (marcadas con color verde). Para esta última existe una restricción adicional de construcción de siete metros entre el límite de propiedad frente a la calle al interior del lote (ver figura 13).

De igual forma, se analizan tres formas de densificación: densificación horizontal, densificación vertical, densificación mixta: horizontal y vertical. Dado a que los límites normativos en el área de estudio permiten la densi-

Figura 13. Tipo de vialidades en muestra de análisis



— Secundaria Existente — Colectora Existente

ficación, no se estudiará el caso fuera de los límites permitidos. Para este ejercicio y un primer alcance, la forma de las edificaciones será de tipo lineal o tipo calle. Serán consideradas como homogéneas, es decir, no se analizarán escenarios con construcciones diferentes dentro del mismo bloque. Esto permitirá facilitar el cálculo y simulación de estos.

La siguiente tabla 5 muestra a manera de resumen los valores comparativos para los escenarios existente y densificados. Estos valores servirán como base para la creación del modelo tridimensional y su análisis energético. Parte, además, de los valores promedios del estado actual de la muestra de análisis bajo tres situaciones de densificación. Cada uno de los escenarios A, B y C tiene a la vez de 3 a 6 subescenarios que parten de valores cercanos al estado actual hasta los límites de normativos.

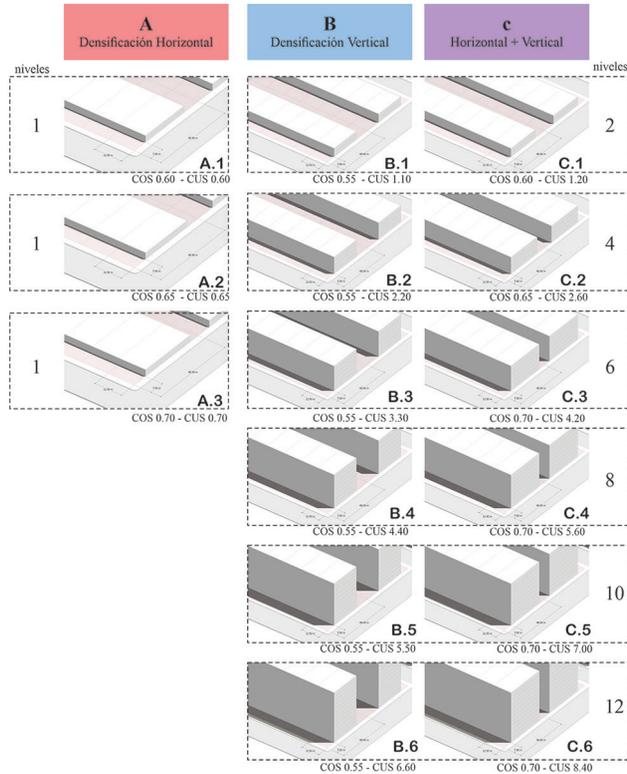
Tabla 5. *Tabla resumen de escenarios para colonia Modelo*

	Actual	A Densificación Horizontal			B Densificación Vertical						C Densificación Horizontal + Vertical						
		A.1	A.2	A.3	B.1	B.2	B.3	B.4	B.5	B.6	C.1	C.2	C.3	C.4	C.5	C.6	
Niveles	1 a 2	1	1	1	2	4	6	8	10	12	2	4	6	8	10	12	
Hab. / ha	45	47	51	55	84	168	252	336	420	504	95	205	332	442	553	664	
Viv. / ha	19	26	29	31	47	93	140	187	234	280	53	114	184	246	307	369	
COS	NETO	0.53	0.60	0.65	0.70	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.60	0.65	0.70	0.70	0.70	0.70
	BRUTO	0.43	0.59	0.63	0.68	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.59	0.63	0.68	0.68	0.68	0.68
CUS	NETO	0.60	0.60	0.65	0.70	1.1	2.1	3.2	4.3	5.3	6.4	1.2	2.6	4.2	5.6	7.0	8.4
	BRUTO	0.48	0.59	0.63	0.68	1.02	2.02	3.02	4.03	5.03	6.03	1.15	2.47	3.97	5.29	6.61	7.92

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 14, se muestran los esquemas volumétricos para la propuesta de densificación de la MMU de la colonia Modelo.

Figura 14. Esquema de densificación para la MMU de la colonia Modelo



Análisis paramétrico de los escenarios

Este análisis parte de la recolección de datos y cálculo del escenario existente. A partir de aquí, fueron diseñados de manera numérica (no en proyecto) los escenarios densificados con valores normalizados de altura por nivel, tipología de lote y manzana. Los valores paramétricos que corresponden a la morfología urbana elegidos para este estudio son: Proporción volumen y área de lote (Vol/Lot), proporción de aspecto (H/W), proporción de superficie de fachadas y área de lote (Fach/Lot), y proporción fachada y área de construcción (Fach/Const). Para los escenarios A, B y C, donde las construcciones y ancho de vialidades son homogéneas, el cálculo se realizó en hoja de cálculo XLS, tomando en cuenta el número de niveles (2.70 m de altura promedio por nivel) de los escenarios propuestos, el ancho de vialidad

existente y las restricciones de construcción del reglamento de construcción. La tabla 6 recopila los resultados del cálculo y medición de los parámetros antes descritos para los escenarios y subescenarios A, B C.

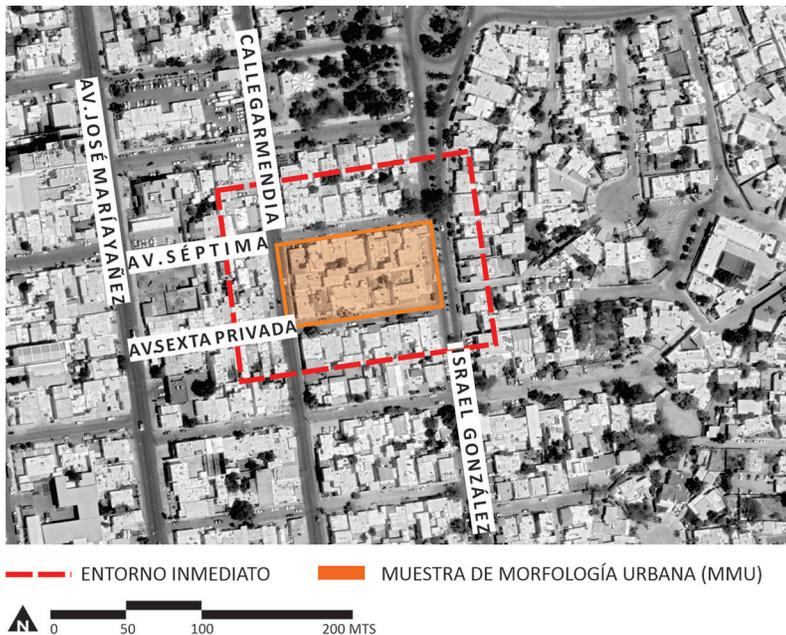
Tabla 6. Resumen de análisis paramétrico de escenarios para la colonia Modelo

Parámetro	Actual	A Densificación Horizontal			B Densificación Vertical						C Densificación Horizontal + Vertical					
		A.1	A.2	A.3	B.1	B.2	B.3	B.4	B.5	B.6	C.1	C.2	C.3	C.4	C.5	C.6
Niveles	1 a 2	1	1	1	2	4	6	8	10	12	2	4	6	8	10	12
Vol/Lot	1.62	1.6	1.8	1.9	2.9	5.7	8.6	11.5	14.4	17.2	3.2	7.0	11.3	15.1	18.9	22.7
H/W	0.23	0.12	0.12	0.12	0.23	0.46	0.70	0.93	1.16	1.39	0.23	0.46	0.70	0.93	1.16	1.39
Fach/Lot	0.89	1.79	1.81	1.83	3.5	7.1	10.6	14.1	17.7	21.2	3.6	7.2	11.0	14.6	18.3	21.9
Fach/Const	1.48	7.04	6.56	6.16	7.83	7.83	7.83	7.83	7.83	7.83	7.04	6.56	6.16	6.16	6.16	6.16

Preparación de la Evaluación Energética

Para la verificación previa de los ajustes de los valores a introducir en la herramienta de cálculo, se realizó una campaña de medición en una Mues-

Figura 15. Muestra de Morfología Urbana MMU de Colonia Modelo



Fuente: Google Earth, 2021.

tra de Morfología Urbana MMU, que considera las edificaciones dentro de un bloque de manzana tipo dentro de la muestra de análisis (ver figura 15). Dentro de la Muestra de Morfología Urbana, fue monitoreada la temperatura superficial exterior de seis fachadas principales que representan las distintas orientaciones y situaciones de localización.

En la figura 16 se muestran las fachadas y orientaciones analizadas dentro de la muestra. Cada una de ellas es representativa de situaciones con respecto al entorno y orientación. En total fueron nueve fachadas que fueron monitoreadas con la toma de temperatura superficial, por medio de la cámara termográfica portátil durante tres horas del día: mañana, medio día y tarde del 21 de mayo del 2021.

Figura 16. Ubicación de edificaciones dentro de la MMU para verificación

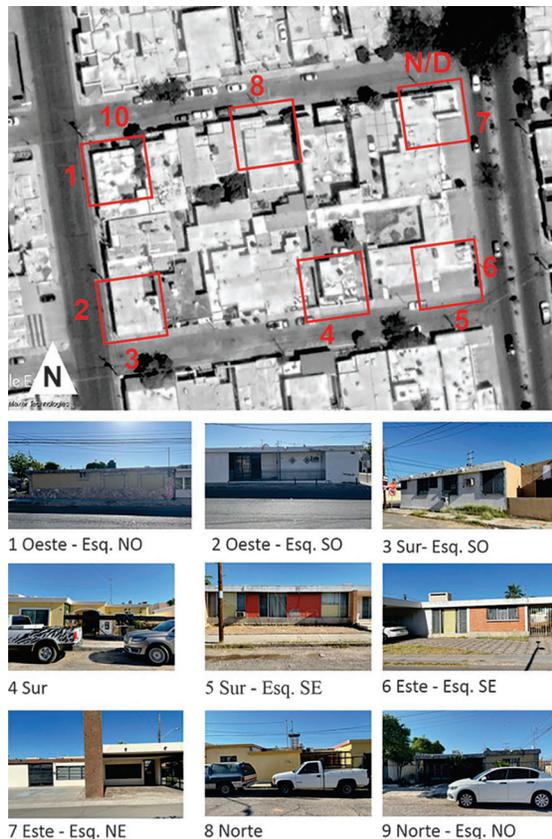
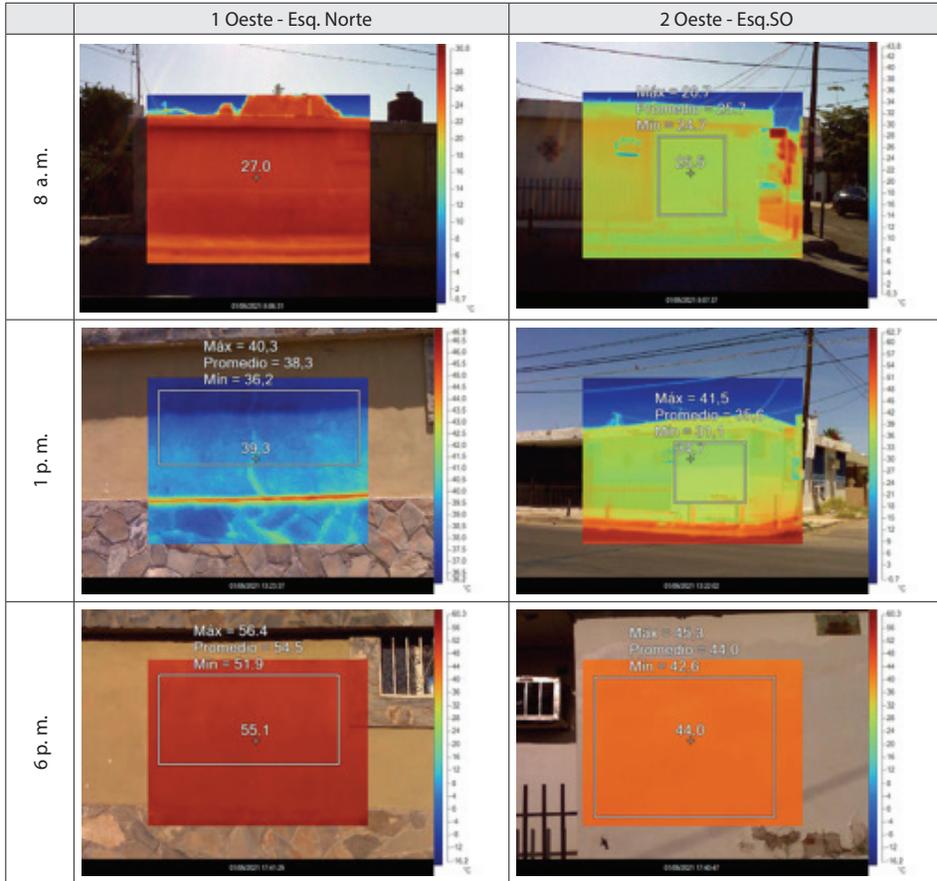


Tabla 7. Toma de temperaturas superficiales en fachadas 1 y 2

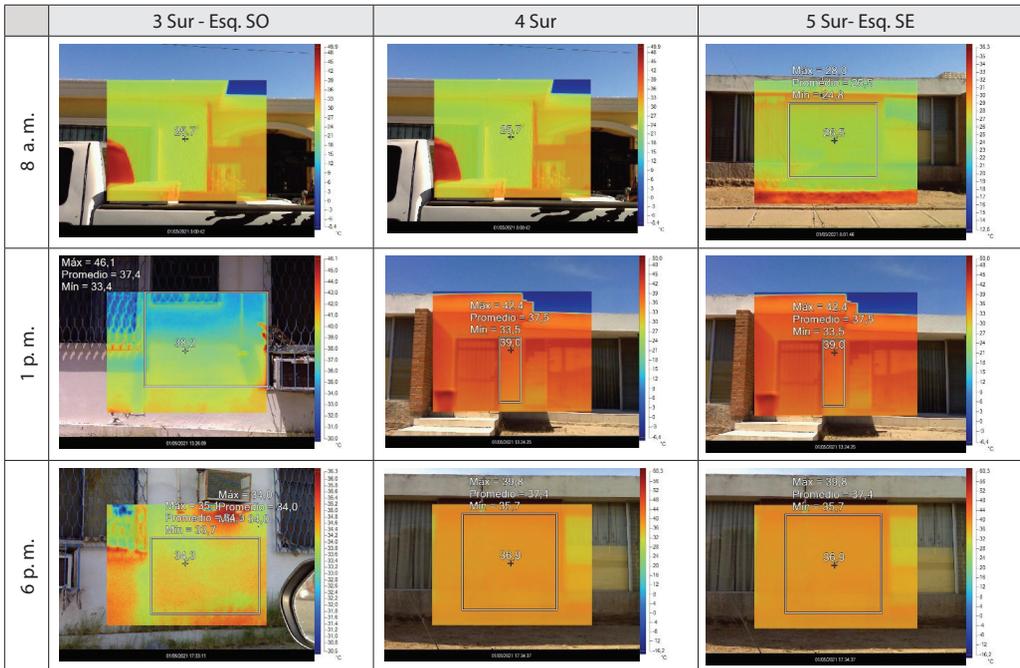


Fuente Elaboración propia.

Las tomas de temperatura fueron procesadas en el software integrado *SmartView*[®], para obtener temperaturas promedio de las superficies en los tres horarios seleccionados. A continuación, se muestran los resultados de las tomas en las nueve fachadas seleccionadas para el análisis (ver tablas 7, 8, 9 y 10).

La siguiente gráfica muestra las condiciones climáticas de temperatura de bulbo seco y humedad relativa monitoreada para el día 1 de mayo del 2021 a través del portal línea *Weather Underground*; se utilizó la estación bajo el nombre IHERMOSI47 29.082° N, 110.963° W, con una elevación de 682 msnm en la ciudad de Hermosillo (ver figura 17).

Tabla 8. Toma de temperaturas superficiales en fachadas 3, 4 y 5



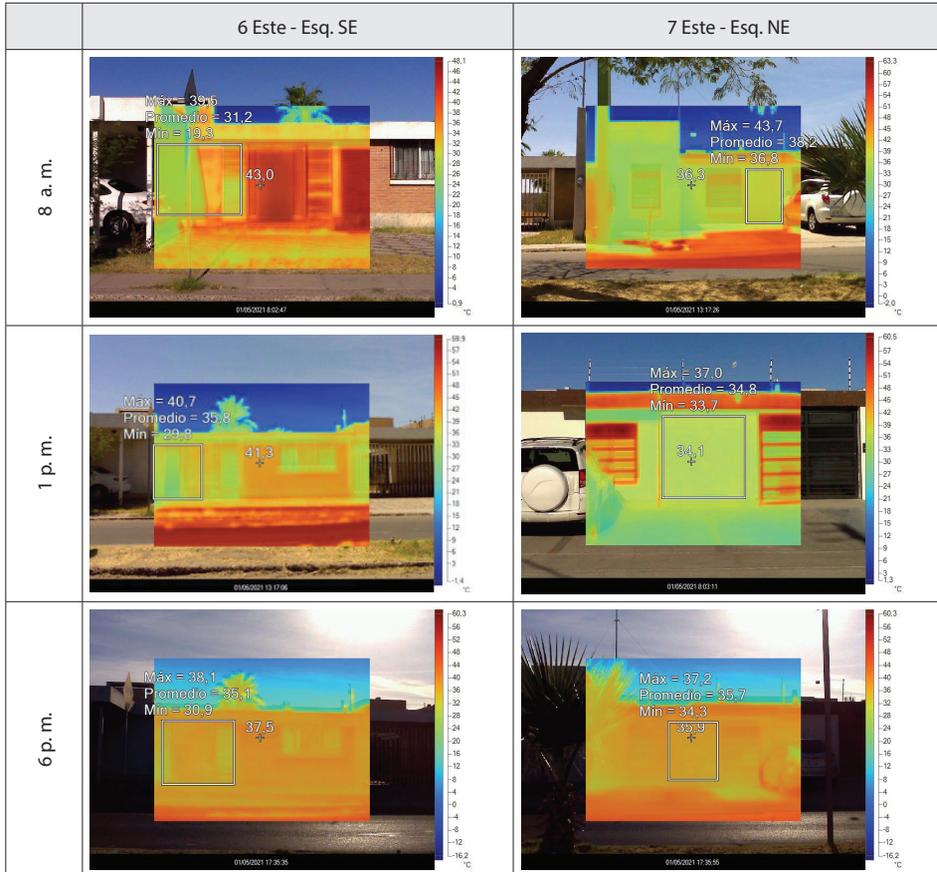
Fuente: Elaboración propia.

Se utilizó el archivo climático base en formato EPW obtenido del repositorio gratuito de datos climáticos para simulaciones de desempeño de edificios *Climate.Onebuilding.org*, actualizada al 4 de julio del 2020 (Nombre del archivo: MEX_SON_Hermosillo-Garcia.Intl.AP.761600_TMYx.2004-2018). La comparación entre el archivo EPW y el monitoreo del clima, muestran diferencias entre sí, por lo que se creó un archivo parchado para esta etapa de ajustes de valor (ver figura 18).

Simulación del caso de estudio

Durante esta etapa se realizaron ajustes para los valores de entrada en la herramienta de cálculo; se compararon las mediciones de temperatura superficial hechas en sitio el día 1 de mayo del 2021, contra las obtenidas en la herramienta. Para ello, se utilizaron como base los datos de temperatura

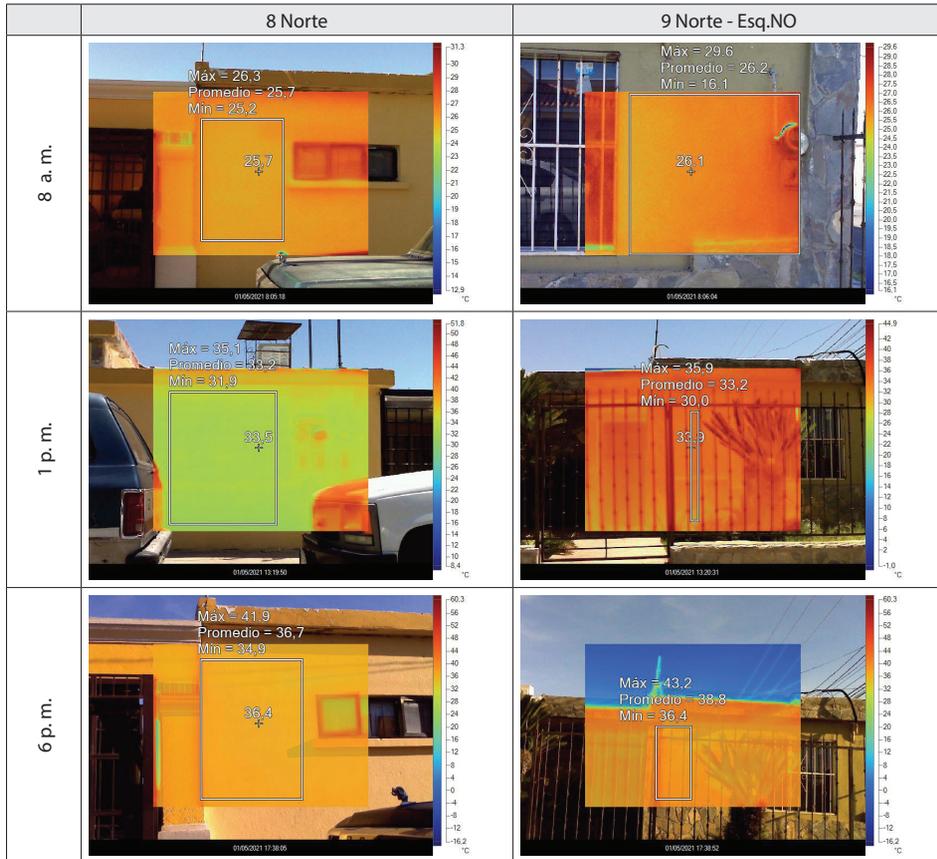
Tabla 9. Toma de temperaturas superficiales en fachadas 6 y 7



Fuente: Elaboración propia.

exterior de bulbo seco reales y un modelo tridimensional, dentro de la herramienta que representa las características geométricas principales del entorno, incluyendo materialidades y colores de superficies de los edificios analizados empíricamente. Además, se crearon geometrías simples a partir de la herramienta Bloques de Edificios con una plantilla de relación muro-acristalamiento del 20%, según el análisis hecho de las fachadas en el sitio. Se incluyeron además todas las otras edificaciones dentro de la manzana, como aquellas que la rodean para tomar en cuenta la proyección de sombras entre las mismas. La tabla 11 muestra un resumen de valores utilizados predeterminados para el modelo, y valores en materiales y de cálculo.

Tabla 10. Toma de temperaturas superficiales en fachadas 8 y 9



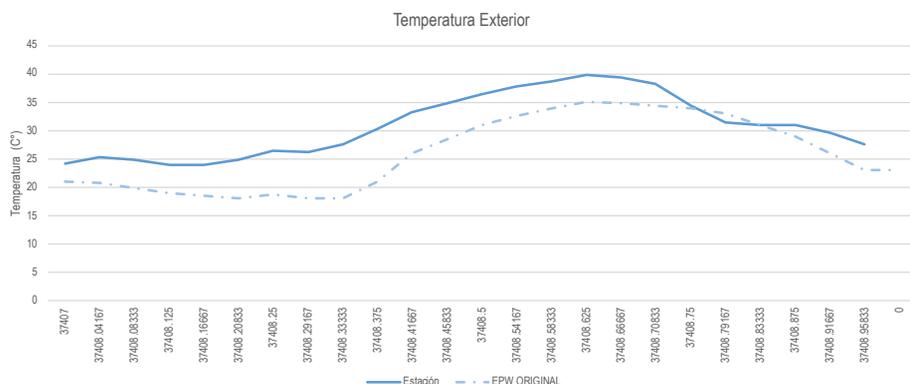
Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Condiciones climáticas para el 1 de mayo 2021 de la ciudad de Hermosillo



Fuente: Estación IHERMOSI47 a través del portal Weather Wunderground.

Figura 18. Temperatura Exterior BS. Comparación entre archivo climático EPW y monitoreo en tiempo real para el 1 de mayo del 2021



Fuente: Climate On building, Estación IHERMOSI47 a través del portal *Weather Wunderground*.

Tabla 11. Principales valores del modelo energético para el estado actual de MMU de la colonia Modelo

Parámetro	Valor
Densidad de ocupación	0.016 personas/m ²
Ganancias por ocupación	2.16 W/m ²
Periodos de ocupación	Día de semana 12- 9am, 4 pm-12 am / Fin de semana: encendido
Consigna de calefacción	18°C
Período de calefacción	Encendido 24/7
Consigna de refrigeración	25°C
Periodo de refrigeración	Encendido 24/7
Ventilación natural	No
Tasa de infiltración	0.5 ren/h
Tipo de muro y transmitancia	Block de concreto/enjarres exteriores a base de mortero de cemento / enjarres interiores de yeso - W/m ² K = 3.615
Tipo de losa y transmitancia	Losa de vigueta y casetón-W/m ² K = 0.72
Absortancia térmica	0.6
Absortancia solar	0.6
Porcentaje de acristalamiento	20%
Tipo de acristalamiento y transmitancia	Vidrio sencillo de 6 mm -5.78 W/m2K
Protecciones solares	Ninguna
Modelo de Cielo	Cielo difuso simple
Periodo de Simulación	29 de junio al 1 de mayo

Fuente: Elaboración propia.

Fueron obtenidos los valores de temperatura superficial por simulación de las 9 fachadas previamente seleccionadas en sitio. Se muestran los resultados comparativos para cada una de ellas, obteniéndose un valor promedio de diferencia de 1.7°C, lo cual sugiere una aproximación positiva entre la simulación en la herramienta y la obtenida en sitio. El cálculo está limitado por el número de variables introducidas en la herramienta y el nivel de detalle con el que se maneja (ver tabla 12).

Tabla 12. Comparación de Temperatura Superficial °C entre toma en sitio y resultado de la herramienta de simulación para la MMU de la colonia Modelo

		1 Oeste - Esq. Norte			2 Oeste - Esq. SO				
Hora	In-situ	DB	Dif.	In-situ	DB	Dif.			
08:00 a. m.	27.3	25.81	1.5	25.5	25.65	0.2			
01:00 p. m.	38.3	34.10	4.2	35.6	35.83	0.2			
06:00 p. m.	54.5	47.04	7.5	44	46.95	2.9			
3 Sur - Esq. SO			4 Sur			5 Sur- Esq. SE			
Hora	In-situ	DB	Dif.	In-situ	DB	Dif.	In-situ	DB	Dif.
08:00 a. m.	26.5	25.3	1.2	25.7	25.97	0.269	26.5	25.29	1.2
01:00 p. m.	37.4	35.1	2.3	33.5	32.82	0.68	37.5	35.19	2.3
06:00 p. m.	34.3	35.0	0.7	33.9	38.86	4.96	36.9	34.86	2.0
6 Este - Esq. SE				7 Este - Esq. NE					
Hora	In-situ	DB	Dif.	In-situ	DB	Dif.			
08:00 a. m.	31.2	31.14	0.058	34.8	31.14	3.7			
01:00 p. m.	35.8	35.31	0.490	38.2	35.31	2.9			
06:00 p. m.	35.1	34.05	1.051	35.7	34.05	1.7			
8 Norte			9 Norte - Esq.NO						
Hora	In-situ	DB	Dif.	In-situ	DB	Dif.			
08:00 a. m.	25.7	25.97	0.3	26.2	26.39	0.2			
01:00 p. m.	33.5	32.82	0.7	33.2	33.20	0.0			
06:00 p. m.	36.7	38.86	2.2	38	39.14	1.1			

Fuente: Elaboración propia.

0.6	DIF. MIN.
1.7	DIF. PROM.
3.1	DIF. MIN.

En la segunda etapa correspondiente a la evaluación energética, se realizan los cálculos referentes al comportamiento energético de las viviendas dentro de los escenarios propuestos en la MMU utilizando el motor de cálculo *EnergyPlus* y la interfaz *Design Builder* para obtener la Intensidad de Uso de Energía anual. Dichas cuantificaciones deberán contemplar a su

vez periodos anuales totales y mensuales. Por orientaciones: norte, noreste, este, sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste, y en valores máximos, mínimos y promedios. De nuevo, se recomienda documentar la información a manera de fichas dentro de hojas de cálculo por tipo de escenario y muestra.

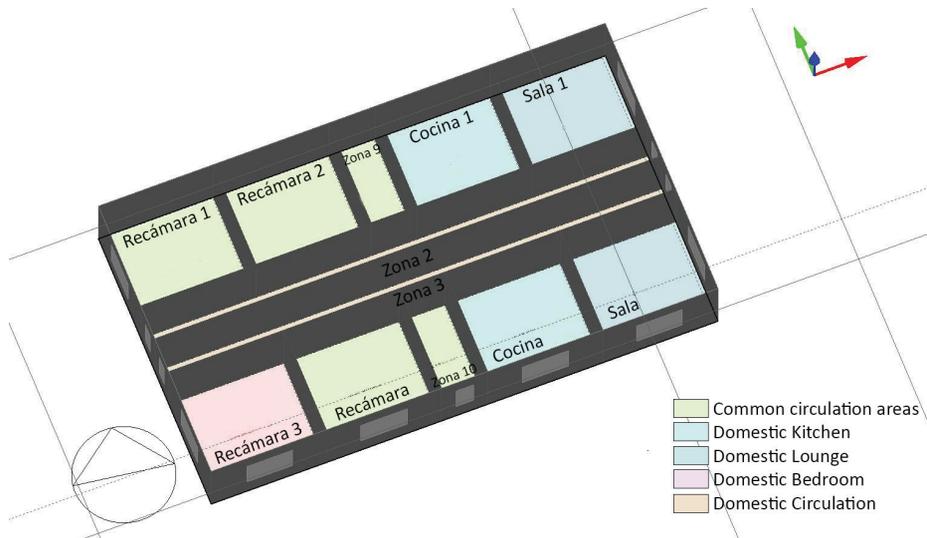
La evaluación energética de los escenarios consideró los siguientes criterios:

Clima. Para la simulación, se utilizó el archivo EPW original (nombre del archivo: MEX_SON_Hermosillo-Garcia.Intl.AP.761600_TMYx.2004-2018) para la ciudad de Hermosillo obtenida del repositorio de datos climáticos *Climate One Builing Org.*

Edificios. El detalle de modelado considerado representa las zonas térmicas de mayor importancia en un porcentaje de distribución de: recámaras 34%, aseo 7%, cocina 17%, área de estar 17% y circulaciones o servicios 24%. Se utilizaron los valores de cargas térmicas predeterminadas del software sin considerar equipos de oficina (ver figura 19).

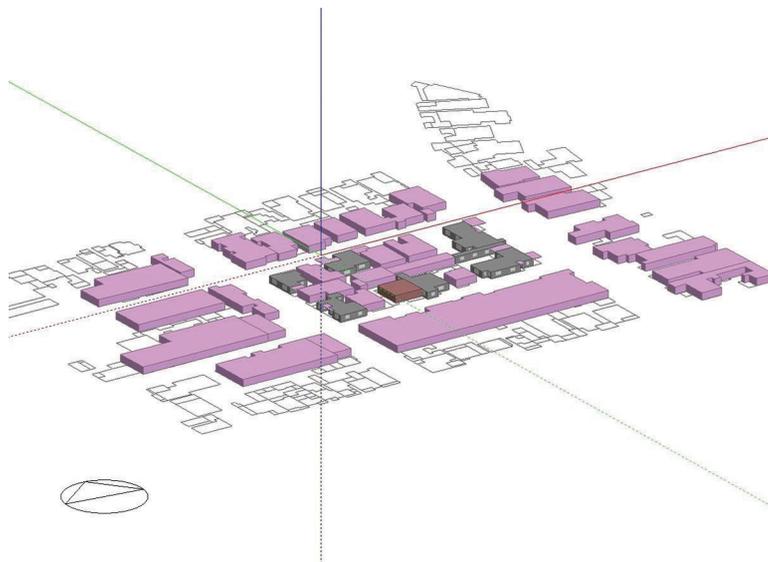
Entorno. Fue modelado utilizando la herramienta “bloque de componente” tipo estándar, cuya geometría sólo interfiere en el cálculo de sombreado y no forma parte del panel de resultados de las simulaciones.

Figura 19. Ejemplo de zonificación interior para escenarios de análisis de la MMU de la colonia Modelo en el Software Desing Builder



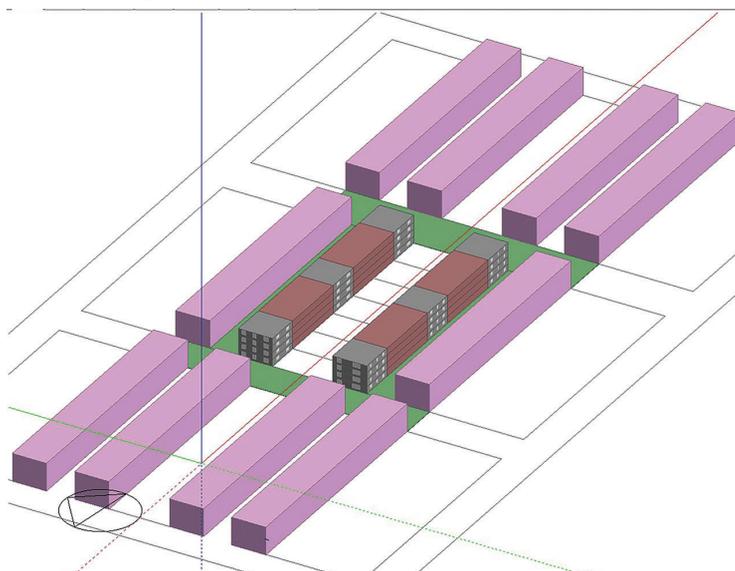
Fuente: Elaboración propia.

Figura 20. Modelado de bloques de edificios y contexto para escenario existente de la muestra de morfología urbana (MMU) de la colonia Modelo



Fuente: Elaboración propia en interfaz Design Builder.

Figura 21. Ejemplo de modelado de bloques de edificios y contexto para escenario densificado B2 de la muestra de morfología urbana (MMU) de la colonia Modelo



Fuente: Elaboración propia en interfaz Design Builder.

Tabla 13. Valores de parámetros de simulación para evaluación de escenarios de la MMU de la colonia Modelo

Parámetro	Valor
Densidad de ocupación	0.016 personas/m ²
Ganancias por ocupación	2.16 W/m ²
Periodos de ocupación	Día de semana 12-9am, 4pm-12 am / Fin de semana: encendido
Consigna de calefacción	18°C
Período de calefacción	Encendido 24/7
Consigna de refrigeración	25°C
Período de refrigeración	Encendido 24/7
Ventilación natural	No
Tasa de infiltración	0.5 ren/h
Tipo de muro y transmitancia	Block de concreto/enjarres exteriores a base de mortero de cemento / enjarres interiores de yeso - W/m ² K = 3.615
Tipo de losa y transmitancia	Losa de vigueta y casetón-W/m ² K = 0.72
Absortancia térmica	0.6
Absortancia solar	0.6
Porcentaje de acristalamiento	20%
Tipo de Acristalamiento y Transmitancia	Vidrio sencillo de 6 mm -5.78 W/m ² K
Protecciones solares	Ninguna
Modelo de Cielo	Cielo difuso simple
Período de Simulación	Mensual y Anual

Fuente: Elaboración propia.

Se modelaron únicamente los edificios en un contexto inmediato y no se tomó en cuenta vegetación o pavimentos (ver figura 20 y figura 21).

Actividad. Se utilizaron las plantillas precargadas del software, según el tipo de área en la zona para facilitar la modelación de los edificios. Cabe recordar que dichas consideraciones fueron aplicadas en todos los niveles, de todos los bloques de edificios y en todos los escenarios:

- Cocina: Dwell_DomKitchen:Occ
- Recámaras: Dwell_DomBed_Occ
- Baños, áreas comunes: Dwell_DomCommonAreas_Occ
- Circulaciones: Dwell_DomCirculation_Occ

Otros parámetros. De igual manera, se utilizaron los valores predeterminados, según el tipo de zona, para definir la programación del uso de refrigeración y calefacción. La refrigeración considera como combustible electricidad, mientras que la calefacción considera gas natural. Otros con-

sumos, como iluminación y el sistema de agua caliente sanitaria, consideran un consumo uniforme según el tipo de zona. Se excluye, además, el uso de sistemas pasivos como ventilación natural. La tabla anterior (13) muestra un resumen de los valores introducidos dentro del Software para la simulación de los escenarios.

Resultados

Los resultados que a continuación se presentan muestran los datos obtenidos de las simulaciones hechas para los escenarios antes diseñados, para densificación de la colonia modelo dentro de la Muestra de Morfología Urbana MMU descrita anteriormente. En los primeros resultados se analizan los valores totales anuales de Intensidad de Uso de Energía IUE en el uso de refrigeración y calefacción, para después compararlos con los parámetros morfológicos identificados en esta investigación: COS, CUS, y parámetros morfológicos (Vol./Lot, H/W, Fach/Lot y Fach/Const). Para el cálculo de ahorro se toma como punto de referencia los resultados obtenidos del escenario E.

Intensidad de Uso de Energía

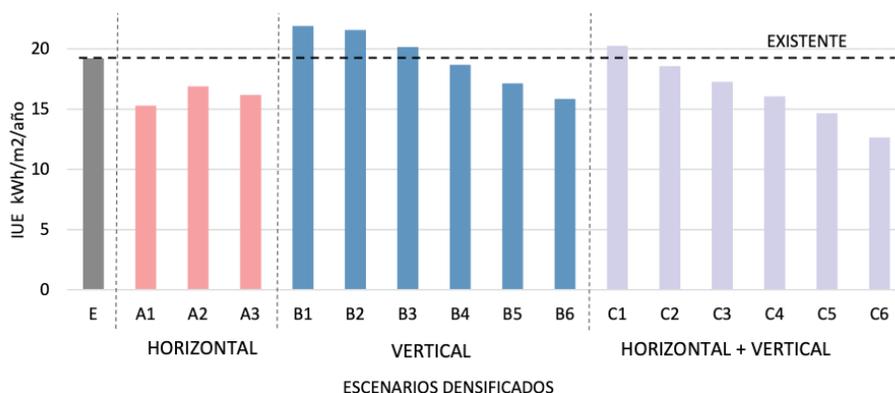
Este valor es el resultado de las simulaciones hechas a través de la interfaz *Design Builder*, para los escenarios existentes y densificados de la MA de la colonia Modelo. La siguiente tabla muestra un resumen comparativo de los valores de Intensidad de Uso de Energía y el ahorro en consumo, desglosados por escenario y tipo de consumo final (calefacción y refrigeración), los cuales fueron obtenidos mediante los valores de consumo total anual de cada escenario, dividido entre los metros cuadrados de construcción considerados en el modelo. De los quince escenarios densificados, 11 de ellos mostraron valores positivos de ahorro con respecto al escenario existente, logrando hasta un 34.2% en el escenario con mayor densificación (C6). Mientras que el valor negativo menor llega a un 14% (B1), en el escenario vertical de dos niveles.

Tabla 14. Intensidad de Uso de Energía (IUE) y Emisiones de CO₂ anual en escenarios A, B y C de la Muestra de Morfología Urbana (MMU) de la colonia Modelo

		Intensidad de Uso de Energía kWh / m ² /año			
		Calefacción	Refrigeración	Total	Ahorro %
		kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	
EXISTENTE	E	1.54	17.67	19.21	0.00
A (Horizontal)	A1	2.6	12.6	15.3	20.4%
	A2	1.4	15.5	16.9	12.1%
	A3	1.4	14.8	16.2	15.8%
B (Vertical)	B1	1.2	20.7	21.9	-14.0%
	B2	1.0	20.5	21.6	-12.3%
	B3	1.1	19.0	20.1	-4.9%
	B4	1.3	17.4	18.7	2.8%
	B5	1.6	15.6	17.1	10.8%
	B6	1.8	14.0	15.8	17.5%
C (Horizontal + Vertical)	C1	1.1	19.1	20.2	-5.4%
	C2	0.9	17.7	18.6	3.3%
	C3	1.0	16.2	17.3	10.1%
	C4	1.3	14.8	16.1	16.4%
	C5	1.5	13.1	14.7	23.6%
	C6	1.8	10.9	12.6	34.2%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 22. Intensidad de Uso de Energía (EUI) anual por escenario densificado de la MMU de Colonia Modelo



Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de la intensidad de uso de energía en un año típico se muestra en la figura 22. Al igual que el caso anterior analizado, existe una tendencia de reducción en ambos casos a medida que la densificación aumenta. En la densificación horizontal (A), la reducción se encuentra en todos los casos (A1, A2, y A3). La densificación vertical muestra una reducción a partir del escenario B4 (ocho niveles). Y en el escenario C, la reducción se muestra a partir del escenario C2, alcanzando un máximo de reducción de un 18% en su escenario de mayor densificación.

El uso de refrigeración, el cual resulta ser el ahorro de energía más significativo, muestra mayores reducciones en los escenarios A1, C5, y C6 comparado con el escenario existente. En todos los escenarios de densificación horizontal, existe un ahorro significativo, mientras que en los primeros tres escenarios de densificación vertical (B1, B2 y B3) y en el primer escenario de densificación horizontal más vertical (C1), se muestran aumentos en el consumo de energía.

Tabla 15. Diferencia y ahorro entre IUE anual por escenario densificado en la MA de la colonia Modelo

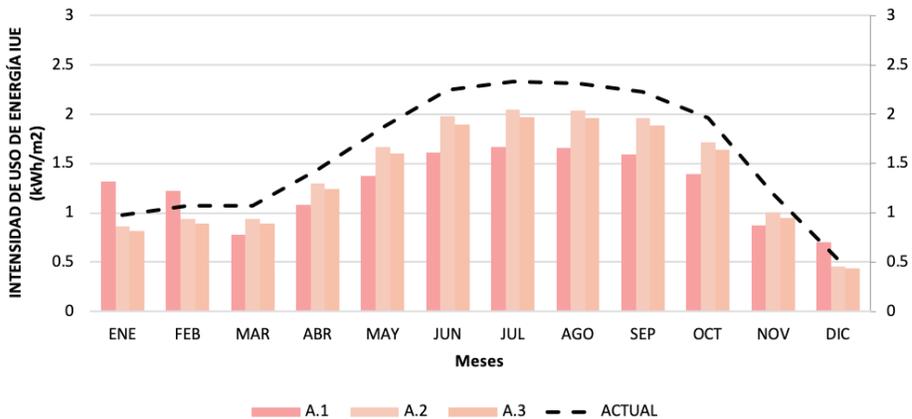
		IUE Refrigeración kWh/m ² año	Ahorro %			IUE Calefacción kWh/m ² año	Ahorro %
EXISTENTE	E	17.67	0%	EXISTENTE	E	-	0%
A	A1	12.6	28%	A	A1	2.6	-72%
	A2	15.5	13%		A2	1.4	7%
	A3	14.8	16%		A3	1.4	9%
B	B1	20.7	-17%	B	B1	1.2	23%
	B2	20.5	-16%		B2	1.0	33%
	B3	19.0	-8%		B3	1.1	27%
	B4	17.4	2%		B4	1.3	14%
	B5	15.6	12%		B5	1.6	-2%
	B6	14.0	21%		B6	1.8	-18%
C	C1	19.1	-8%	C	C1	1.1	28%
	C2	17.7	0%		C2	0.9	44%
	C3	16.2	8%		C3	1.0	34%
	C4	14.8	16%		C4	1.3	16%
	C5	13.1	26%		C5	1.5	1%
	C6	10.9	39%		C6	1.8	-16%

Fuente: Elaboración propia.

Como lo muestran las gráficas anteriores, el uso de aire acondicionado se reduce hasta en un 39% (escenario C) en los escenarios más densificados en comparación al escenario existente. Si se analizan por separado, a mayor densificación, menor es el valor de la intensidad de consumo para este apartado. En el caso del uso de la calefacción, se observa un aumento en los escenarios de mayor densificación del escenario B y C sin superar el 18% (ver tabla 15).

La figura 23 muestra el comportamiento promedio mensual de la IUE durante el año. En promedio, los meses de diciembre, febrero y marzo muestran una menor intensidad de consumo, mientras que el periodo de junio a septiembre tiene una carga mayor de intensidad relacionado al uso de aire acondicionado.

Figura 23. IUE Promedio Mensual MMU Colonia Modelo-Escenarios A



Fuente: Elaboración propia.

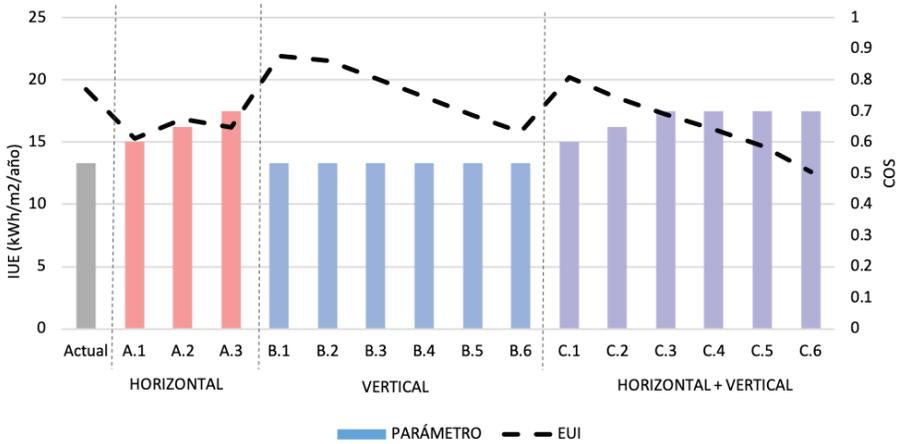
Intensidad de uso de energía y parámetros morfológicos

En este apartado, se muestran los análisis de las simulaciones para los escenarios densificados desde la perspectiva paramétrica seleccionada. El objetivo sigue siendo el observar la relación de la intensidad del consumo de energía y dichos valores.

Coeficiente de ocupación y utilización

La relación del valor COS y la IUE se muestra inversa en los escenarios que incluyen una densificación horizontal (aumento de valor COS). Mientras que en los escenarios con densificación sólo vertical (escenario B), la relación no es constante. El coeficiente de determinación R2 se muestra bastante bajo con un valor de 0.42 (ver figuras 24 y 25).

Figura 24. Relación entre IUE y COS por escenarios MMU Colonia Modelo

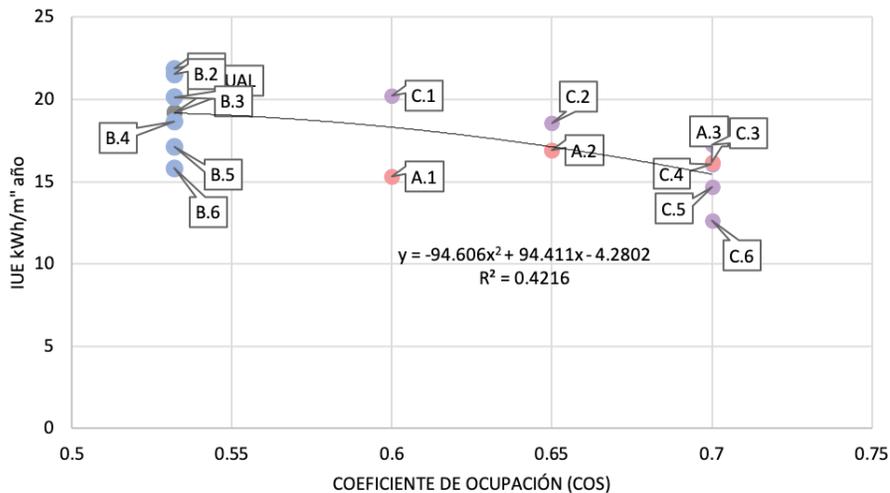


Fuente: Elaboración propia.

Como lo muestran los siguientes figura 26 y figura 27, la relación entre el valor del parámetro del coeficiente de utilización CUS y la IUE muestran una mejor relación inversa que el valor COS. A mayor valor CUS, menor es la intensidad del consumo de energía en todos los escenarios densificados. De igual forma, el factor de determinación tiene una R2 de 0.58, mayor que el coeficiente resultante del coeficiente de ocupación.

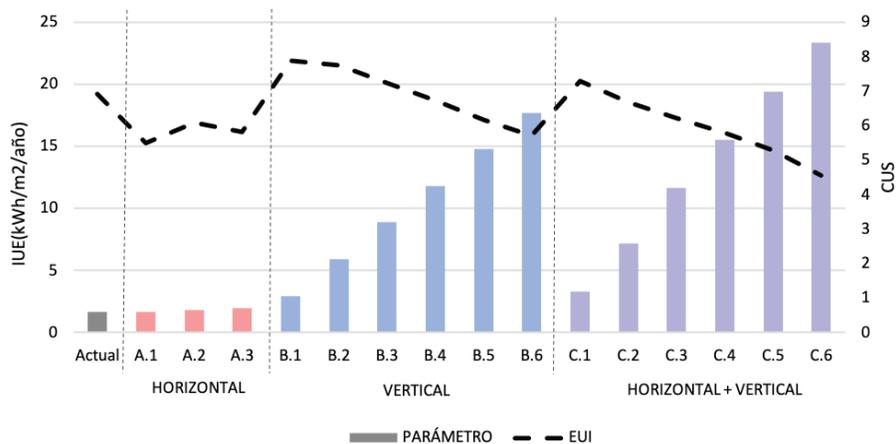
La figura 28 muestra la diferencia de intensidad de consumo entre los escenarios densificados y el escenario existente normalizado. Aquellos escenarios con mayor valor de intensidad de COS y CUS, muestran diferencias en ahorro mayores a las que sólo densifican en un solo sentido.

Figura 25. Línea de tendencia comparativa entre IUE y COS, MMU colonia Modelo



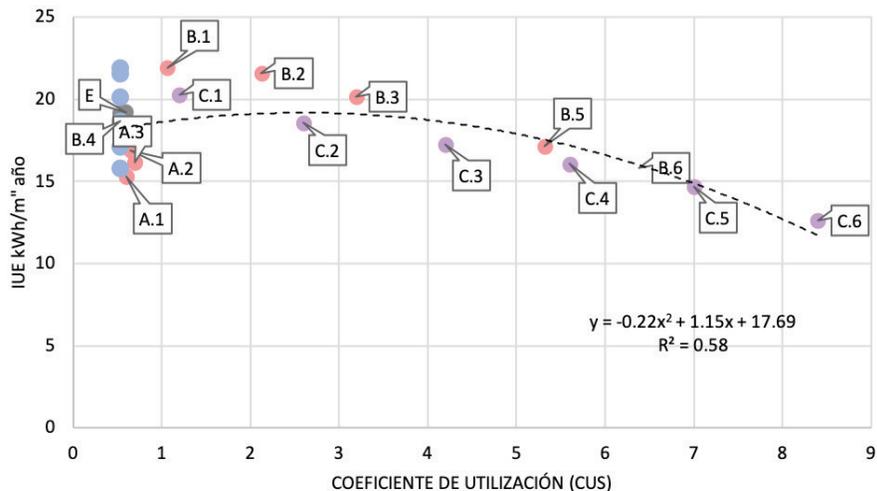
Fuente: Elaboración propia.

Figura 26. Relación entre IUE y CUS por escenarios MMU colonia Modelo



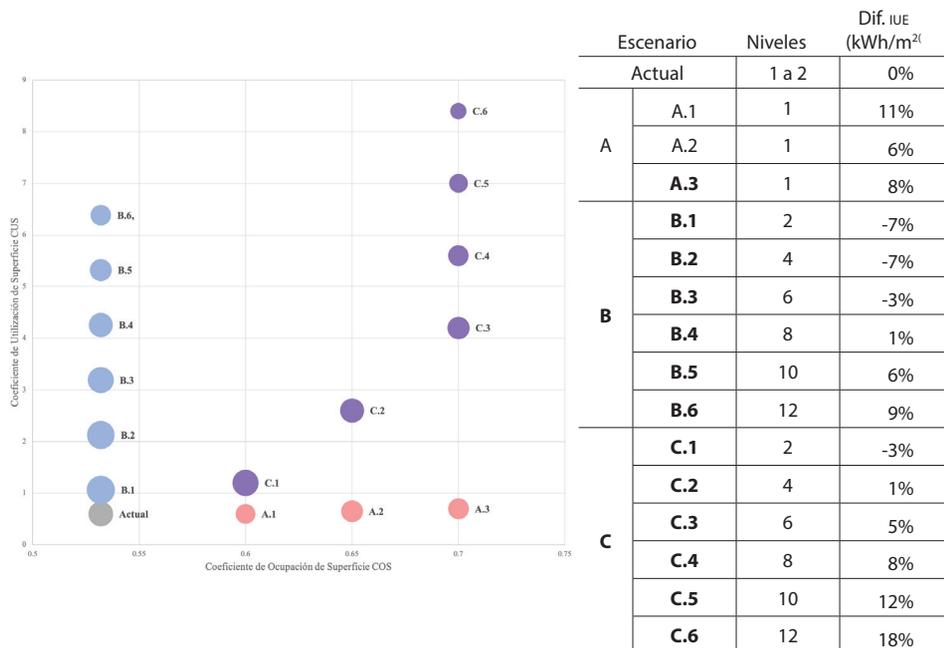
Fuente: Elaboración propia.

Figura 27. Línea de tendencia comparativa entre IUE y CUS, MMU colonia Modelo



Fuente: Elaboración propia.

Figura 28. Comparativo de Intensidad de Uso de Energía anual en escenarios A, B y C, cos y cus de la MMU colonia Modelo



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Conocer el contexto histórico y los antecedentes del surgimiento de la ciudad de baja densidad permite comprender la disposición de la población a habitar en diferentes modalidades urbanas. De vivir en ciudades generalmente compactas, la idea grandiosamente comercializada de la ciudad jardín de Le Corbusier y los suburbios americanos, el crecimiento de las urbanizaciones tiende ahora a la dispersión, con rangos mucho menores de habitantes por superficie, y que traen consigo una serie de consecuencias generalmente negativas en ciudades de países en vías de desarrollo. La sectorización y las dificultades para proveer seguridad e infraestructura, demerita la calidad de las urbes, trayendo consigo nuevos cuestionamientos y propuestas de planificación urbana.

De acuerdo con las recomendaciones de densidades según los programas locales consultados, los escenarios B. 2 y B. 3 (densificación horizontal), así como los C. 2 y C. 4 (densificación combinada) ofrecen la cantidad de viviendas más aproximadas. Sin embargo, sólo los escenarios B3, B4 y C3 muestran ahorro en el consumo energético, particularmente, durante la época de verano.

En las densificaciones menos intensas se observa una disminución poco pronunciada en el consumo de energía, comparado con las mayores densidades, ya que las ganancias de calor a través de muros no logran compensarse con la disminución de pérdida de calor a través de los suelos.

Las densificaciones medias a mayores logran un mejor rendimiento debido a la disminución de ganancias térmicas a través de su envolvente (muros y cubiertas) y a la sombra proyectada entre edificaciones.

De los parámetros morfológicos analizados, el que muestra mayor impacto sobre el consumo energético fue: Coeficiente de utilización (CUS).

Finalmente, se destaca que los escenarios analizados representan sólo una pequeña fracción de la “casi infinita” combinación de diferentes contextos climáticos, geometrías urbanas y objetivos o intenciones de diseño, por lo que este estudio no pretende ser una propuesta de solución urbano-arquitectónica para Hermosillo, sino expandir el conocimiento sobre el tema

y aportar información que pudiera incidir sobre la reglamentación urbana correspondiente.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo a la formación académica.

Bibliografía

- Baker, N. y Steemers, K. (2002). *Daylighting*. Hong Kong: James & James.
- Centro Mario Molina (2016). *Libro de Química. Programa en educación en cambio climático*. México D.F.: <https://centromariomolina.org/libro/libros/LibrodeQuimica/156/>.
- Fisk, W. J. (2000). Health and Productivity Gains from Better Indoor Environments and their Relationship with Building Energy Efficiency. *Annual Review of Energy and the Environment*, 537-566. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.537>.
- Gaceta Oficial de la Ciudad de México* (19 de abril de 2021). Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. La Asamblea de Representantes del Distrito Federal, en ejercicio de la facultad que le confiere el Artículo 73, Fracción VI, Base Tercera, Inciso A, de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
- Instituto Nacional de Infraestructura Física Educativa (2011). Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones (Vol. 3, Tomo I.). Gobierno de México.
- Mead, M. N. (2008). Benefits of Sunlight: A Bright Spot for Human Health. *Environmental Health Perspectives*, 116(4), 116-160. <https://doi.org/10.1289/ehp.116-a160>.
- Munguía Sánchez, L. (2002). *La luz en la Arquitectura. Su influencia sobre la salud de las personas. Estudio sobre la variabilidad del alumbrado artificial en oficinas* [Tesis de Doctorado]. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Rodríguez Viqueira, M., Figueroa Castrejon, A. y Fuentes Freixanet, V. (2001). *Introducción a la arquitectura bioclimática*. Mexico: Limusa.
- Secretaría de Energía (2014). Norma Oficial Mexicana, Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en edificios no residenciales. *NOM-007-ENER-2014*.
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social (2008). Condiciones de Iluminación en los Centros de Trabajo. *NOM-025-STPS-2008*.
- Serra Florensa, R. (1999). *Arquitectura y Climas (GG Basicos)*. Barcelona: Gustavo Gili.

Capítulo 3. Influencia en las demandas energéticas para vivienda residencial en clima cálido seco, en función de los materiales y sistemas constructivos

CARLOS EDUARDO QUIJADA GONZÁLEZ*

ANA CECILIA BORBÓN ALMADA**

GEMA KARINA IBARRA TORÚA***

JESÚS QUINTANA PACHECO****

ARMANDO AYALA CORONA*****

Resumen

Las características termo-físicas de los materiales y sistemas constructivos tienen una gran influencia en el comportamiento térmico de los edificios, así como el clima donde están emplazados. La Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011 limita la ganancia de calor en edificios residenciales para la República Mexicana, con el objetivo de fomentar el ahorro de energía eléctrica consumida por aire acondicionado en clima cálido, y de reducir los impactos ambientales por el uso excesivo de energía, así como con el objetivo de asistir en el proceso de diseño de las edificaciones de uso residencial y ayudar a tomar decisiones para revisar y proyectar edificios energéticamente eficientes. En el presente estudio se aplicó esta norma, para evaluar el cumplimiento en un grupo de viviendas de tipo Residencial Plus, ubicadas en la ciudad de Hermosillo, Sonora, para dos tipologías (A y B),

* Maestro en Ingeniería Urbana con Opción en Construcción. Departamento de Ingeniería Civil y Minas en la Universidad de Sonora, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9959-5934>

** Doctora en Ciencias. Departamento de Ingeniería Civil y Minas en la Universidad de Sonora, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7781-2571>

*** Doctora en Ciencias. Departamento de Ingeniería Civil y Minas en la Universidad de Sonora, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6130-9640>

**** Doctor en Gestión y Valoración Urbana. Departamento de Ingeniería Civil y Minas en la Universidad de Sonora, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1797-6213>

***** Doctor en Ciencias en Ingeniería Industrial. Departamento de Física en la Universidad de Sonora, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9744-1520>

cuyas diferencias están basadas en el tipo de materiales y sistemas constructivos que influyen en su comportamiento térmico. Una vez obtenido el grupo de prueba, se aplicó la herramienta con base en el proyecto ejecutivo de cada tipología, en un análisis de la envolvente que incluye muros, techos, ventanas y puertas, tomando en cuenta los sistemas constructivos del proyecto, así como las propiedades de los materiales de construcción, ubicando los inmuebles en clima cálido seco, considerando casas de dos niveles y todas las orientaciones.

Los resultados muestran el cumplimiento para la tipología A, donde se muestran porcentajes de ahorro que van del 24% hasta el 34%, dependiendo de la orientación. Para el caso de la tipología B, no se cumple con esta norma, ya que los resultados muestran valores negativos en el porcentaje de ahorro, debido a las propiedades térmicas de los sistemas constructivos.

Palabras clave: *Ahorro energético, eficiencia energética, normatividad, sistemas constructivos, vivienda.*

Abstract

The thermo-physical characteristics of materials and construction systems have a great influence on the thermal behavior of buildings as well as the climate where they are located. The Official Mexican Standard NOM-020-ENER-2011 limits heat gain in residential buildings for the Mexican Republic with the aim of promoting the saving of electrical energy consumed by air conditioning in hot weather and reducing environmental impacts due to excessive use of energy, as well as assisting in the design process of buildings for residential use and helping to make decisions to review and project energy efficient buildings. In the present study, this standard was applied to evaluate compliance in a group of Residential Plus type dwellings, located in Hermosillo city, Sonora State, for two typologies (A and B), whose differences are based on the type of materials and construction systems that influence their thermal behavior. Once the test group was obtained, the tool was applied based on the executive project of each typology in an analysis of the envelope that includes walls, ceilings, windows and doors, taking into

account the construction systems of the project, as well as the properties of construction materials, locating the houses in a dry hot climate, with two levels and all orientations. The results show compliance for typology A, where savings percentages ranging from 24% to 34% depending on the orientation are shown. In the case of typology B, this standard is not met, since the results show negative values in the percentage of savings, due to the thermal properties of the construction systems.

Keywords: Energy saving, energy efficiency, regulations, construction systems, housing.

Introducción

Debido al constante agotamiento de recursos energéticos no renovables en México y en el mundo, se han desarrollado esfuerzos por parte de organismos mexicanos de gobierno que intentan ofrecer alternativas para generar reducción en los consumos de energía eléctrica en diversos sectores, como lo son, el industrial, de transporte y de edificios. Para el caso de la vivienda en México, específicamente, los organismos como el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE) y la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEEE) han tratado de implementar la Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001-Eficiencia Energética en Edificaciones-Envolvente de Edificios no Residenciales y también la Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011-Eficiencia energética, en edificaciones-envolventes de edificios para uso habitacional, que establecen los límites de las demandas de energía en edificios. Lo anterior va encaminado a lograr la comodidad térmica de sus ocupantes con el mínimo consumo de energía eléctrica. Varias de estas estrategias han tratado de ser aplicadas en México, pero no han sido del todo eficaces como para obligar a que se utilicen diseños, orientaciones y materiales adecuados en la construcción para su cumplimiento.

En consecuencia, al no aplicar estrategias de acondicionamiento ambiental y entre ellas materiales más adecuados en la envolvente, existe un alto consumo de energía eléctrica en zonas con climas cálidos, debido a la climatización artificial que se requiere para mantener la edificación dentro de una zona de confort térmico. En regiones extremadamente cálidas, especialmente en las zonas norte y costeras del país, se presentan temperaturas bastante elevadas en verano, lo cual hace que la edificación sufra grandes acumulaciones de carga térmica, para lo cual la mayoría de ellas no están protegidas para adaptarse a las condiciones climáticas locales. Debido a que la región donde están ubicadas las viviendas en estudio está en una zona de alta radiación solar; se presenta un aumento en la temperatura interior de las edificaciones, debido a la baja resistencia térmica de los materiales (Borbón *et al.*, 2010) (Pérez *et al.*, 2011) con que éstas se construyen y sin la correcta aplicación de las normas energéticas en México.

En el ámbito de la edificación, existen algunas variables que se deben considerar para el estudio de la respuesta térmica del edificio debido al embate del medio ambiente exterior, como lo son, entre otras, el clima y el tipo de material empleado para la construcción de muros y techos.

En las edificaciones, la mayor parte de transferencia de calor se da por el techo, debido a la gran irradiación solar directa sobre la superficie (Lucero *et al.*, 2016), sin embargo, los muros también contribuyen de manera importante al calentamiento interior. Cabe mencionar que, en México, los techos que se fabricaban para vivienda en serie en zonas urbanas, tradicionalmente eran a base de concreto armado en la mayoría de las construcciones. En las últimas décadas, en algunas regiones del país, estos se han modificado a sistemas aligerados de vigueta y bovedilla o de poliestireno expandido. Estos sistemas constructivos además de aligerar la carga muerta presentan ventajas para construir en tiempo y costo, además de que el aligeramiento de los materiales o el uso de aislantes ha propiciado que estas cubiertas tengan mejora en sus propiedades térmicas. En cambio, los muros, no han tenido variaciones en su sistema constructivo base durante décadas. La mayoría de los muros construidos en viviendas urbanas mexicanas son a base de materiales de arcilla recocida o bloque de concreto vibropresado, cuyas propiedades aislantes no son suficientes cuando están en contacto con el exterior.

Con el conocimiento de las propiedades térmicas de los materiales se pueden establecer criterios adecuados para el uso de materiales de construcción en función del clima, por lo que los estudios de estas propiedades ofrecerían opciones de mejora en los sistemas constructivos.

El objetivo del presente trabajo es determinar la influencia en las demandas energéticas de un grupo de viviendas con tipología residencial plus, ubicadas en clima cálido seco —considerando como principal variable los materiales y sistemas constructivos, mediante la aplicación del método de cálculo de la NOM-020-ENER-2011— y verificar su cumplimiento.

El proyecto se realizó utilizando la herramienta de cálculo basado en esta norma, desarrollada por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), que a su vez depende de la Secretaría de Energía (SENER), con la cual se podrá conocer el presupuesto energético del edificio proyectado (edificio en estudio) y del edificio de referencia (edificio

ficticio) que genera el simulador de manera automática como caso base para realizar la comparación, ingresando los datos de la envolvente térmica del edificio proyectado. Dicha norma fue realizada con el fin de mejorar el diseño térmico de las edificaciones que se encuentren en el ámbito habitacional, limitando la ganancia de calor por medio de la envolvente. Su campo de acción es para todos los edificios nuevos y existentes, así como para ampliaciones.

Planteamiento del problema

Las emisiones producidas por la utilización de combustibles fósiles, para la satisfacción de la creciente demanda de energía a nivel global, está llevando al planeta a un cambio climático con repercusiones negativas. Es por lo anterior que, en la actualidad, existe una gran preocupación por el uso eficiente de energía en los sectores industrial, de transporte y de edificios, tanto para combatir el impacto negativo que se genera al medio ambiente, como para subsanar aspectos del confort térmico humano y aspectos económicos del consumo eléctrico; resultando prioritaria la concientización de buenas prácticas en todos los ámbitos. Para el sector de edificios, destaca incentivar el uso correcto de instalaciones y de los materiales de la envolvente.

La Tierra se ha calentado alrededor de 0.74 grados centígrados en los pasados 100 años. De continuar esta tendencia, para el año 2100, el planeta se calentaría alrededor de 1.8 a 4.0 grados centígrados, causando con ello el incremento del nivel del mar, los patrones de lluvia y afectando los eventos climáticos como las ondas de calor, las lluvias torrenciales y las sequías (Conde, 2011).

El ambiente promedio anual de temperaturas en la República Mexicana, es de entre 5°C a 35°C. Los estados con altas temperaturas anuales desde 23°C a 26°C o superior a 26°C se encuentran en las costas del noreste, este y sureste.

Actualmente, el uso de sistemas de climatización artificial para vivienda residencial, en zonas de clima cálido, es indispensable, puesto que las altas temperaturas que se registran en el verano generan un marcado incremento

de consumo eléctrico en comparación a una ciudad con características climáticas diferentes.

Aunado a lo anterior, los sistemas constructivos de las edificadoras de viviendas, en México, no han sufrido cambios significativos en volumen de producción en beneficio de la envolvente térmica. Se continúa la edificación con los mismos materiales y procedimiento constructivos de hace décadas.

Por todo lo anterior, el desarrollo del presente trabajo tendrá como resultado, conocer cuantitativamente la influencia que los materiales y sistemas constructivos ejercen en este análisis, poniendo especial atención a las propiedades térmicas de los materiales y la geometría de los sistemas constructivos. Se utilizarán datos de los proyectos ejecutivos de las viviendas existentes, con una ubicación de clima cálido seco en la ciudad de Hermosillo, Sonora, considerando ubicación, orientación, dimensiones y elementos constructivos, así como las propiedades de los materiales, componentes y sistemas constructivos.

Normatividad energética para vivienda en México

La Normatividad Mexicana fue establecida en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización. En esta acción se establecen una serie de normas, las cuales conforman características, especificaciones, estándares y reglas en la producción que deben cumplir los bienes, servicios y procesos en una determinada área o sector salud, agua, energético, trabajo y previsión social, entre muchos otros, en lo extenso del territorio mexicano (Congreso de los Estados Unidos Mexicanos, 2009).

Dichas normas se dividen en dos tipos: las Normas Oficiales Mexicanas, mismas que son comúnmente llamadas NOM, y las Normas Mexicanas, llamadas NMX. Existe una diferencia entre estos dos tipos de normas y consiste en que las NOM son de uso obligatorio, mientras que las NMX son recomendaciones de procedimientos y puede o no aplicarse su uso.

Todas estas normas fueron creadas con el objetivo de que las dependencias, a lo largo del territorio mexicano, regularizaran los estándares de los productos y servicios que deben cumplir determinados sectores; lo anterior,

con la finalidad de asegurar la protección de la vida, su seguridad y la conservación del medio ambiente.

A través del *Diario Oficial de la Federación* pueden ser consultadas las NOM que son publicadas recientemente, y las publicadas con anterioridad se pueden consultar vía web en su página oficial.

Tanto la NOM-020 como la NOM-008, son parte de la normatividad que existe en México para evaluar la demanda energética en los edificios residenciales y no residenciales respectivamente, pero, además, existe la NMX-C-460-ONNCCE-2009 que es una norma mexicana no obligatoria, cuyo método de cálculo se aplica para evaluar-limitar los valores de resistencia térmica de los sistemas constructivos por metro cuadrado, de acuerdo con la zona térmica donde se encuentre ubicado el edificio. Es muy importante para la aplicación de estas normas conocer las propiedades de los materiales, y de manera especial la conductividad térmica que es la variable que determina la capacidad que tienen los materiales de transmitir calor por conducción. Además, debe tenerse información precisa de la composición de los sistemas constructivos a analizar, tanto en sus características de forma y disposición en la geometría del sistema constructivo.

La envolvente térmica y técnicas de evaluación

Existen importantes investigaciones y herramientas cuyo objetivo en particular es mejorar el diseño y la construcción de edificaciones sustentables. A continuación, se describe una serie de trabajos con características similares, que sirven de referencia para el desarrollo de este proyecto.

La eficiencia energética en edificaciones, se relaciona con la implementación de estrategias de adecuación ambiental que pueden ser pasivas, como es el caso del control de asoleamiento, aislamiento térmico, ventilación natural y las estrategias activas, como son los dispositivos de generación, almacenamiento y conversión de la energía (Ionescu *et al.*, 2015).

Los elementos, que toma en cuenta el análisis que realiza la norma con respecto al edificio, están relacionados con estrategias pasivas y básicamente son referenciados a la envolvente orientación y generación de sombras. Uno de los aspectos más relevantes, y que impactan de manera importante

en la aplicación de la norma, es lo que se refiere a la envolvente en el sentido de los materiales de que está compuesta y las propiedades que estos tienen, así como la composición geométrica de los elementos. Para esto es necesario conocer las características termo-físicas de materiales y sistemas constructivos.

Una de las propiedades físicas que definen este comportamiento es la conductividad térmica que, de acuerdo a las dimensiones de los elementos, puede determinar la resistencia térmica por metro cuadrado de los elementos. En un estudio experimental para un muro de bloques de concreto con cavidades, se estimó la resistencia térmica del material para condiciones de temperaturas extremas de verano, donde el muro presenta valores de resistencia térmica variables debido a la cavidad, y que tienden a disminuir con el aumento de los diferenciales de temperatura, lo cual es poco favorable al uso en climas cálidos. Estos valores quedaron expresados en un rango de 0.13 y 0.17 W/m K. (Borbón *et al.*, 2010). Estos resultados fueron muy similares a los obtenidos por Vasile *et al.*, en 1998. Bustamante, Crespo y Martínez (2018) mencionan que los bloques de concreto tradicionales poseen bajas resistencias térmicas antes de ser intervenidos para cambiar sus propiedades.

Velazco A.O. *et al.* (2020) utilizando simulación dinámica con el Software Energy Plus y Open Studio, realizaron un análisis de los efectos ambientales, energéticos y económicos resultantes de la construcción de edificaciones, utilizando un modelo de sustentabilidad comparado contra un modelo convencional, con la finalidad de obtener un indicador del costo al utilizar un modelo de construcción sustentable para una vivienda, y ver si es posible que no sea mayor al 15% al utilizar un modelo de construcción convencional. Para el análisis se propone un modelo de construcción sustentable de una vivienda urbana nivel residencial viable y replicable a futuras edificaciones en Querétaro y en el país a un precio competitivo en el mercado.

Las herramientas para determinar estas propiedades o comportamientos van desde las de tipo teórico, basadas en algoritmos de cálculo, que tienen como base las leyes de la termodinámica y los modos de transferencia de calor, hasta los métodos experimentales de medición o monitoreo que permiten conocer estos parámetros. También existen herramientas que se

utilizan para realizar evaluaciones por simulación de edificios. Podemos mencionar que The MIT Design Advisor (Urban, 2007) es una herramienta de cálculo gratuita en línea, diseñada específicamente para arquitectos y constructores, que permite conocer la eficiencia energética de una edificación mediante la ubicación y los materiales utilizados en la construcción, además de contar con la posibilidad de ofrecer simulaciones del edificio y hacer comparaciones con otros casos, con la intención de identificar el componente de construcción que tiene mayor impacto en el consumo de energía, los niveles interiores de luz y su confort térmico.

En Brasil existe la aplicación de un método que se enfoca en el cálculo de la eficiencia energética de sus edificios, en el cual el Gobierno los clasifica por una regulación en su nivel de eficiencia energética. La regulación permite clasificarlos por un método prescriptivo o alternativamente, por simulación. Asimismo, presentan un caso en particular utilizando un Software de simulación para conocer los beneficios de utilizar este método (López *et al.*, 2011).

López *et al.* (2011) presentan en su trabajo el Software S3E (Simulator of Energy Efficiency in Edificies), el cual aporta simulaciones de construcciones de edificios comerciales; este software cuenta como datos de entrada la forma del edificio, los materiales de construcción, la sombra que proporcionan las ventanas en sus marcos, el uso del edificio, entre otros; a partir de los datos mencionados se realiza un análisis y determina si el edificio es eficiente o no. Puede que algunos de los datos de entrada no sean fáciles de recabar, pero en un trabajo de campo en sitio se pueden conseguir fácilmente. Toda la información obtenida por dicha herramienta queda plasmada en archivos digitales y etiqueta oficial. Lo anterior es con el fin de comparar la información recabada con algún otro proyecto o para tratar de mejorar la simulación realizada.

El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España cuenta con una herramienta computacional llamada Programa Informático Calener-GT V, con la que permite determinar el nivel de eficiencia energética de un edificio. Se utiliza para el cálculo de eficiencia energética de grandes edificios en España; por lo cual, su utilización requiere de una certificación o entrenamiento previo, ya que se encuentra diseñada para ser utilizada por arquitectos o constructores, es decir, para

personas que cuenten con los conocimientos necesarios de un edificio. A pesar de contar con un grado de complejidad para su uso, la herramienta se encuentra muy completa y, además, permite realizar una certificación oficial por parte del Ministerio de España (IDAE, 2009).

Beele, en 2011, evaluó la aplicabilidad de la NOM-020-ENER-2011, con relación a las zonas climáticas en México, realizando un análisis de la metodología utilizada, y también evaluó los beneficios de la norma hacia las políticas de vivienda sustentable. El autor llega a la conclusión de que el estándar cumple únicamente sus objetivos en zonas con clima árido y húmedo y alguna combinación entre ellos. Por otra parte, el estándar no cumple sus objetivos en las zonas de clima templado, fríos y alguna combinación entre éstos. Por lo tanto, se propone que se deben realizar ajustes a la metodología de cálculo en estas zonas climáticas del país, por ejemplo, cambiar la forma de cálculo del valor U en edificaciones de zona frías/húmedas y realizar una verificación de los efectos de absortividad en sus cálculos de las cargas internas.

García Rodríguez *et al.* (2018), mediante el uso del simulador oficial de la NOM-020-ENER-2011, realizaron el estudio de eficiencia energética del aula académica de un centro educativo bajo la norma antes mencionada, donde se analizaron las condiciones térmicas en el espacio interior del aula académica, introduciendo los valores correspondientes a los materiales constructivos que conformaban el espacio arquitectónico; resultando que —con base en los materiales que actualmente conforma a la envolvente del aula— no cumple con los estándares que la norma establece, por lo cual se debe de establecer un nuevo diseño de la envolvente que conlleve a la disminución de las ganancias de calor hacia el interior del espacio y reducir el consumo de energía eléctrica mediante el uso de sistemas de climatización artificial.

Utilizando un simulador comercial, Solís, en 2010, llevó a cabo un estudio térmico de seis viviendas de clase económica de 30 m², con una alta carga térmica, ubicadas en ciudades fronterizas al norte de México. Su principal objetivo fue cuantificar el efecto de la orientación y el sombreado de la vivienda. Se concluye que, después de analizar las viviendas con el software Desing Builder, las viviendas no están adaptadas al clima cálido-seco, lo cual provoca una constante necesidad de acondicionar el recinto con

instrumentos de climatización artificial. Además, se reporta que, si se toma una mala decisión respecto a la orientación de la vivienda, puede afectar al aumento de la necesidad energética para climatizar y alcanzar condiciones de confort térmico, alcanzando un 14% más de consumo que si se eligiera la adecuada. Las orientaciones recomendadas en este estudio fueron las de Norte y Sur, y las menos adecuadas de Este y Oeste.

La mayoría de los trabajos antes mencionados hablan acerca de simuladores para el cálculo de la eficiencia energética en edificaciones, de sus propiedades térmicas y de las mejoras que se pueden realizar a los sistemas constructivos para mejorar su comportamiento energético.

Las aplicaciones de estas herramientas de simulación son más populares que los estudios teóricos o de medición, ya que se pueden realizar sólo con la información de los materiales y la obtención del software y no requieren gastos excesivos como los que se necesitan en los procedimientos experimentales.

Vivienda y su clasificación

La construcción de la vivienda depende, en gran medida, de las fuerzas que existan en el mercado y de las políticas que hay en los gobiernos federales y locales, así como de las fuentes de financiamiento. Las características principales que marcan diferencias en las viviendas son: el precio final en el mercado, la forma de producción y la superficie construida o número de cuartos, ubicación y servicios, entre otros.

De acuerdo al Código de Edificación de Vivienda (Conavi, 2017), existen diferentes parámetros para la clasificación de la vivienda en México, los cuales se agrupan tomando en cuenta diferentes factores, como podrían ser: por precio promedio, forma de construcción, número de viviendas por lote y sistema de condominios.

En la clasificación por precio, se toma como fundamento el pago por las licencias y permisos, costo de producción que incluye mano de obra, materiales y suministros; también, la forma de edificación de la vivienda y, por último, la fuente de financiamiento. Por lo anterior, la vivienda se clasifica en económica, popular y tradicional, las cuales son llamadas tradicional-

mente como viviendas de interés social, así como también las viviendas media, residencial y residencial plus, las cuales, se construyen preferentemente en conjuntos habitacionales o fraccionamientos de alta plusvalía.

Cuando se clasifica por forma de construcción se distinguen varias formas, como podría ser la que se considera por encargo a desarrolladores privados o por producción propia. La producción propia consiste en el diseño y la construcción de la vivienda por medio del control directo del propietario, usuario o beneficiario de algún programa, de forma individual, colectiva o familiar, la cual se puede desarrollar mediante la contratación de algún tercero o por medio de la construcción propia.

También se puede clasificar por número de viviendas por lote. Para este caso en particular, los tipos de vivienda son definidos en unifamiliar o plurifamiliar, donde la vivienda unifamiliar cuenta con uno o dos niveles; mientras que la plurifamiliar puede ser dúplex, de un nivel, de dos niveles, de cinco niveles o más.

La clasificación por condominios, la forma un grupo de departamentos, viviendas, casas, locales o naves en un inmueble, que son construidos en forma vertical, horizontal o mixto, que tiene uso habitacional, comercial o de servicios, y que son susceptibles de aprovechamiento independiente por tener salida propia a un elemento del inmueble o hacia la vía pública, y que pertenecen a distintos propietarios, mismos que tienen un derecho singular y exclusivo sobre su propiedad y, además, tienen un derecho de copropiedad sobre los elementos y partes comunes o de uso social del mismo inmueble, los cuales son necesarios para su uso adecuado y disfrute del mismo. Los tipos de condominios pueden ser unifamiliar, dúplex o doble, plurifamiliar o multifamiliar, condominio vertical, condominio horizontal y condominio mixto.

De todas las clasificaciones de vivienda antes descritas por el Código de Edificación de Vivienda, en México, es posible realizar un análisis desde el punto de vista energético utilizando alguna herramienta de simulación. Para el caso de la utilización de la herramienta de la NOM-020, no importa su tipología, ni el número de niveles, ni la extensión de metros cuadrados, incluso, pueden ser edificios con gran cantidad de niveles, la única restricción es que sean de uso habitacional.

Materiales, componentes y sistemas constructivos

Históricamente, la construcción de viviendas ha pasado por muchas etapas y se han utilizado diversidad de materiales de diferentes orígenes, desde los naturales, compuestos hasta los más industrializados.

Actualmente, en la construcción de viviendas se utiliza una diversidad de materiales que van desde los de origen pétreo; este tipo de material de construcción es de los que se encuentran conformados directamente o tratado como piedra. Existen diferentes materiales, entre las piedras que se utilizan frecuentemente, como el granito, mármol, pizarra, arenisca y caliza. Si se realiza la pulverización de la piedra y se trata a posterior, se pueden obtener los conglomerados como el yeso, el cemento y el mortero.

El hormigón es un material ampliamente utilizado para la construcción de vivienda, fabricado a partir del cemento; según con el material que se mezcle, se pueden obtener mezclas utilizando gravas de diferentes diámetros para la fabricación de concretos de diferentes resistencias que pueden ser concretos simples o concretos armados con acero de refuerzo. Este tipo de mezclas también son utilizadas para formar componentes constructivos como los tabiques y tabicones de concreto, huecos o macizos.

Aspectos importante de las características de algunos materiales son los que se conocen como materiales aligerados, que son a base de mezclas con cemento, utilizando materiales ligeros como las perlitas minerales y sintéticas que reducen las densidades y la conductividad térmica, convirtiéndose en elementos que se pueden adicionar en forma de enjarres, rellenos o sobre-techos. Una de las principales características de estos materiales es que no soportan cargas y quedan dentro de la clasificación de materiales no estructurales, pero su aplicación se puede diseñar para actuar como materiales con características de aislamiento térmico, que traen mucho beneficio a los edificios en función de bajar las cargas térmicas y generar ahorros energéticos.

El adobe, la arcilla y la cal también son materiales de construcción muy utilizados en la construcción de vivienda obtenidos a partir de la arcilla y la cal hidráulica que, de acuerdo a sus propiedades térmicas, abonan beneficios al tema del aislamiento.

Los materiales metálicos como el hierro y el aluminio también intervienen en estos procesos, ya sea como materiales de refuerzo estructural o para

elaborar herrerías. Finalmente podríamos mencionar los materiales orgánicos; este tipo de material de construcción abarca la madera y derivados de ésta, aunque también se pueden utilizar materiales de origen vegetal como el bambú, el corcho y la paja, que no intervienen como materiales aptos para la construcción formal en serie, pero si poseen propiedades aislantes.

Los materiales sintéticos juegan un papel importante en la construcción de vivienda en aplicaciones para instalaciones, pero sobre todo es importante destacar que en el aspecto de reforzar los sistemas constructivos con aislamiento térmico se utilizan los que se encuentran en el mercado, de forma industrializada y con fichas técnicas que definen los valores para ser considerados como materiales aislantes.

La resistencia, la calidad y las características de los materiales empleados en la construcción de viviendas deben de ser las que se señalen en las especificaciones de diseño y en los mismos planos constructivos registrados. Se deben realizar pruebas de verificación de la calidad que señalen las normas.

Cabe destacar en esta sección el hecho de que independientemente de las propiedades físicas de los materiales como los que se han mencionado, como resistencia mecánica y aspectos de calidad y durabilidad entre otras, en este trabajo se toma en cuenta las propiedades térmicas de los materiales, que, dependido de su naturaleza física, pueden variar y ofrecen diferentes condiciones en el balance energético de la vivienda, que es el caso que se aborda en este proyecto. Es de vital importancia entonces distinguir, a la hora del diseño y evaluación energética, las características de estos materiales. En el siguiente apartado se aborda este tema con más puntualidad.

Materiales de construcción y transferencia de calor

De acuerdo a lo mencionado en el capítulo anterior, la diversidad de materiales de construcción es amplia cuando se trata de edificación; estos materiales deben cumplir primeramente con propiedades mecánicas que los clasifique de acuerdo a normas, como materiales aptos para construir, ya que la seguridad estructural es la premisa en la construcción. Después de cumplir con estas exigencias físicas y en concordancia con el tema que nos ocupa en

este proyecto, hablaremos de las propiedades térmicas de los materiales, que independientemente de si cumplen con los esfuerzos estructurales, deben tener características aislantes para ayudar a resistir la transferencia de calor a través de los elementos constructivos y evitar la acumulación de calor al interior de los edificios.

Propiedades térmicas de los materiales de construcción

Par evaluar el comportamiento térmico de sistemas constructivos y pasar después a la evaluación energética del edificio, se deben tomar en cuenta las dimensiones del elemento y la composición de sus materiales desde el punto de vista de la capacidad que tienen para transferir calor. Esta capacidad se mide con la propiedad de la conductividad térmica $W/(m \cdot K)$, clasificando a los materiales con baja conductividad térmica como materiales aislantes (Cengel y Ghajar, 2020).

En la industria de la construcción, cuando se requiere evaluar los efectos de estas propiedades en la envolvente de algún edificio por medio de los sistemas constructivos, principalmente en techos y muros, se debe conocer esta propiedad. Existen materiales industrializados que, mediante fichas técnicas o certificados, informan de estos valores, sobre todo, cuando son materiales certificados. A pesar del avance en la tecnología, existen en México infinidad de materiales que no tienen determinadas estas propiedades, sobre todo los que se fabrican en obra y son producto de mezclas con variaciones entre ellos y que no están estandarizados, que pueden dar resultados diferentes al ser evaluados térmicamente, principalmente al hacer cumplir la normatividad.

A partir de dimensiones de los sistemas constructivos y la conductividad térmica, se puede determinar la resistencia térmica (Valor R), que es la capacidad de los materiales de oponerse al flujo de calor por unidad de área y un espesor específico (Cengel y Ghajar, 2020).

Los valores de conductividad térmica varían mucho dependiendo de la fuente consultada; para este caso nos basaremos en algunos valores promedio establecidos en tablas publicadas en diferentes fuentes bibliográficas o en fichas técnicas de los materiales. Comúnmente, estos valores varían de-

pendido de la fuente que se consulte, al menos que se considere medir las propiedades en laboratorio.

Simulación térmica y ahorro de energía

Con frecuencia, la manera más confiable de obtener información con relación a un proceso físico es mediante mediciones reales. Sin embargo, la mayoría de las veces, una investigación experimental requiere de equipos de medición con alto costo de adquisición y, como en el caso de la simulación energética de edificaciones, también de largos períodos de medición para evaluar de manera apropiada el desempeño térmico de la edificación.

Entre las principales ventajas que ofrece una solución teórica, mediante el uso de una herramienta de cálculo asistida para computadora en comparación a una investigación experimental es su bajo costo, la rapidez de ejecución y un acercamiento a la realidad de los fenómenos físicos del elemento analizado.

Existen varios simuladores para evaluar el fenómeno de eficiencia energética en edificios, de manera comercial, tal es el caso del software ANSYS, el cual ofrece los recursos necesarios para hacer el análisis térmico, eléctrico, estructural, de fluidos, sistemas de ingeniería y softwares embebidos para desarrollar componentes y sistemas para todas las aplicaciones energéticas. Las herramientas de ANSYS pueden reducir significativamente el tiempo de desarrollo del proyecto y ayudar a lanzar los productos en menos tiempo en el mercado.

TRNSYS es otra herramienta de cálculo con un entorno gráfico extremadamente flexible, el cual es utilizado para simular el comportamiento de sistemas transitorios. La mayoría de las simulaciones se centran en la evaluación del rendimiento de sistemas de energía térmica y eléctrica. Dicha herramienta de cálculo se usa activamente para distintas aplicaciones, tal como: simulación energética de edificios, sistemas solares térmicos, transferencia geotérmica, aplicaciones solares de alta temperatura, investigación de sistemas energéticos, entre otros.

CALENER VYP es la aplicación informática para la determinación de la certificación de eficiencia energética de viviendas y pequeño terciario, y sirve para generar el listado justificativo correspondiente. Cuenta con certificación por parte del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España (IDAE, 2009).

Para la simulación realizada en este proyecto, no se utiliza un software comercial, sino una herramienta básica proporcionada por la CONUEE, que aplica de manera puntual los procedimientos de cálculo de la NOM-020-ENER-2011, para el cálculo energético de vivienda en función de las demandas de energía, tomando en cuenta las características físicas de la envolvente tanto en la parte opaca como transparente, orientación y sombras. Existen también métodos más modernos en cuanto a herramientas de simulación, como los sistemas BIM para grandes edificios (Singh K. *et al.*, 2022).

Materiales y métodos

La presente investigación tiene como finalidad identificar el efecto de los materiales de la envolvente, de una muestra de viviendas residenciales ubicadas en la ciudad de Hermosillo Sonora, considerada como de clima cálido seco, en la demanda energética del edificio, de acuerdo a la NOM-020-ENER-2011, para con esto diagnosticar el nivel de cumplimiento de la norma. Se consideraron distintos factores que afectan directamente y de manera importante su desempeño térmico, como son: orientación, ubicación geográfica y clima, y de manera muy influyente, los componentes y sistemas constructivos que conforman el edificio habitacional en estudio.

El estudio se desarrolló en la ciudad de Hermosillo, capital del Estado de Sonora, la cual cuenta con una población de 984 342 habitantes; es también la ciudad más poblada de la entidad. Se localiza a 287 kilómetros de la frontera con los Estados Unidos y a 107 kilómetros de la costa en el golfo de California. Se encuentra en 29.1° Norte y 110.9° Oeste, y una elevación de 210 m.s.n.m. Hermosillo tiene un clima desértico, cuya clasificación es cálido seco. Durante casi todo el año las temperaturas son calurosas. En verano, el clima promedio ronda entre los 32.5°C, se tiene registro de temperaturas extremas de 49°C. Por otra parte, en invierno el promedio es

17.5°C, se cuenta con registro extremo de mínima de -7° C en el año 1978 y cuando se presentan frentes fríos, la temperatura suele llegar a los 0° C. Las precipitaciones son escasas, pero cuando se presentan suelen venir acompañadas de algunas tormentas eléctricas y rachas de viento, generalmente, entre julio y septiembre.

Descripción de los casos de estudio

Se analizan dos casos de estudio para dos tipologías (A y B) de vivienda que cumplen con las características mencionadas de vivienda residencial plus. Se describen como viviendas tipo residencial, ubicadas en la ciudad de Hermosillo, Sonora, que se eligieron siguiendo dos criterios principales: que fueran viviendas con más de 180 m² de construcción y que fueran desarrolladas por edificadoras de vivienda en serie, por lo que los proyectos, materiales y sistemas constructivos se repiten, con la característica de que son materiales de alta calidad y con capacidades de aislamiento térmico. De acuerdo a Tamayo (2015), se seleccionó —bajo un criterio exploratorio— el caso de estudio con base en un muestreo no probabilístico, según criterio o juicio, para la obtención de resultados descriptivos no inferenciales.

Se localizaron dentro de la mancha urbana dos residenciales que cumplen con estas características.

El primer fraccionamiento que cumple con los estándares antes mencionados es el residencial La Coruña (prototipo A), ubicado al poniente de la ciudad, en el cuál se encontraron 115 viviendas construidas, con un mismo proyecto ejecutivo para diferentes orientaciones.

El segundo fraccionamiento corresponde a Valle del Lago (prototipo B) al poniente de la ciudad donde se encontraron 64 viviendas, y cuentan con el mismo proyecto ejecutivo para varias orientaciones. Los sistemas constructivos de los prototipos A y B son diferentes, pero los dos cumplen con la clasificación de viviendas residencial plus por contar con un área construida mayor e 180 m².

Las viviendas de cada uno de estos fraccionamientos cuentan con diferentes orientaciones de su fachada principal, distribuyéndose como se muestran la tabla 1.

Figura 1. Ubicación de los residenciales en la mancha urbana de Hermosillo



Tabla 1. Distribución de los prototipos A y B de acuerdo a su orientación

Prototipo	Orientación de la fachada principal				Viviendas
	Norte	Sur	Este	Oeste	
A	28	35	22	30	115
B	16	21	14	13	64
Total	44	56	36	43	179

Descripción de las viviendas a evaluar

Los edificios utilizados para el análisis están dentro de la clasificación de vivienda residencial plus, de acuerdo al número de metros cuadrados de construcción y su valor promedio en el mercado residencial. En la figura 2 se muestra la fachada del edificio A, con un área de construcción que es de 295 m² de dos plantas y altura promedio de entrepisos de 3.24 m.

La vivienda tipo B tiene 210 m² de construcción, dos plantas y una altura de 3.05 m de entrepiso.

Descripción de la herramienta de cálculo

La herramienta para realizar el análisis de las demandas energéticas de las viviendas prototipo A y B está basada en el método de cálculo de la

Figura 2. Fachada del edificio correspondiente al prototipo A

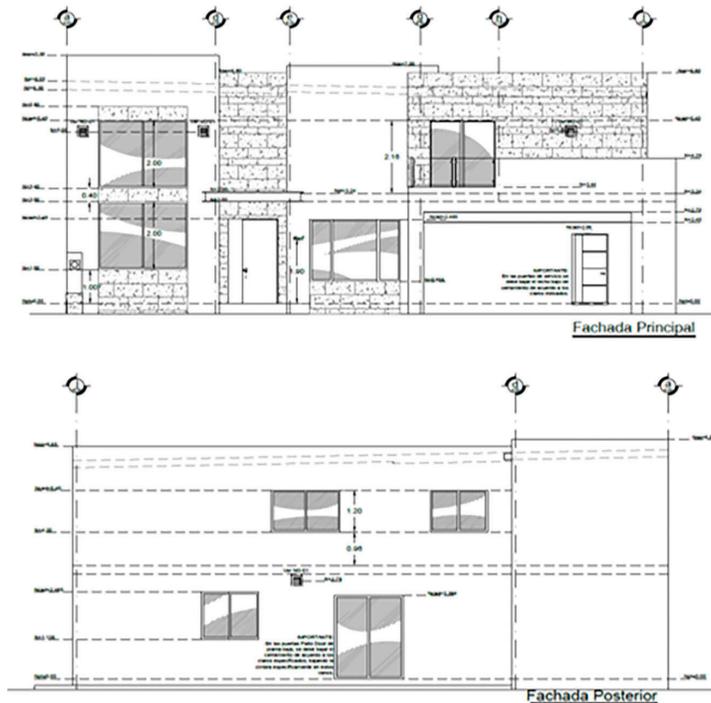
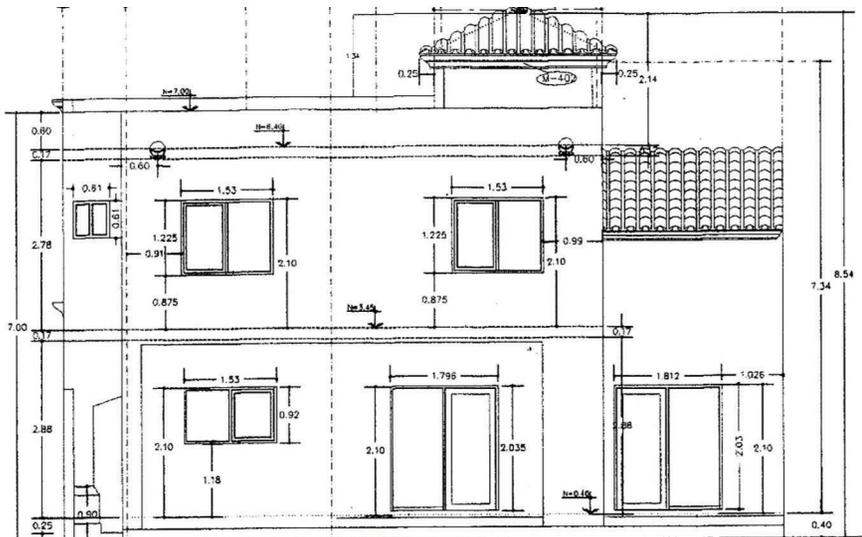


Figura 3. Fachada principal de prototipo B



NOM-020-ENER-2011, apoyado por la guía de cálculo de acuerdo a Low Carbon (2017), la cual permite al usuario calcular el presupuesto energético del edificio proyectado y del edificio de referencia, al ingresar los datos de geometría y propiedades térmicas de la envolvente del edificio proyectado, que consta de muros exteriores, techos, superficies inferiores, ventanas y puertas.

Se realiza la captura de la información de la vivienda, donde es importante describir nombre del proyecto, dirección, estado y ciudad. Se especifica si el edificio es de uno a tres niveles, o más, y la orientación de la fachada principal.

Figura 4. Pantalla principal de la herramienta

Cálculo de la **NOM-020-ENER-2011**

Propietario:

Nombre del edificio:

Nombre de la calle:

Estado:

Ciudad:

Niveles:

Orientación de la fachada principal:

SENER | CONUEE

Se capturan los sistemas constructivos de la vivienda, considerando muros exteriores, techos, puertas y ventanas, respetando su orientación. En la captura de estos elementos constructivos deben determinarse los metros cuadrados de cada elemento, así como la geometría de los sistemas constructivos y la conductividad térmica de los materiales de que están compuestos, para que el sistema calcule la resistencia térmica por metro cuadrado y pueda realizar el balance térmico de la vivienda completa. Debe considerarse también la orientación de cada uno de los elementos de la envolvente,

así como considerar si existen elementos de sombra sobre las superficies transparentes ya sean puertas o ventanas de cristal.

Una vez capturada toda la información que comprende la envolvente de la edificación, la herramienta presenta un resumen de todos los campos descritos anteriormente, en el cual se pueden apreciar dimensiones, áreas y ubicaciones, y se pueden realizar ediciones si es necesario.

Al concluir con la captura, el sistema muestra los resultados donde se determina el cumplimiento o no de la norma. Se interpreta como cumplimiento cuando los valores de la demanda de energía sumando la demanda por conducción por las partes opacas más la que corresponde a la radiación por las ventanas de la vivienda del edificio proyectado, es igual o menor a la demanda del edificio de referencia. En este caso arrojará un valor cero, o positivo. Para el caso de no cumplimiento arrojará valores negativos.

Aplicación de la herramienta para evaluar las viviendas estudiadas

La tabla 2 muestra las características constructivas de la envolvente de la vivienda A, donde se aprecian los tipos de muros, enjarres y recubrimientos, así como el tipo de componente que forma el muro y los espesores de las capas que lo conforman. Se describen también las características del techo, su morfología y dimensiones, así como los tipos de vidrio de las ventanas, tipos de puertas y la cantidad de metros cuadrados de las superficies. Toda esta información debe capturarse en la herramienta de cálculo para que el sistema proceda a realizar el cálculo de demanda de energía de esta vivienda.

La vivienda B, a pesar de ser una vivienda residencial plus por el número de metros cuadrados, se distingue de la tipología A por los materiales utilizados sobre todo en muros, tipo de ventanas y materiales de aislamiento menos especializados que la tipología A. La tabla 3 muestra sus características tanto dimensionales como de tipo de materiales.

La tabla 4 muestra los valores de la conductividad térmica de los materiales utilizados para los prototipos A y B en este cálculo y la fuente de su obtención ya sea por ficha técnica o retomado de las normas.

Tabla 2. Características constructivas de la vivienda A de acuerdo al proyecto ejecutivo

Tipo de muro y techo	Muro frontal		Muro posterior	Muro lateral derecho		Muro lateral izquierdo		Techo
		Ladrillo térmico 14 cm + 1.3 cm yeso int. + 1.9 cm grueso ext.	Ladrillo térmico 14 cm + cantera 2.0 cm	Ladrillo térmico 14 cm + 1.3 cm yeso int. + 1.9 cm grueso ext.	Ladrillo térmico 14 cm + 1.3 cm yeso int. + 1.9 cm grueso ext.	Ladrillo térmico 14 cm + 1.3 cm yeso int. + 1.9 cm grueso ext. cantera 2.0 cm	Ladrillo térmico 14 cm + 1.3 cm yeso int. + 1.9 cm grueso ext.	Ladrillo térmico 14 cm + 1.3 cm yeso int. + 1.9 cm grueso ext. + cantera 2.0 cm
Áreas, muros y techo (m2)	100.54	59.49	99.76	92.37	6.32	92.88	1.24	166.65
Núm. de ventanas	4 (17.68 m2)		4 (10.71 m2)	6 (8.93 m2)		0		
Tipo de ventanas (mm)	Vidrio 5/12/5		6/12/6 y 3/6/3	3/6/3				
Puertas	Puerta ppal. fibra de vidrio/ poliuretano (3.36 m ²)							
	Puerta de servicio, metálica (2.0 m ²)							

Tabla 3. Características constructivas de la vivienda B de acuerdo al proyecto ejecutivo

Tipo de muro y techo	Muro frontal		Muro posterior	Muro lateral derecho	Muro lateral izquierdo	Techo	
		Ladrillo regional 14 cm + 1.3 cm yeso int. + 1.9 cm grueso ext.	Ladrillo regional 14 cm + 1.3 cm yeso int + 1.9 cm grueso ext	Ladrillo regional 14 cm + 1.3 cm yeso int + 1.9 cm grueso ext	Ladrillo regional 14 cm + 1.3 cm yeso int. + 1.9 cm grueso ext.	Ladrillo regional 14 cm + 1.3 cm yeso int. + 1.9 cm grueso ext.	Vig. y bov. 16 cm de espesor + 2 cm imper + 0.5 cm yeso.
Áreas muros y techo (m2)	67.0	59.49	64.0		59.35	59.49	166.65
Núm. de Ventanas	8 (10.25 m ²)		4 (12.89 m ²)	6 (2.32 m ²)		0	
Tipo de ventanas (mm)	Vidrio doble 6 mm – espacio de 12 mm	Vidrio doble 6 mm espacio de 12 mm	Vidrio doble 6 mm espacio de 12 mm	Vidrio doble 6 mm espacio de 12 mm			
Puertas	Puerta principal madera (2.88 m ²)						
	Puerta de servicio, multypanel (1.65 m ²)						

Tabla 4. Valores de conductividad térmica de los materiales

Material	Conductividad térmica W/m K	Referencia
Ladrillo térmico	0.158	Ficha técnica
Yeso	0.372	NOM-020-ENER-2011
Enjarre grueso	0.870	NOM-020-ENER-2011
Cantera	1.500	NOM-020-ENER-2011
Impermeabilizante	0.170	NOM-020-ENER-2011
Concreto	1.740	NOM-020-ENER-2011
Fibra de vidrio R-11	0.045	Ficha técnica
Tablaroca	0.144	NOM-020-ENER-2011
Vigueta	1.740	NOM-020-ENER-2011
Bovedilla	0.042	Ficha técnica

Captura de datos en la herramienta de cálculo

A continuación, se ingresan los datos de la envolvente en la herramienta de cálculo para obtener el análisis de simulación correspondiente a las viviendas A y B, respectivamente.

En la figura 5 se observa el detalle de la captura del sistema constructivo de muro, cuyas capas homogéneas se suman en serie para determinar la resistencia térmica de este sistema constructivo. Se observan los valores de la conductividad térmica para cada uno de los materiales que conforman el muro, cuyos valores se obtuvieron tanto de fichas técnicas como de valores

Figura 5. Captura de los sistemas constructivos para muros de la vivienda A

The screenshot shows the 'Nuevo sistema constructivo homogéneo' window in the NCM-620 Calculation tool. The description is 'Ladrillo térmico con cantera'. The component type is 'Pared' (Wall). The material list includes: Convección exterior (1.000 m, 13.000 W/mK, 0.077 m²K/W), Ladrillo térmico (0.143 m, 0.158 W/mK, 0.9051 m²K/W), Acabado verso interior (0.013 m, 0.2360 W/mK, 0.6551 m²K/W), Acabado grueso exterior (0.019 m, 0.7300 W/mK, 0.6260 m²K/W), Cantera (0.020 m, 1.5000 W/mK, 0.0133 m²K/W), and Convección interior (1.000 m, 8.100 W/mK, 0.1235 m²K/W). The total thermal resistance is M = 1.1999 m²K/W and the thermal conductivity is K = 0.8314 W/mK. A 'Guardar datos' button is visible at the bottom.

Figura 6. Captura del sistema constructivo no homogéneo para techo en vivienda A

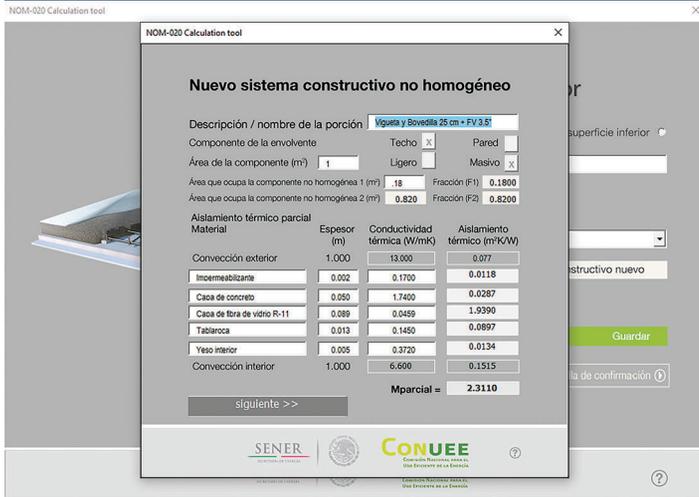
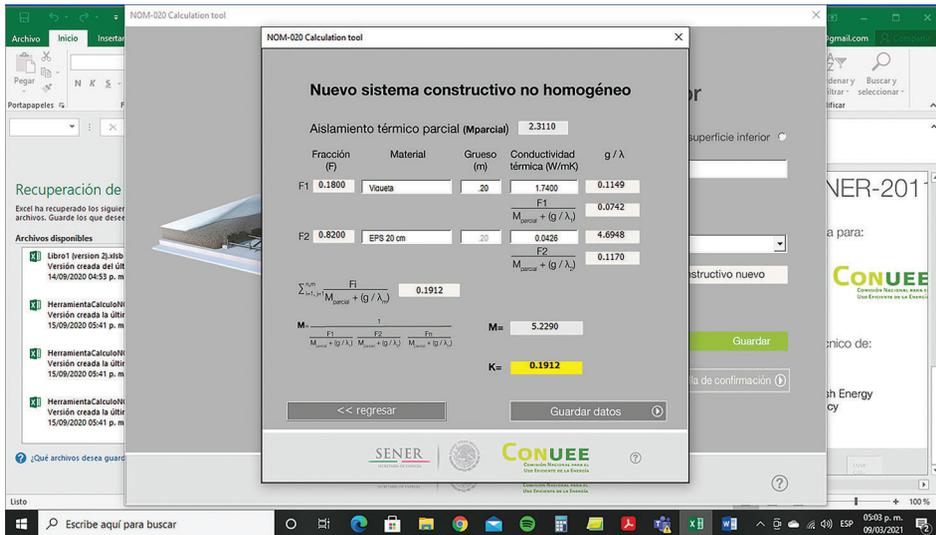


Figura 7. Captura de la parte no homogénea de la losa



establecidos en la normatividad mexicana, de acuerdo a los valores de la tabla 4. Se observan también los espesores de las capas del muro. Se muestra además el valor de la resistencia térmica (M) del sistema constructivo completo, así como el coeficiente global de transferencia de calor del muro (K), evaluados por metro cuadrado.

En la figura 6 se muestran los valores que se capturaron para el cálculo de M y K para el sistema de cubierta a base de vigueta y bovedilla de la vivienda A, considerado como un sistema no homogéneo de acuerdo a lo establecido en las normas NOM-020-ENER-2011 y NMX-C-460-ONNCCE-2009.

Se completa la captura de datos para la simulación, considerando las ventanas, sus orientaciones y los materiales de que están compuestas, así como las características de vidrios. Se culmina capturando las puertas indicadas en el proyecto de acuerdo a sus orientaciones y las propiedades de los materiales expresadas en las tablas 2 y 3 de cada prototipo. Se repite el proceso para la vivienda B.

Resultados

Con toda esta información, la herramienta realiza un análisis de la demanda de energía que se genera a través de los muros por conducción (W) y por radiación a través de las ventanas (W) del edificio de referencia y del edificio proyectado, comparándolos y arrojando un resultado en porcentaje de ahorro para valores cero o positivos y un desahorro para valores negativos que se interpretan como el no cumplimiento de la norma.

Las tablas 5 y 6 muestran los resultados de las simulaciones de los prototipos A y B y sus diferentes orientaciones para cada caso.

Tabla 5. Resultados de demandas de energía para la vivienda A

Coruña Norte	Conducción (W)	Radiación (W)	Total (W)	Cumple(%)
Edificio de referencia	5,585.80	5,038.41	10,624.21	
Edificio proyectado	4,468.06	2,539.18	7,007.26	Sí 34 %
Coruña Sur				
Edificio de referencia	5,586.63	5,043.55	10,630.17	
Edificio proyectado	4,444.22	2,739.81	7,184.03	Sí 32 %
Coruña Este				
Edificio de referencia	5,608.48	5,121.21	10,729.69	
Edificio proyectado	4435.74	3186.87	7,622.61	Sí 29 %
Coruña Oeste				
Edificio de referencia	5454.95	4547.47	10002.42	
Edificio proyectado	4376.75	3207.74	7584.50	Sí 24.2 %

Tabla 6. Resultados de demanda de energía para la Vivienda B

V Lago Norte	Conducción (W)	Radiación (W)	Total (W)	Cumple (%)
Edificio de referencia	3857.07	3227.17	7084.24	
Edificio proyectado	7801.56	1546.22	9347.78	No - 32 %
V Lago Sur				
Edificio de referencia	3861.89	3245.67	7107.56	
Edificio proyectado	7805.18	1311.10	9116.27	No - 28.3 %
V lago Este				
Edificio de referencia	3880.92	3310.63	7191.56	
Edificio proyectado	7785.58	2240.55	10026.13	No - 39.4 %
V Lago Oeste				
Edificio de referencia	3,782.38	2949.25	6731.64	
Edificio proyectado	7637.61	2226.41	9864.02	No - 46.5 %

Los resultados de la vivienda de tipología A, orientada al norte, arrojan un 34% de ahorro respecto al cumplimiento de la norma; con orientación al sur, presenta un porcentaje de ahorro de 32.4%; al oriente con 29.0%, y al poniente con 24.2%.

En el caso de los resultados de la vivienda B analizada, con una orientación al sur, muestra un valor del -28.4% respecto cumplimiento de la norma con orientación norte, cuenta con un nivel de incumplimiento del -32.0%; con orientación al oriente, cuenta con un nivel de incumplimiento del -39.4%. y con orientación al poniente, cuenta con un nivel de incumplimiento del -46.5%.

Los resultados muestran un cumplimiento en todas las orientaciones para el prototipo A y un no cumplimiento en todas las orientaciones del prototipo B, cuya diferencia son los materiales y sistemas constructivos en función de sus características termo físicas.

Discusión

Después de realizadas las simulaciones de la vivienda A y B para cuatro orientaciones N, S, E, O, se observa que, en el caso de la vivienda A, ésta cumple satisfactoriamente la norma, pues presenta valores positivos mientras que la vivienda B no cumple con los requerimientos establecidos en la norma, dado que presenta valores negativos.

Esto nos muestra que a pesar de que la vivienda B se clasifica como una de tipo residencial plus, por la cantidad de metros cuadrados y el valor monetario de la vivienda, no cumple, puesto que las características de los sistemas constructivos son los que definen, de tal manera que, si se tuviera un análisis de una vivienda muy pequeña, pero con materiales adecuados pudiera dar el cumplimiento que se requiere para esta norma.

Es importante destacar que los valores de cumplimiento tienen variaciones dependido de la orientación de la vivienda, siendo un factor importante a la hora de proyectar para determinar sus orientaciones.

Conclusiones y recomendaciones

Se concluye que, si se desea contar con una vivienda que tenga un nivel de cumplimiento de esta norma, es pertinente que desde el diseño se debe pensar en los materiales y sistemas constructivos y su geometría, además de la orientación.

Para el caso de la vivienda B que no dio el cumplimiento, se pueden hacer diferentes propuestas, analizando las modificaciones que se pudieran hacer a la envolvente, desde colocar elementos sombreantes en las superficies transparentes, aislamiento en techos o muros y tipo de vidrios en ventanas, pero no así para la orientación, puesto que se trata de viviendas existentes.

El resultado muestra un cumplimiento con la norma para este tipo de viviendas, de tal manera que se puede inferir que una gran cantidad de viviendas existentes en la mancha urbana de esta ciudad, con las mismas características, tienen altas posibilidades de cumplir, ya que se encuentran construidas con materiales similares.

Para el caso de la vivienda tipo B, aunque este tipo de vivienda cumpla con la clasificación del Código de Edificación de Vivienda, como tipo Residencial Plus, se concluye que los materiales constructivos no son los adecuados para la zona climática en la que se encuentra construida.

De acuerdo a los resultados observados, para cada vivienda en relación a su orientación, se observa que las orientaciones norte-sur de la fachada principal, para las dos tipologías, resultan las que reportan menos demanda

de energía de la vivienda y las orientadas al este y oeste presentan más demanda, lo que significa que serán las viviendas que más consumirán energía al momento de ser climatizadas con equipos de aire acondicionado.

La parte técnica de las conclusiones dadas en los párrafos anteriores es corta y muy concisa, sin embargo, falta comentar aspectos que tienen que ver con la falta de aplicación de la norma, ya que es obligatoria, pero su aplicación se ve detenida por la falta de gestión, en los municipios, de integrarla a los reglamentos municipales.

Derivado del incumplimiento de la norma, se propone realizar un estudio de las propiedades térmicas de los materiales de construcción considerando las condiciones climáticas del lugar, así como la orientación del edificio, ya que con esto se permitirá que en las construcciones habitacionales futuras se fomente el ahorro energético y se promueva el cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana para el Uso de Eficiencia Energética para Edificaciones.

Otro aspecto importante dentro de las recomendaciones es ampliar el estudio hacia otro tipo de vivienda o inmuebles diferentes no habitacionales, para orientar de una manera más amplia a los sectores involucrados en la edificación en México.

Es importante tomar en cuenta los sistemas constructivos de las viviendas analizadas, por lo que en el caso de la vivienda B se propone cambiar el tipo de sistema de construcción o mejorarlo con materiales aislantes.

Bibliografía

- Beele, A., (2011) *Evaluation of the New Policy for Thermal Insulation Standards in the Residential Sector in Mexico. Applicability of the standard NOM-020-ENER-2011* (PhD thesis). México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Borbón, A. C., Cabanillas, R. E. y Pérez, J. B. (2010). Modelación y Simulación de la Transferencia de Calor en Muros de Bloque de Concreto Hueco. *Información Tecnológica*, 3(2), 27-38.
- Bustamante, M. F., Crespo, J., Martínez, J. M. (2018). Caracterización Térmica y Mecánica de Bloque de Concreto. *INNOVA Research Journal*, (3), 62-80.
- Cengel, Y. A. y Ghajar, A. J. (2020). *Transferencia de calor y masa* (6ª ed.). México: Mc Graw-Hill.

- Comisión Nacional de Vivienda (2017). Código de Edificación de Vivienda (3ª ed.). Ciudad de México. Gobierno de México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2011). *México y el Cambio Climático Global*. <https://www.bibliotecasemarnat.gob>.
- Congreso de los Estados Unidos Mexicanos (2009). Ley Federal sobre Metrología y Normalización. México.
- Ionescu, C., Baracu T., Gabriela, Vlad, G.E., Necula, H. y Badea, A., (2015). The Historical Evolution of the Energy Efficient Buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (49), 243-253.
- García, F. J., Serrano, J., Rodríguez, J. C. y Trejo, Z. B., (2018). Estudio de eficiencia energética de la aula académica de un centro educativo bajo la norma NOM-020-ENER-2011. *Revista de Tecnología e Innovación*, (17), 40-46.
- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (2009). Programa informático CALENER-GT-Grandes edificios terciarios. Manual Técnico. Madrid, España.
- López, M., Iwamoto, G., Gracher, H., Lamberts, R. y Campos, L., (2011). *Development of Computational Tool to Evaluate the Building Energy Efficiency Level According to the Brazilian Labeling*. *Proceedings of Building Simulation*, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association.
- López, M., Iwamoto, G., Gracher, H., Lamberts, R. y Campos, L., (2011). *The Building Simulation as an Alternative Method in Brazilian Energy Efficiency Labeling of Commercial Buildings*. *Proceedings of Building Simulation*, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association.
- Low Carbon Architecture (2017). Guía Rápida de Cálculo de la NOM-020-ENER-2011 SENER, CONUEE, Agencia Danesa de Energía. Ciudad de México.
- Lucero, J. (2016). *Determinación experimental del flujo térmico a través de losas para techumbres aislados con diversos recubrimientos* [Tesis de Maestría]. Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados-Chihuahua, México.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2009). NMX-C-460-ONNCCE- 2009. Industria de la Construcción-Aislamiento Térmico Valor "R" para las Envolventes de Vivienda por Zona Térmica para la República Mexicana-México Especificaciones y Verificación. México.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (2001). Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001. Eficiencia Energética en Edificaciones, Envolvente de Edificios no Residenciales. México.
- (2011). Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011. Eficiencia energética en edificaciones. Envolvente de edificios para uso habitacional. México.
- Pérez, J. Cabanillas, R. Hinojosa, J. y Borbon A. Estudio numérico de la resistencia térmica en muros de bloque de concreto hueco con aislamiento térmico. *Información tecnológica*, 22(3), 27-38.
- Solís, D. (2010). Análisis térmico de una vivienda económica en clima cálido-seco bajo diferentes orientaciones y medidas de sombreado. *Estudios sobre Arquitectura y Urbanismo de Desierto*, 3(3), 31-57.
- Tamayo, G. (2015). *Diseños muestrales en la investigación.. Semestre Económico*, 4(7).

- Urban, B. (2007). *The MIT Design Advisor: Simple and Rapid Energy Simulation of Early-Stage Building Designs* [Tesis de Maestría]. Massachusetts Institute of Technology.
- Vasile, C., Lorente, S. y Perrin, B. (1998). Study of Convective Phenomena Inside Cavities Coupled with Heat and Mass Transfers Through Porous Media-Application to Vertical Hollow Bricks. A first Approach. *Energy and Buildings*, 28, 229-235.
- Velazco, A., Piñeda, J. y Rojas, J. (octubre de 2020). Análisis de los efectos ambientales, energéticos y económicos entre un modelo de vivienda sustentable y una convencional en Querétaro. *XLIV Semana Nacional de Energía Solar*. Ciudad de México.

Capítulo 4. Incorporación de caucho en polvo en materiales aislantes como alternativa de la valorización de neumáticos de desecho

MARÍA DE LOS ÁNGELES VILLARREAL ANDRADE*

NORMA ALEJANDRA RODRÍGUEZ MUÑOZ**

JOSÉ R. IRIGOYEN CAMPUZANO***

LILIANA REYNOSO CUEVAS****

ANA CECILIA BORBÓN ALMADA*****

Resumen

La inadecuada disposición de los neumáticos es una actividad que contribuye al deterioro ambiental debido a los diversos problemas que causa su disposición final. Por lo cual, crear composites a partir de partículas del caucho, en combinación con otros materiales, para su implementación en sistemas constructivos de edificaciones surge como una posible solución a esta problemática. En este trabajo de investigación se propuso la generación de un material compuesto de tipo matriz-refuerzo polimérico al agregar polvo de llanta como relleno en una matriz de poliuretano en combinación con una resina de pino como reforzante. En el diseño del material se encontró que una proporción de 8% de resina de pino y 12% del caucho constituyen los valores limitantes para la obtención del material. Se elaboraron especímenes de $200 \times 180 \times 50$ mm, a los cuales se les midió la conductividad térmica la cual varió desde 0.041 hasta 0.058 W/m·K. La muestra con proporción de 9.38% de polvo de caucho y 2.01% de resina de pino fue la que tuvo menor conductividad térmica. De forma general, se observó que, a

* Ingeniera Química. Departamento de Ingeniería Sustentable, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0071-9838>

** Doctora en Ciencias de la Ingeniería. Conacyt, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0966-8440>

*** Maestro en Ciencias en Gestión Ambiental. Departamento de Ingeniería Sustentable, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8872-5932>

**** Doctora en Biotecnología. Conacyt, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8736-8374>

***** Doctora en Ciencias. Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7781-2571>

mayor proporción del caucho, se producirá una disminución en el tamaño de las burbujas de aire, impactando a la conductividad térmica del material. El estudio permitió contribuir con una alternativa para la gestión de los residuos de neumáticos y también para ofrecer un nuevo material de baja conductividad térmica para mejorar el desempeño térmico de las edificaciones.

Palabras clave: *Aislante, conductividad térmica, composito, caucho, edificaciones sustentables.*

Abstract

Tires are among the main contributors to environmental impact due to their difficult final disposal; for this reason, research has been carried out to find processes for recovering and revaluing tire waste, locating the tire as a source of secondary raw material. In this way, it arises as a sustainable solution to the environmental problem, creating composites from rubber particles in combination with other materials for their implementation in building construction systems. This research aimed to obtain a composite material of the polymeric matrix-reinforcement type by adding rim powder as filler in a polyurethane matrix combined with a resin of natural origin as reinforcement. Experiments were carried out with statistical analysis tools to design the mixtures of the three components of the foam, finding proportions of 12 % of rubber and 8 % of resin as limiting values for the synthesis of material in sizes sample of $200 \times 180 \times 50$ mm. The thermal conductivity of the mixtures varied from 0.041 to 0.058 W/m·K, where the sample with a proportion of 9.38% of rubber and 2.01% of resin had the lowest conductivity. Furthermore, it was found that the greater the amount of tire dust there is an essential reduction in the size of the air bubbles. Thus, the study allowed to contribute with an option for the management of tire waste and offer a new material to improve the thermal performance of buildings.

Keywords: *Insulation, thermal conductivity, composite, rubber, sustainable buildings.*

Introducción

La invención de los neumáticos revolucionó la vida de la sociedad, ya que facilitó el transporte de personas y de bienes. Sin embargo, este desarrollo tecnológico presenta una problemática, ya que cuando el neumático llega al final de su vida útil, su compleja composición complica una disposición adecuada. Los neumáticos consisten entre un 70% y 80% de caucho vulcanizado, por esto, los componentes originales de las llantas serán difícilmente separados y reciclados (Sienkiewicz, Janik, Borzędowska-Labuda y Kucińska-Lipka, 2017).

La forma más común para la disposición de los neumáticos es en los tiraderos a cielo abierto y la incineración, lo cual genera problemas de contaminación y salud. El daño más recurrente es la destrucción de ecosistemas enteros, debido a la contaminación del agua, suelo y el aire (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2014). De manera similar, dentro de las problemáticas a la salud se tiene una preocupación latente por los efectos de la exposición a los contaminantes, que se generan por la combustión de los neumáticos. Los contaminantes predominantes son los óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de zinc (ZnO), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), benceno (C₆H₆) y plomo (Pb). Se ha encontrado que estos se dispersan en el aire, generando efectos agudos, como lo son la irritación de ojos y piel, depresión del sistema nervioso central y efectos crónicos como daños irreversibles a las vías respiratorias y cáncer (Reisman y Lemieux, 1997).

En esta investigación se llevó a cabo la síntesis de un material compuesto conocido como matriz-refuerzo polimérico. Se utilizó polvo de llanta como relleno en una matriz de poliuretano adicionando una resina de pino como reforzante. Sintetizar composites a partir de partículas de caucho en combinación con otros materiales para su implementación en sistemas constructivos, se propone como una solución sostenible al problema ambiental de la disposición de los neumáticos.

Situación mundial del uso de caucho

Actualmente, los materiales poliméricos como los plásticos y cauchos son aprovechados para la elaboración de diversos productos con aplicaciones industriales, en construcción, embalaje, entre muchas otras áreas. Especialmente, el caucho es producido a gran escala para su empleo en la industria automotriz (Fazli y Rodríguez, 2020); sin embargo, su manejo ha ocasionado problemas a nivel ambiental, social y económico en todo el mundo, convirtiendo su disposición final en un desafío (Hejna *et al.*, 2020).

En 2019, la producción mundial de caucho natural fue de 14.6 millones de toneladas, teniendo la mayor producción en Asia (88.4%), seguidos de África (6.8%) y América (4.7%) (Martinez Komatsu, 2021). Por otro lado, en Estados Unidos de América (EE. UU.) se producen 3.824 millones de toneladas de neumáticos; en la Unión Europea (U. E.), 3.418 millones; mientras que en Japón, 1.052 millones, y en China se producen 5.7 millones de toneladas (Sienkiewicz *et al.*, 2017). El principal componente de las llantas se encuentra vulcanizado, es decir, curado con sulfuros, y representa alrededor del 70-80% de la masa total. Y aún con estas dificultades, muchos países han desarrollado una rama especializada para la recuperación de neumáticos usados, sobresaliendo las aplicaciones de generación de energía y la producción de materiales reciclados. Asimismo, la generación de nuevos materiales ha resultado muy rentable, ya que se ha propiciado la recuperación de hasta un 96%, 95% y 88% de neumáticos en EE. UU., la U. E. y Japón, respectivamente (Sienkiewicz *et al.*, 2017).

Uso y disposición del caucho en México

En México, de acuerdo a la Cámara Nacional de la Industria Hulera (CNIH) y el Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho, la industria del neumático está ligada a la industria del hule, representando cerca del 70% de ella. En el año de 2012, se procesaron 23,450 neumáticos de desecho y en 2013 fueron 6,835 (*Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho*, 2015). Desde una perspectiva de comercio mundial, México representa el 1.3% de las exportaciones mundiales de hule, y ocupa el lugar 23 en la exportación

de productos basados en hule. Mientras que los productos de hule que más se importan son los neumáticos de caucho y las gomas inflables, lo cual representa un 77.4% del total (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [INEGI] 2016). Desafortunadamente, la estadística relacionada a cuantificación de neumáticos usados en México no se encuentra disponible; sin embargo, a través del Sistema Nacional de Baja de Vehículos, se ha estimado que en México se desechan 32 millones de neumáticos al año (*Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho*, 2015).

Reciclaje y reutilización del caucho

Como consecuencia, surge la necesidad de adoptar y desarrollar alternativas que permitan revalorizar este tipo de residuos, siendo una de las opciones más viables su reciclaje, pues de esta manera se contribuye a disminuir el daño ambiental y se encamina el material a una economía circular (Silva, Cortat, Orlando y Mulinari, 2020).

En las últimas décadas, se ha acrecentado el número de estudios en los que se pretende darle un valor agregado a los residuos de llantas, al producir materiales de construcción que puedan ser incorporados a las edificaciones (Al-Attar, Hamada, Tayeh y Awoyera, 2022; Alyousef *et al.*, 2021; Rigotti y Dorigato, 2022). Igualmente, desde el enfoque medioambiental, la reutilización de los neumáticos se considera una opción atractiva y viable, ya que la producción de estos materiales requiere de una cantidad elevada de todo tipo de recursos, por lo que la reducción en la demanda de las materias primas es beneficiosa (Rashid, Yazdanbakhsh y Rehman, 2019).

Existen diversos estudios que hacen evidente el potencial del aprovechamiento del caucho reciclado aplicado a materiales de construcción. Dissanayake y colaboradores, estudiaron la aplicación de residuos textiles y caucho natural como un aislante acústico (Dissanayake, Weerasinghe, Thebuwanage y Bandara, 2021), mientras que Chen y colaboradores analizaron el comportamiento térmico y mecánico de un material elaborado con tubos de silicón (SSRT shotcrete silicon rubber tubes), el cual puede fungir como aislante térmico (Chen, Meng, Liu, Zhao y Liu, 2022), y Yang y colaboradores evaluaron la conductividad térmica de residuos de un compuesto de

caucho-arena para su aplicación como aislante en edificaciones (Yang, Zhang, Reddy, Li y Liu, 2022).

Además de la mezcla del caucho proveniente de los neumáticos en concreto, este material reciclado ha mostrado resultados atractivos, ya que su incorporación en forma de relleno o tapete en sistemas constructivos de cimentación o placa, para techos y muros, son alternativas que han demostrado buenas características. Por mencionar algunas propiedades, se destaca la durabilidad, ya que los materiales con caucho añadido presentan una elevada resistencia a la abrasión, lo que les permite soportar condiciones extremas. También, tienen una moderada absorción del sonido, la cual es una propiedad relevante en las edificaciones, además de que el caucho tiene la capacidad para comportarse como un aislante térmico (Cardona y Sánchez, 2011).

Esto abrió un área de oportunidad para nuevos materiales generados a partir de la reutilización y el reciclaje; este es el caso de los materiales compuestos, que buscan reunir ciertas propiedades de distintos materiales en uno solo. En este contexto, el apostar por la fabricación de materiales compuestos implica lograr materiales que sean de competencia con los ya existentes en el mercado, como es el caso de las espumas de poliuretano, aislante por excelencia, además de sus características de bajo peso y practicidad en su uso (Zafar, Fahmina, Sharmin, 2012). El sintetizar materiales compuestos a partir de estos materiales poliméricos no sólo trae consigo el beneficio de la mejora de parámetros y propiedades (que van desde la conductividad térmica, tenacidad, resistencia a la tracción, entre otras), sino también una reducción del costo del producto final (Hejna *et al.*, 2020). El poliuretano representa uno de los descubrimientos más importantes, a pesar de haber sido descubierto hace décadas, debido a su versatilidad para múltiples aplicaciones. Un ejemplo de esto es la síntesis de composites con caucho reciclado, ya que este último encaja perfectamente en la matriz para producir materiales con alta resistencia al desgaste (Cachaço, Afonso y Pinto, 2013). Estas características se logran al introducir rellenos en la espuma de poliuretano, el cual puede ir en forma de fibra o partículas más finas de diversos materiales reciclados como caucho, polietilentereftalato (PET), carbono o nanotubos (Husainie, Deng, Ghaliya, Robinson y Naguib, 2021).

Propuesta para resolver la problemática ambiental de los neumáticos

Los neumáticos de desecho son un problema ambiental y económico a nivel mundial. Al comparar el mercado de reciclaje de neumáticos, con respecto a los 17 millones de llantas que caen en desuso anualmente, se puede constatar que aún no es suficiente. Las llantas se distinguen por tener una compleja estructura de goma, por lo que son materiales de difícil procesamiento cuando se comparan con otros plásticos. Asimismo, este tipo de materiales son diseñados para tener una alta durabilidad y resistencia debido a su aplicación, por lo que no es posible biodegradarlos (Derakhshan *et al.*, 2017).

Por otro lado, en México hay una mala gestión de los desechos de neumáticos, lo cual ha desatado impactos de salud y ambientales. Por lo que, si se decide su eliminación a través de la combustión, se aumenta la contaminación y la exposición a diversas sustancias que se emiten a través de su incineración. De igual manera, se conoce que al disponer las llantas en vertederos se propicia la reproducción de mosquitos y plagas, fomentando la propagación de enfermedades (*Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho*, 2015).

Aplicación en la construcción

Se ha encontrado, como área de potencial aplicación, el sector de la construcción, ya que un problema que se presenta en las edificaciones es el efecto del clima sobre el confort térmico de los ocupantes, así como el requerimiento de energía para mantenerlo.

En México se tienen muchos tipos de climas, los cuales se pueden clasificar de manera general, de acuerdo a datos de temperatura, en cálidos y templados; mientras que, de acuerdo a su humedad, en húmedos, subhúmedos y secos (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía [CONUEE], 2020). Por otro lado, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) clasifica a los grupos climáticos basándose en información de la temperatura media anual, donde la isoterma de 22°C sirve para distinguir los climas

templados de los semifríos y la isoterma de 5°C, separa los climas semifríos de los muy fríos (INEGI, 2022).

De manera general, el utilizar aislamiento térmico en una edificación residencial permite el ahorro de energía y una mayor eficiencia en el uso de los sistemas utilizados en el enfriamiento y calentamiento. De acuerdo a la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI), realizada por el INEGI (2018), en la región cálida extrema, que comprende los estados del norte de México (Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Sinaloa y Tamaulipas), se encontró que el 14.9% de las viviendas cuentan con algún tipo de aislamiento térmico. Por otro lado, en las regiones de clima templado y tropical su uso es únicamente en el 1.5% de las viviendas.

Dentro de los resultados de la encuesta se menciona que de las viviendas de la región cálida extrema, que cuentan con aislamiento térmico, el 89% lo tienen en techos, el 22.5% en paredes, y el 13.9% en ventanas. Asimismo, dentro de las estadísticas presentadas como parte de las acciones y programas del sector residencial de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), se identificó que cinco estados son los que tienen el mayor número de viviendas con al menos un elemento de aislante térmico: Sonora con 395,534 viviendas, Chihuahua con 203,351 viviendas, Baja California con 167,466 viviendas, Coahuila con 149,937 viviendas y Nuevo León con 124,365 viviendas (CONUEE, 2021).

A través de los años se han conducido investigaciones sobre la combinación de caucho reciclado con materiales de construcción; sin embargo, aún es necesario profundizar en esta temática, ya que no se han encontrado resultados óptimos, especialmente, para el mejoramiento de las propiedades mecánicas en los materiales propuestos. Ya que se ha observado que los modelos que incorporan caucho de neumáticos, como agregado en el concreto, tienen la desventaja de que las partículas de goma se comportan como poros vacíos afectando el rendimiento mecánico del concreto (Rashid *et al.*, 2019). Este tipo de investigaciones da una pauta para visualizar que el comportamiento mecánico del caucho es complejo, y es difícil de equiparar con un material convencional de construcción.

Una forma de evitar esta situación es el explorar las propiedades del neumático no sólo como un material particulado, agregado a mezclas

cementosas, sino a través de la producción de un material en forma de placa, lámina o película, para ser incorporada en techos, pisos o muros y lograr mejorar el confort térmico. Sin duda, esto contribuirá a la mejora de la construcción de edificaciones, a la reducción de las emisiones de CO₂, generadas por el uso de energía en edificaciones y a las relacionadas a la producción de nuevos materiales.

El contar con esta diversidad de climas y con una gran cantidad de localidades con condiciones climáticas extremas no favorece a la habitabilidad en la mayoría de las edificaciones, especialmente, en las temporadas de verano e invierno. Ciertamente, es complejo asumir la responsabilidad de la problemática presentada, sin embargo, esto representa una interesante oportunidad para la búsqueda de nuevas aplicaciones para los neumáticos de desecho, y para contribuir hacia la sostenibilidad en las edificaciones.

Frente a las situaciones ambientales que acarrearán los neumáticos de desuso y la utilización de recursos energéticos, debidos al efecto del clima en edificios, este estudio propone combinar ambas situaciones para otorgarle una valorización a los desechos de los neumáticos a través de la mejora de los sistemas constructivos. En el presente trabajo de investigación se diseñó, sintetizó y evaluó un compuesto, empleando partículas finas de llanta como relleno de una matriz de poliuretano comercial, empleando como aditivo una resina natural de pino, con el objetivo de evaluar la conductividad térmica con prospección a emplearse en aislamiento térmico de edificaciones. Un objetivo de la experimentación realizada fue el de verificar la propiedad térmica del material; una siguiente fase será delimitar la aplicación del material como propuesta constructiva a través del conocimiento de las propiedades mecánicas.

Métodos

En la sección de métodos se presentan, inicialmente, las generalidades de los materiales considerados para el diseño y la síntesis del compuesto de interés. Los procesos experimentales que se describen en esta sección detallan los materiales usados en la experimentación y la medición de las propiedades de conductividad térmica (k) y densidad (ρ). Los materiales utilizados fue-

ron polvo de neumático, resina de pino y los reactivos propoxilato-B-etoxilato de glicero y el disocianato de polimetilenopolifenilo para la síntesis del poliuretano. Posteriormente, se presenta el diseño experimental del material compuesto y el proceso de síntesis. Finalmente se detallan las propiedades medidas experimentalmente para el material resultante (conductividad térmica y densidad).

Generalidades de los materiales utilizados

Neumáticos

El caucho natural ha sido un elastómero por excelencia debido a la practicidad para modificar sus propiedades; tal es el caso de la vulcanización, método empleado para la obtención de elastómeros sintéticos y que le confiere estabilidad y mayor tiempo de vida a los neumáticos. La composición actual del neumático viene dada por derivados de petróleo, gas natural y acetileno, constituyendo al caucho estireno-butadieno (caucho SBR), cuyas propiedades se asimilan a las del caucho natural. Esta constitución tiene la ventaja de poder transformarse con el uso de aditivos, para lograr mejorar las propiedades mecánicas del neumático, y por sí sola no logra la vulcanización, permitiendo una variedad de aplicaciones (Cardona y Sánchez, 2011).

Resina de pino

Las resinas se caracterizan por ser sustancias sólidas de consistencia pastosa, pegajosa y semitransparente obtenidas por secreción orgánica. Las resinas cuentan con alto punto de inflamación, pueden disolverse en compuestos orgánicos como el alcohol y éteres, pero no en el agua (Ramírez, 2018). Las propiedades de las resinas vegetales se relacionan con su potencial biodegradable, tienen una baja densidad, además de poseer características de aislamiento y resistencia. De manera que se destaca su interacción como reforzante en mezclas de materiales, como lo es el caucho de neumáticos de desecho para el mejoramiento de la parte mecánica del material (Gaitán,

Fonthal y Ariza Calderón, 2016). El Estado de Durango se destaca por su riqueza en vegetación, especialmente, las coníferas de la especie Pinaceae a la cual pertenecen los Pinos Ponderosa y Real, principales productores de resina (Quiroz y Magaña, 2015), además del rol ecológico que cumplen en el sector forestal por la producción maderable y no maderable (Carmen de la Paz Pérez Olvera y Dávalos Sotelo, 2016).

Colofonia

La resina de pino se constituye de una parte volátil conocida como trementina (15-20%) y de la fracción sólida o colofonia (72-78%) (Ramírez, 2018). La colofonia es una mezcla de ácidos orgánicos también conocidos como ácidos resínicos y que componen alrededor del 90% de ésta. La colofonia se identifica por su color, el cual varía de amarillo a negro, de acuerdo al método de extracción empleado, también suele ser considerada como un residuo en la destilación del fluido natural de los pinos (oleorresina). Es utilizada en la fabricación de diversos productos. Sus principales aplicaciones son en la elaboración de tintas, emulsificantes, recubrimientos, adhesivos, goma de mascar, entre otros.

La propiedad de mayor interés en la colofonia es la temperatura de reblandecimiento, pues esta afecta la compatibilidad del producto y, por lo tanto, la pegajosidad y viscosidad de la resina. Además de ser un indicativo de la temperatura a la que se puede trabajar la colofonia, ya que el exponerla a altas temperaturas induce la formación de productos de oxidación indeseables modificando la coloración de la resina (Gallo Corredor, J.A. Sarria Villa, 2013).

Poliuretano

Las primeras espumas de poliuretano se introdujeron en el mercado en 1950, su desarrollo fue tan amplio que actualmente se pueden clasificar como flexibles, semirrígidas y rígidas (Defonseka, 2013). Los poliuretanos forman parte de los materiales poliméricos, debido a su versatilidad para comportarse como termoplásticos, elastómeros o termoendurecibles, volviéndose adecuados para aplicaciones de adhesivos, selladores, revestimientos

o fibras (Minnath, Mehar A., Purushothaman, 2017). Además de que este comportamiento le permite modificar su microestructura para mejorar propiedades mecánicas como rigidez, flexibilidad o elasticidad y propiedades amortiguadoras, como resistencia al impacto o abrasión (Somarathna, Raman, Mohotti, Mutalib y Badri, 2018).

El poliuretano se ha procesado junto con otros materiales para proveer alta tenacidad y ductilidad, resistencia al impacto y lograr un aislamiento acústico eficiente. Por lo que, al reforzar las espumas con otros materiales e introducirlos a la matriz del polímero, se ha logrado un gran avance, especialmente, en aplicaciones para la industria de la construcción (Somarathna *et al.*, 2018). Hejna y colaboradores (2020), al incursionar en el potencial de las llantas de desecho, como un modificador de bajo costo para las espumas de poliuretano, encontraron que los residuos de llanta tienen propiedades de dureza y elasticidad superiores al caucho natural, por lo que su utilización para evitar impactos por daños en edificios es viable, esto sin dejar a un lado que se puede trabajar el neumático en casi todas las condiciones ambientales, por su capacidad de tolerar diversas temperaturas (Hejna *et al.*, 2020).

Materiales

Los reactivos empleados para generar la espuma de poliuretano fueron el propoxilato-B-etoxilato de glicero y el disocianato de polimetilenopolifenilo, los cuales son productos de grado industrial para la obtención del poliuretano. En las tablas 1 y 2, se muestran las principales características y propiedades de los componentes utilizados, mientras que en la tabla 3 se muestran las propiedades del poliuretano comercial adquirido. La información de las tablas 1, 2 y 3 se extrajeron de las fichas técnicas de los reactivos utilizados.

Tabla 1. Especificaciones del polioli para espuma de poliuretano

Variable	Parámetro
Nombre (identificación)	Propoxilato-B-etoxilato de glicero (CAS-9082-00-2)
Fórmula química	$C_8H_{22}O_7$
Peso molecular	230.26 g/mol
Densidad relativa	1.017 g/mL a 25°C

Tabla 2. *Especificaciones del isocianato para espuma de poliuretano*

Variable	Parámetro
Nombre (identificación)	Disocianato de polimetilenopolifenilo (CAS-9016-87-9)
Fórmula química	$C_6H_3(NCO)CH_2n$
Punto de ebullición	200°C
Densidad relativa	1.2 g/mL a 25°C

Tabla 3. *Propiedades del poliuretano comercial*

Variable	Parámetro
Gravedad específica (1 kg de sistema)	25-30 l
Tiempo de secado al tacto (a 25°C)	20-25 min
Tiempo de endurecimiento (a 25°C)	1.5-2 h
Absorción de agua	1% vol
Resistencia a la compresión	0.04-0.06 MPa
Resistencia a la tensión	0.06-0.08 MPa
Elongación	25%
Conductividad térmica (a 20°C)	0.039 W/m-K

Otro componente utilizado fue la resina de pino natural que fue incorporada como medio reforzante del material compuesto. La resina de pino fue extraída por el método de resinación francés o Hugues, modificado para México, con una temperatura de reblandecimiento de 68°C (*Diario Oficial de la Federación*, 2006; Rojas Rodríguez, 2019). En la tabla 4 se muestran las propiedades de la resina de pino también conocida como colofonia, obtenidas de la ficha técnica del proveedor.

Tabla 4. *Propiedades de la colofonia (resina de pino)*

Variable	Parámetro
Punto de inflamabilidad	187 °C
Densidad	1.1 g/cm ³
Punto de fusión	100-150 °C
Índice de acidez	151.2
Solubilidad en agua	insoluble
Viscosidad	858.71 cps

Finalmente, en la tabla 5, se muestran las propiedades del caucho utilizado en esta investigación. El caucho fue adquirido en forma de polvo, con tamaño de partícula correspondiente a malla 30, y se le midió la conductividad térmica en el laboratorio a través de la técnica de medición del flujo

de calor bajo un equipo que opera bajo la normativa ASTM C518 (ASTM International, 2021) y la ISO 8301 (ISO/TC 163/SC 1 Test and Measurement Methods, 2019).

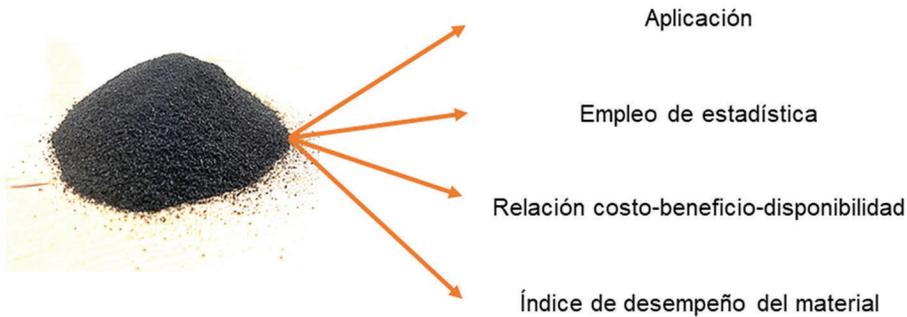
Tabla 5. *Propiedades del polvo de caucho*

Variable	Parámetro
Tamaño (malla / abertura)	# 30 / 0.595 mm
Densidad/Volumen (picnómetro de gas)	0.83 (Bekhiti, Trouzine, & Asroun, 2014)
Conductividad térmica (a 32.5°C)	0.09251 W/m-K

Diseño del material y diseño experimental

Previo a la síntesis para la obtención de las espumas, se analizó el diseño del material con base en los factores mostrados en la figura 1.

Figura 1. *Diseño del material*



De lo anterior fue importante definir la aplicación que tendría el material compuesto; en este caso, se buscó la obtención de un material aislante con prospección a implementarse en futuros sistemas constructivos de edificaciones y en sustitución por las espumas de poliuretano que se utilizan convencionalmente. Es importante destacar el costo-beneficio que ofrece este nuevo material y la disponibilidad para su adquisición, para evaluar el comportamiento mecánico y térmico de los materiales en la mezcla y obtener la mejor de ellas.

El material de estudio consta de la fase matricial de tipo polimérica y un reforzante igualmente polimérico. Debido a la forma de los materiales, se pudo obtener un compuesto particulado caracterizado por un medio líquido

siendo el polímero de interés y, como medio sólido, las partículas del polvo de llanta.

Para desarrollar la formulación de las muestras y por ser un estudio de tipo exploratorio, se empleó un diseño experimental de mezclas de tipo vértices extremos. Este tipo de diseño se caracteriza por abarcar únicamente una pequeña región del espacio de estudio, delimitadas las proporciones de los componentes a ciertos valores, puesto que, en la mezcla en cuestión, no tiene sentido plantear que existirá una mezcla con 100% de algún componente (Anderson Cook, 2008).

Las restricciones de cada uno de los componentes de la mezcla de estudio se establecieron de acuerdo a lo reportado en estudios anteriores, para compositos similares, donde se comprobó que agregando hasta un 24% en peso de colofonia es suficiente para producir espumas con una buena estabilidad térmica (Hsieh y Chen, 2020). En el caso del caucho de neumáticos, se ha reportado que cantidades entre el 15-20% en peso afectan las propiedades del material aislante, provocando incluso una degradación del mismo (Hejna *et al.*, 2020; Piszczyk, Hejna, Danowska, Strankowski y Formela, 2015).

Considerando estos datos, se efectuó una experimentación preliminar, donde fue posible delimitar las restricciones adecuadas para el estudio, encontrando como parámetros del diseño experimental los reportados en la tabla 6.

Tabla 6. *Parámetros del diseño experimental*

Componentes de la mezcla	Fotografía	Restricción	Variable de respuesta
Resina de pino		8.02 %	Conductividad térmica
Caucho		12.50 %	
Poliuretano (PU)		Sin restricción	

Para evaluar el comportamiento de la resina y el polvo de llanta en la matriz de poliuretano al formar el composito, se seleccionó como variable

de respuesta la conductividad térmica. Con base en lo anterior, la tabla del diseño de vértices extremos quedó como se muestra en la tabla 7, teniendo como total 9 muestras, con una réplica.

Tabla 7. *Composiciones de las mezclas*

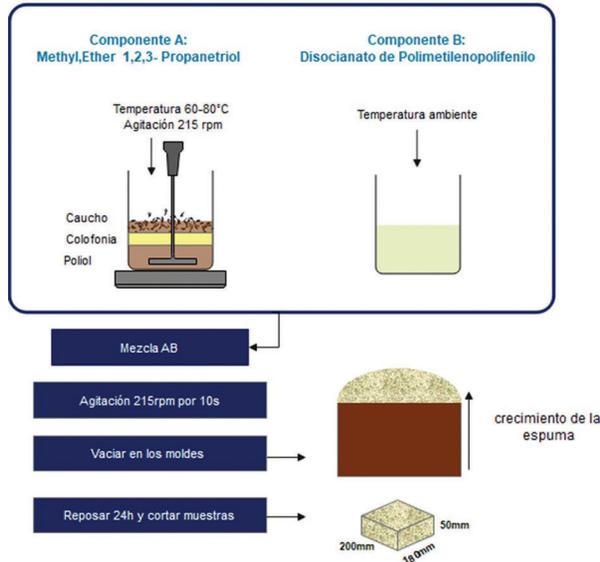
Muestra #	Porcentaje en peso (%)		
	Resina	Caucho	Poliuretano
1	0.00	0.00	100.00
2	8.02	0.00	91.98
3	0.00	12.50	84.50
4	8.02	12.50	79.48
5	4.01	6.25	89.74
6	2.01	3.13	94.87
7	6.02	3.13	90.86
8	2.01	9.38	88.62
9	6.02	9.38	84.61

Síntesis del material compuesto

Las espumas rígidas de poliuretano se sintetizaron experimentalmente siguiendo el método conocido como “One-Shot” (Hirzin, Yahya y Hassan, 2018), el cual se refiere a una reacción del isocianato de producto del fabricante, con el polioliol, la resina de pino y el polvo de llanta (caucho). Primero, se calentó el polioliol a baño maría (60-80°C) y se añadió la resina en pequeñas porciones para lograr una dispersión homogénea, bajo agitación mecánica con una propela a 215 rpm. Es importante mencionar que este proceso puede extenderse hasta tres horas, para los casos donde se utilizó la proporción más grande de colofonia.

Una vez dispersa la resina, se agregó el polvo de llanta a la mezcla y se agitó (215 rpm) hasta obtener una mezcla homogénea, misma que fue pasada a un recipiente de polipropileno de 400 ml de capacidad. Finalmente, se adicionó el isocianato en la mezcla y se agitó por 10 segundos; este tiempo fue el requerido para esperar la expansión de la mezcla. Rápidamente se vació la mezcla en moldes de 250×185×150 mm, previamente forrados con papel aluminio para su fácil desmolde. Las espumas de poliuretano obtenidas se dejaron reposar y secar por 24 horas y después fueron cortadas para

Figura 2. Esquema de la síntesis de las espumas de poliuretano.



tamaños de muestra de 200×180×50 mm. En la figura 2 se esquematiza la preparación de las espumas.

Propiedades del material

Conductividad térmica

El concepto de conductividad térmica se refiere a la propiedad termofísica de los materiales que señala la capacidad para conducir calor. Cuando un material presenta una conductividad térmica alta, esto significa que se tiene una buena conducción de calor, al contrario, materiales con una conductividad térmica baja señala que son aislantes o malos conductores del calor (Cengel, 2007). La conductividad térmica está cercanamente relacionada a la temperatura y va ligada de la estructura interna, humedad y composición química de los materiales. En el caso de composites, la transferencia de calor dependerá de la conductividad térmica de cada uno de los materiales o fases que lo conforman (Peña Rodríguez, G., Peña Quintero, J. Y. y Gómez Tovar, 2014).

Es común utilizar transductores de flujo de calor para la medición de la conductividad térmica de los materiales; estos medidores constan de placas que permiten entender el comportamiento térmico de los materiales. En este tipo de equipos, se mide el espesor real de la muestra y se establece una diferencia de temperatura, que es definida por el operador y que, normalmente, está en concordancia con las normas y lineamientos para la medición de esta propiedad. El equipo mide el flujo de calor que pasa a través de la muestra de interés, el cual es medido a través de dos transductores de flujo de calor, tanto en la superficie inferior y superior de la muestra (Collings, 1986). Los resultados de la conductividad térmica son calculados a través de la Ley de Fourier; esta ley describe la conducción de calor, la cual sucede siempre y cuando exista una diferencia de temperaturas entre dos puntos.

El comportamiento térmico del material compuesto fue evaluado con el equipo FOX-200, de acuerdo a la ASTM C518 (ASTM International, 2021) y la ISO 8301 (ISO/TC 163/SC 1 Test and Measurement Methods, 2019). El equipo tiene la capacidad de medir la conductividad térmica en materiales desde 0.035 hasta 2.5 W/m·K, con una resolución de temperatura de ± 0.01 °C, una precisión de $\pm 1\%$ y una reproducibilidad de $\pm 0.5\%$. Las mediciones se llevaron a cabo a temperaturas de (a) 20 °C y 45 °C, y (b) 30 °C y 55 °C, en las placas fría y caliente, a las cuales les corresponde una temperatura promedio de 32.5 °C ($T_{\text{prom-a}}$) y 42.5 °C ($T_{\text{prom-b}}$), respectivamente.

Densidad

La propiedad de densidad es la magnitud física que se refiere a la relación de la masa de un cuerpo (m) y su volumen (V). El cálculo de la densidad se realizó conforme a la ASTM D1622-20 (ASTM International, 2020), la cual se refiere al método de prueba estándar para la determinación de la densidad aparente en materiales rígidos celulares. Debido a que el material de interés es un objeto que tienen masa y volumen que pueden ser medidos con precisión, el cálculo de la densidad fue realizada con la información de cada una de las muestras. El material se seccionó en cubos de 40×40×40 mm, los cuales fueron pesados por triplicado. Finalmente, se calculó la densidad del total de especímenes.

Resultados

Comportamiento global de las muestras

Por la apariencia final que tuvieron las espumas sintetizadas, con diferentes composiciones de polvo de llanta y resina, se pudo observar variabilidad en la coloración, rigidez y tamaño de burbuja de aire, por lo que físicamente se pueden observar espumas de diferente calidad, debido a la cantidad de caucho y colofonia presente en la matriz de poliuretano (ver figura 3).

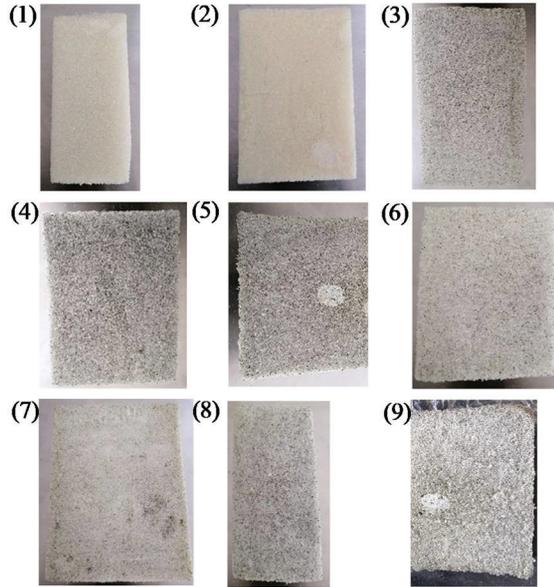
Conforme a lo reportado en la literatura sobre el empleo de rellenos, para la mejora de propiedades térmicas y mecánicas de materiales (Husainie *et al.*, 2021), se esperaría que a mayor contenido del polvo de llanta se obtuvieran espumas con mejores propiedades térmicas y mecánicas, tales como mayor fuerza y rigidez. Sin embargo, particularmente, las muestras 3 (0% de resina y 12.5% de caucho, ver tabla 7) y 6 (2.01% de resina y 3.13% de caucho, ver tabla 7) mostraron un comportamiento similar de degradabilidad temprana en el que el material se comprime, perdiendo aire. Comprobando, de esta manera, que la adición de resina en porcentajes mayores es esencial para proveer de esa rigidez y soporte a las espumas, para así poder cumplir con su papel como reforzante.

Las espumas con 6.02% de colofonia y 9.38% de caucho (muestra 9, ver tabla 7) presentaron humedad, esto a pesar del tiempo de reposo (24 h). Finalmente, la muestra con proporciones en los límites de composición se comportó de acuerdo a lo observado en otros trabajos (Piszczyk *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2020), donde a mayor contenido de polvo de llanta, hay una reducción del tamaño de los espacios de aire de las espumas; esto también se observó en el resto de las muestras que, en conjunto, llevan cantidades superiores al 2.01% de resina.

Conductividad térmica

La tabla 8 muestra los resultados de la conductividad térmica a las temperaturas evaluadas para cada una de las espumas, por su contenido de resina

Figura 3. Apariencia final de las muestras



y caucho. Recordando que la muestra 1 está compuesta de 100% poliuretano. La medición se realizó para las temperaturas promedio de ($T_{\text{prom-a}}$) $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y ($T_{\text{prom-b}}$) $42.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

De acuerdo con los resultados de conductividad térmica, las espumas mostraron un buen desempeño térmico. Puede observarse que las muestras arrojaron conductividades por debajo de los $0.059\text{ W/m}\cdot\text{K}$, con excepción de la muestra 1 (poliuretano puro). De acuerdo a la ficha técnica del poliuretano comercial, su conductividad térmica debería ser de $0.039\text{ W/m}\cdot\text{K}$; sin embargo, al evaluarse varias probetas de este material se obtuvieron valores de conductividad térmica entre $0.076\text{ W/m}\cdot\text{K}$ y $0.079\text{ W/m}\cdot\text{K}$. Esto, aun cuando la mayoría de los poliuretanos muestran conductividades más bajas (alrededor de 0.03 y $0.04\text{ W/m}\cdot\text{K}$).

Los resultados de la conductividad térmica de las probetas que contienen distintas fracciones de resina de pino y caucho se consideraron como satisfactorios; especialmente, los obtenidos a una temperatura promedio de $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{prom-a}}$), ya que se obtuvieron conductividades térmicas desde $0.041\text{ W/m}\cdot\text{K}$ hasta $0.058\text{ W/m}\cdot\text{K}$. Asimismo, los materiales sintetizados fueron considerados como viables para la aplicación en forma de placa

aislante en edificaciones. La muestra con menor conductividad térmica fue la número 8, la correspondiente a la espuma de 2.01% de resina y 9.38% de caucho.

Tabla 8. *Conductividad térmica de las mezclas*

Muestra #	Conductividad térmica (W/m·K)	
	T _{prom-a} 32.5 °C	T _{prom-b} 42.5 °C
1	0.076	0.079
2	0.058	0.049
3	0.051	0.052
4	0.050	0.055
5	0.049	0.051
6	0.052	0.059
7	0.050	0.051
8	0.041	0.042
9	0.046	0.047

Conclusiones

Las herramientas de análisis estadístico utilizadas ayudan a predecir la proporción de ingredientes que permiten mejorar la propiedad térmica del material. Y de forma particular, el diseño de vértices extremos utilizado en este estudio establece la pauta para estudios futuros en los que se desee optimizar la síntesis de las espumas.

Las espumas que incluyeron en su formulación mayor cantidad de relleno con el polvo de caucho son las que visualmente tienen mayor disminución de espacios de aire. También se observó que las muestras de mayor contenido de resina o por encima de la proporción 2.0%, muestran mayor rigidez y calidad en la distribución de los huecos de aire. Con lo anterior, se constata lo esencial de la prevalencia de los tres ingredientes en la síntesis del material para garantizar esa calidad. Adicionalmente, es importante mencionar que la aplicación de este material en las edificaciones se daría, predominantemente, en forma de placa o espuma. Por lo que, aunque es necesario conocer sus propiedades mecánicas, no será crucial el alcanzar ciertas propiedades mecánicas, como lo es para los sistemas constructivos donde se tiene carga estructural.

Finalmente, con los resultados de los ensayos se concluye que hasta el momento el material con mejor comportamiento térmico fue la muestra 8 ($T_{\text{prom-a}} = 32.5 \text{ }^\circ\text{C}$). Sin embargo, la mayoría de las espumas sintetizadas mostraron una conductividad térmica baja en las temperaturas promedio a las cuales se evaluó el material ($T_{\text{prom-a}} = 32.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y $T_{\text{prom-b}} = 42.5 \text{ }^\circ\text{C}$).

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el otorgamiento de la beca con número de apoyo 757887 y al apoyo económico brindado por el posgrado del Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV). También al M.C. Luis Arturo Torres Castañón de CIMAV Subsede Durango, quien acompañó y apoyó en la realización de la experimentación.

Bibliografía

- Alcaldía Mayor de Bogotá (2014). Proyecto de Acuerdo 342 de 2014 Consejo de Bogotá D.C. Mediante el cual se dictan disposiciones que permitan implementar un sistema de gestión y recolección selectiva de llantas usadas en el Distrito Capital. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=60039>
- Alyousef, R., Ahmad, W., Ahmad, A., Aslam, F., Joyklad, P. y Alabduljabbar, H. (2021). Potential Use of Recycled Plastic and Rubber Aggregate in Cementitious Materials for Sustainable Construction: A Review. *J. Clean. Prod.* 329, 129736. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129736>.
- Al-Attar, A. A., Hamada, H.M., Tayeh, B.A. y Awoyera, P. O. (2022). Exploring Engineering Properties of Waste Tire Rubber for Construction Applications-a Review of Recent Advances. *Mater. Today Proc.* 53, A1–A17. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.228>.
- Anderson-Cook, C. M. (2008). Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses. *Journal of the American Statistical Association*, 103(482), 888–888. <https://doi.org/10.1198/jasa.2008.s238>
- ASTM International (2020). ASTM D1622-20. Standard Test Method For Apparent Density Of Rigid Cellular Plastics. United States. <https://webstore.ansi.org/Standards/ASTM/astmd162220>
- . ASTM C518-21. Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission

- Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. United States. <https://www.astm.org/standards/c518>
- Bekhiti, M., Trouzine, H. y Asroun, A. (2014). Properties of Waste Tire Rubber Powder. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 4(4), 669–672. <https://doi.org/10.48084/etasr.439>
- Cachaço, A. G., Afonso, M. D. y Pinto, M. L. (2013). New Applications for Foam Composites of Polyurethane and Recycled Rubber. *Journal of Applied Polymer Science*, 129(5), 2873–2881. <https://doi.org/10.1002/app.38962>
- Cardona, L. y Sánchez, L. M. (2011). Aprovechamiento de llantas usadas para la fabricación de pisos decorativos. *Dyna*, 205.
- Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa* (3ª ed.). McGraw-Hill.
- Chen, L., Meng, X., Liu, G., Zhao, J. y Liu, Z. (2022). Investigation of a New Type of Thermal Insulation Shotcrete with Silicone Rubber Tubes (SSRT). *Constr. Build. Mater.* 338, 127631. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127631>.
- Collings, E. W. (1986). Thermal Conductivity. *Applied Superconductivity, Metallurgy, and Physics of Titanium Alloys. The International Cryogenics Monograph Series*. Boston, MA: Springer. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2095-1_6
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (2020). Eficiencia energética en el confort térmico en viviendas de clima cálido en México. *Cuadernos de La Conuee*, 5. <https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuaderno5nvo-ciclo.pdf>
- (2021). Servicios energéticos, Confort térmico. <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/servicios-energeticos-confort-termico?state=published>
- Defonseka, C. (2013). *Practical Guide to Flexible Polyurethane Foams*. Shrewsbury: Smithers Rapra.
- De la Paz Pérez Olvera, Carmen y Dávalos Sotelo, R. (2016). Anatomía de la madera de seis especies de Pinus (Pinaceae) del estado de Durango, Mexico. *Madera y Bosques*, 22(3), 113–132. <https://doi.org/https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231460>
- Derakhshan, Z., Ghaneian, M. T., Mahvi, A. H., Oliveri Conti, G., Faramarzián, M., Dehghani, M. y Ferrante, M. (2017). A New Recycling Technique for the Waste Tires Reuse. *Environmental Research*, 158, 462–469. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.07.003>
- Diario Oficial de la Federación* (2006). NOM-026-SEMARNAT-2005, Que establece los criterios y especificaciones técnicas para realizar el aprovechamiento comercial de resina de pino México. <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3340/1/nom-026-semarnat-2005.pdf>
- Dissanayake, D.G.K., Weerasinghe, D.U.; Thebuwanage, L.M. y Bandara, U. A. N. (2021). An Environmentally Friendly Sound Insulation Material from Post-Industrial Textile Waste and Natural Rubber. *Journal of Building Engineering*, 33, 101606. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101606>
- Fazli, A. y Rodrigue, D. (2020). Waste Rubber Recycling: A Review on the Evolution and Properties of Thermoplastic Elastomers. *Materials*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/ma13030782>

- Gaitán, A., Fonthal, G. y Ariza Calderón, H. (2016). Fabricación y propiedades físicas de aglomerados de *Pennisetum purpureum schum*, *Philodendron longirrhizum* y *Musa acuminata*. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(1), 5–11. <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v25n1/rcta01116.pdf>
- Gallo Corredor, J.A. Sarria Villa, R. (2013). Obtención de colofonia y trementina a partir de resina de pino de la especie *patula* y posterior evaluación de los parámetros de calidad. *Departamento de Química, Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de La Educación. Grupo de Investigación En Química Analítica. Universidad Del Cauca*, 5(1), 88–91.
- Hejna, A., Korol, J., Przybysz-Romatowska, M., Zedler, Ł., Chmielnicki, B. y Formela, K. (2020). Waste Tire Rubber as Low-Cost and Environmentally-Friendly Modifier in Thermoset Polymers—A Review. *Waste Management*, 108, 106–118. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.032>
- Hirzin, R. S. F. N., Yahya, R. y Hassan, A. (2018). Preparation of One-Shot and Two-Shot Method of Semi-Rigid Polyurethane Film Based on Functionalized Liquid Natural Rubber. *AIP Conference Proceedings* 1985, 050006. <https://doi.org/10.1063/1.5047200>
- Hsieh, C. C. y Chen, Y. C. (2020). Synthesis of Bio-Based Polyurethane Foam Modified with Rosin Using an Environmentally-Friendly Process. *Journal of Cleaner Production*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124203>
- Husainie, S. M., Deng, X., Ghalia, M. A., Robinson, J. y Naguib, H. E. (2021). Natural Fillers as Reinforcement for Closed-Molded Polyurethane foam Plaques: Mechanical, Morphological, and thermal properties. *Materials Today Communications*, 27, 102187. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102187>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (2016). Estadísticas a propósito de la industria hulera. Ciudad de México. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825086251.pdf
- (2018). Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI). <https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/>
- (2022). Climatología. Recuperado el 31 de mayo de 2022: <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
- ISO (2019). ISO/TC 163/SC 1 Test and Measurement Methods. ISO 8301:1991 Thermal Insulation Determination of Steady-State Thermal Resistance and Related Properties-Heat flow Meter Apparatus. <https://www.iso.org/standard/15421.html>
- Martinez Komatsu, C. (2021). Informe de mercado mundial. Caucho y cacao. Encuesta mensual del sector servicios. Bogota. <https://educacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Pasa-la-Voz-Enero-2021.pdf>
- Minnath, Mehar A. y Purushothaman, E. (2017). Chapter 2 - Blends and Interpenetrating Polymer Networks Based on Polyurethane Polymers With Natural and Synthetic Rubbers. *Polyurethane Polymers. Blends and Interpenetrating Polymer Network. Elsevier*, 17–44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804039-3.00002-6>
- Peña Rodríguez, G., Peña Quintero, J. Y. y Gómez Tovar, M. A. (2014). Determinación Experimental de la Conductividad Térmica Efectiva en Bloques Extinguidos de Arci-

- Ila Roja. *Revista Ciencia en Desarrollo*, 5(1), 15–20. <http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v5n1/v5n1a02.pdf>
- Piszczyk, L., Hejna, A., Danowska, M., Strankowski, M. y Formela, K. (2015). Polyurethane/Ground Tire Rubber Composite Foams Based on Polyglycerol: Processing, Mechanical and Thermal Properties. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(9), 708–717. <https://doi.org/10.1177/0731684415579089>
- Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho (2015). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/190012/Plan_de_Manejo_de_Neumaticos_Usados.pdf
- Quiroz, J. y Magaña, M. (2015). Resinas naturales. *Madera y Bosques*, 21(3), 171–183.
- Ramírez, H. D. L. R. (2018). Variación de las propiedades estructurales, térmicas y mecánicas del Poli (ácido láctico) por medio del empleo de aditivos derivados de la resina de pino [Tesis de Maestría]. Universidad Politécnica de Valencia.
- Rashid, K., Yazdanbakhsh, A. y Rehman, M. U. (2019). Sustainable Selection of the Concrete Incorporating Recycled Tire Aggregate to Be Used as Medium to Low Strength Material. *Journal of Cleaner Production*, 224, 396–410. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.197>
- Reisman, J. I. y Lemieux, P. M. (1997). Emisiones al Aire de la Combustión de Llantas Usadas, 124.
- Rigotti, D. y Dorigato, A. (2022). Novel Uses of Recycled Rubber in Civil Applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 5(4), 214–233. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.08.005>
- Rojas Rodriguez, G. (2019). *Evaluación de dos estimulantes de baja toxicidad, en la resinación de Pinus Pringlei Shaw*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/1469
- Sienkiewicz, M., Janik, H., Borzędowska-Labuda, K. y Kucińska-Lipka, J. (2017). Environmentally Friendly Polymer-Rubber Composites Obtained from Waste Tyres: A Review. *Journal of Cleaner Production*, 147, 560–571. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.121>
- Silva, N. G. S., Cortat, L. I. C. O., Orlando, D. y Mulinari, D. R. (2020). Evaluation of Rubber Powder Waste as Reinforcement of the Polyurethane Derived from Castor Oil. *Waste Management*, 116, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.032>
- Somarathna, H. M. C. C., Raman, S. N., Mohotti, D., Mutalib, A. A. y Badri, K. H. (2018). The Use of Polyurethane for Structural and Infrastructural Engineering Applications: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 190, 995–1014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.166>
- Yang, Y.-L., Zhang, T., Reddy, K. R., Li, J. S. y Liu, S. (2022). Thermal Conductivity of Scrap Tire Rubber-Sand Composite as Insulating Material: Experimental Investigation and Predictive Modeling. *Construction and Building Materials*, 332, 127387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127387>
- Zafar, F. y Sharmin, E. (2012). *Polyurethane*. Intechopen. <https://doi.org/10.5772/2416>

Capítulo 5. Determinantes sociodemográficos de urbanización y climáticos en el consumo doméstico de energía eléctrica en Hermosillo, Sonora

ARTURO OJEDA DE LA CRUZ*

GERARDO RAMÍREZ URIBE**

ALDO APODACA MENDOZA***

Resumen

El presente artículo ofrece resultados de una investigación que se llevó a cabo para explorar los determinantes de consumo doméstico de energía eléctrica (kWh) en Hermosillo, Sonora, México. Se determinó un modelo de regresión lineal a nivel de AGEB utilizando mínimos cuadrados ordinarios. Para tal efecto, los autores utilizamos el valor mensual del consumo de energía eléctrica, registrado en las viviendas habitadas que se ubican en la ciudad proporcionado por la Comisión Federal de Electricidad. Asimismo, los datos de indicadores sociodemográficos censales de INEGI, referente a los diferentes grupos de población y sus características socioeconómicas. Se tomaron en cuenta los valores promedio de las variables climáticas temperatura, precipitación pluvial y humedad relativa, registrados en la Comisión Nacional del Agua. El análisis reveló que las variables estadísticamente significativas, que explican el consumo de energía eléctrica en el hogar con una explicación del 36.6%, fueron: viviendas que tienen Internet, habitantes del género femenino, habitantes de 65 años y más, densidad de vivienda y la

* Doctor en Filosofía en Asuntos Urbanos. Universidad de Sonora, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4513-514X>

** Doctor en Gestión y Valoración Urbana y Arquitectónica. Universidad de Sonora, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7036-764X>

*** Posgrado en Desarrollo Sustentable. Universidad de Sonora, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9582-906X>

precipitación pluvial del periodo verano-otoño. Los resultados pueden contribuir a mejorar la comprensión de los factores que influyen en el uso de la energía eléctrica en el hogar, y pueden ser útiles en el desarrollo de políticas para promover su uso eficiente.

Palabras clave: *Análisis multivariado, consumo de energía eléctrica, clima, determinantes.*

Abstract

This paper provides results of a research study carried out to explore the determinants of household electricity consumption (kWh) in Hermosillo, Sonora, Mexico. A linear regression model was determined at the AGEB level using ordinary least squares. For this purpose, the authors used the monthly value of electricity consumption registered in the inhabited dwellings located in the city provided by the Federal Electricity Commission. In addition, INEGI census sociodemographic indicator data on the different population groups and their socioeconomic characteristics were used. The average values of the climatic variables temperature, rainfall and relative humidity recorded by the National Water Commission were taken into account.

The analysis revealed that the statistically significant variables explaining household electricity consumption with an explanation of 36.6% were: dwellings with internet, female inhabitants, inhabitants aged 65 years and older, housing density and rainfall in the summer-autumn period. The results can contribute to a better understanding of the factors that influence the use of electrical energy in the home, and can be useful in the development of policies to promote its efficient use.

Keywords: Multivariate analysis, electrical energy consumption, climate, determinants.

Introducción

El consumo de energía es esencial para la vida, se ha convertido en sinónimo de actividad, de transformación y de progreso hasta tales niveles que el porcentaje de consumo de un país se mide como un factor, en su avance hacia un mayor desarrollo económico (Garrido, 2009). Se espera que la demanda de energía eléctrica aumente considerablemente en los próximos años a causa del crecimiento demográfico y del desarrollo económico (UNESCO, 2017). Como consecuencia y debido a la creciente preocupación global de la sociedad por el cuidado al medio ambiente, Maqueda y Sánchez (2008) sugieren el desarrollo y creación de instituciones, así como de políticas para coadyuvar a diseñar y aplicar programas para lograr un uso más eficiente de la energía, donde se logre un ahorro de la misma en los diversos sectores de la sociedad.

En ese sentido, Buen (*et al.*, 2016) señala que este ahorro de energía eléctrica es un elemento fundamental de las políticas públicas para el cuidado de los recursos energéticos no renovables, para la diversificación energética, la protección del medio ambiente y de un aumento de la productividad en el país. Tan sólo por la aplicación de estas políticas públicas en México, en el transcurso de un año, se logró un ahorro de 27 700 Gwh, y el acumulado de ahorro de energía, desde 1994 hasta 2008, fue de 175 000 Gwh, lo que se traduce en un ahorro de gasto por parte del consumidor y de la hacienda pública, así como una disminución considerable de contaminación (CO₂), por la generación de la energía eléctrica (Maqueda y Sánchez 2008). Esto es muy importante hoy en día, ya que la generación de energía eléctrica representa a nivel mundial el 60% del total de emisiones dañinas al medio ambiente (ONU, 2017).

Este alto porcentaje se debe a que la energía eléctrica es uno de los tipos de energías más utilizada en el mundo; su uso es esencial para el desarrollo de las actividades económicas, tecnológicas e industriales, a las familias les permite estar en condiciones más confortables y realizar acciones de forma más eficiente (Abdo *et al.*, 2017). Debido a la contaminación que la generación de energía eléctrica puede ocasionar, se han implementado fuentes alternas de generación de energía, como lo es la energía hidroeléctrica, la

cual genera electricidad de forma más barata, debido a que —una vez que la presa se ha construido y se ha instalado el equipo técnico— la fuente de energía (agua en movimiento) es gratuita (SENER, 2012). Con el aumento de la población y la preocupación de la misma, con respecto a la sustentabilidad, estas estrategias para la generación de energía son primordiales en el desarrollo de los países (Ekholm *et al.*, 2010).

La clasificación del consumo de energía eléctrica en México se enuncia en cinco sectores los cuales son: industrial, residencial, comercial, agrícola y el de servicios, siendo el sector residencial el que más creció en el periodo del 2000 al 2011, en aproximadamente un 45.3% (Morales y Luyando, 2014), lo cual demuestra la importancia de desarrollar programas que impulsen la eficiencia energética en este sector en México, pero, sobre todo, la necesidad de generar programas que estimulen una conciencia capaz de fomentar el uso racional de la electricidad en el sector residencial (Buen *et al.*, 2016). En la tabla 1 se puede apreciar el porcentaje del consumo de energía eléctrica que tiene registrado la comisión federal de electricidad (CFE) por sector, en México, durante los años 2016 y 2019, referente a los porcentajes de venta de dicha energía, siendo el consumo doméstico el segundo lugar después del sector industrial.

Tabla 1. Consumo por sector en México (porcentaje de ventas)

Sector	2016	2019
Doméstico	26.77	29.54
Agrícola	5.19	5.67
Industrial	57.04	55.91
Comercial	7.04	6.96
Servicios	3.96	1.90

Fuente: CFE (2016, 2019)

En general, de la energía eléctrica consumida en todo el Estado de Sonora, tan solo la ciudad de Hermosillo consume el 32%, y en particular, de éste porcentaje, los hogares de Hermosillo consumen el 13.5%; mientras que el sector industrial, comercial y de servicios aglutinan un 78.5% (SENER, 2017).

No obstante, la energía eléctrica es la energía secundaria más utilizada en el mundo; su uso es esencial para el desarrollo de las actividades económicas, tecnológicas e industriales, donde en la producción es utilizada en

la mayoría de los procesos, y a las familias este recurso les permite realizar sus actividades cotidianas en condiciones más cómodas, por lo tanto, su uso es primordial para el desarrollo social y económico del país (Morales y Luyando, 2014).

Problemática global con el uso de la energía

Con el crecimiento económico, diversas fuentes han expresado que a nivel global la población aumente conforme pasan los años, siendo que para el año 2030 la población que habita en las áreas urbanas se incrementará en 2,900 millones de personas. Esto significa que habrá aproximadamente 5,900 millones en el año 2030 y alrededor de 6,000 millones de habitantes para el 2050 (ONU, 2014). Tal aumento de población traerá como consecuencia una alta demanda de los servicios básicos, siendo uno de ellos el consumo de energía, por lo que se pueden esperar presiones en los servicios ofrecidos por los países en sus diferentes sectores de consumo de energía eléctrica (Chu *et al.*, 2014).

Así entonces, los mercados energéticos nacionales y mundiales se enfrentan a un crecimiento explosivo de la población, a la rápida penetración de los modernos sistemas de vivienda, a la escasez mundial de energía y al aumento de los precios de la energía (Guan y Tso, 2013). Dentro de este contexto, la población en México ha aumentado más de cuatro veces en los últimos 65 años, de 25.8 millones de personas en 1950, a 128.9 millones, en 2020 (INEGI, 2020). En ese sentido, la tendencia creciente en los niveles de población en las áreas urbanas de México incrementará la presión sobre los servicios públicos a brindar por el Estado, entre los que destaca el requerimiento de energía eléctrica y el agua.

Debido al aumento exponencial que está teniendo el consumo de energía eléctrica en el sector residencial, y con el fin de reducir su consumo, los países integrados a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) han hecho esfuerzos significativos para mejorar la eficiencia energética de los edificios residenciales, a través de la introducción de nuevas normas de construcción (Chen *et al.*, 2012). Sin embargo, debido al gran aumento de la población en el mundo, los recursos naturales para

producir la energía necesaria para abastecer a todos no están siendo suficiente; los países en pleno desarrollo son los que se enfrentan a mayores desafíos para complacer a su sociedad (Saied *et al.*, 2014), ya que existe una demanda de energía mayor a la que esta puede generar y reponer, lo que conlleva a una degradación de nuestro planeta; esto llevaría a una falta de desarrollo económico sustentable, el cual es vital para el bienestar social (Ahmad *et al.*, 2014). Como consecuencia del uso desmedido de recursos, existen fenómenos que afectan la comodidad y calidad de vida de las personas, tal como el incremento de la temperatura urbana a través de los años (Cheng y Steemers, 2011).

Al ser los combustibles fósiles las principales fuentes de producción de electricidad en el mundo (Garrido, 2009), se ha producido en el medio ambiente y en la población una contaminación desmedida que ha llevado a una contribución al cambio climático, lo cual pone en riesgo el futuro de las personas (IPCC, 2014). En las últimas décadas, los gobiernos se han enfocado en investigaciones que den como resultado los factores que afectan el consumo de energía en el hogar, para así poder plantear estrategias concisas que afecten directamente el problema (Cui *et al.*, 2017).

El aumento de los precios de la energía y la preocupación por el cambio climático han hecho primordiales los esfuerzos por la eficiencia energética en el sector de la construcción, de la energía renovable y la reutilización de los residuos; como consecuencia, muchas ciudades importantes han creado planes para el futuro que intentan reducir el consumo de energía y los gases de efecto invernadero (Hammer *et al.*, 2011). Y los responsables de la formulación de políticas se han dado cuenta de que, sin reducciones significativas de la demanda de electricidad y con aumentos significativos en la eficiencia energética del sector doméstico, será imposible reducir las emisiones de dióxido de carbono (Fuertes *et al.*, 2014). Por ello, es esencial tener políticas sobre la eficiencia de energía en los hogares, donde éstas sean diferentes a lo largo del país, ya que debido a las diversidades espaciales y económicas no es razonable proponer el mismo objetivo de reducir el consumo de energía en el hogar para todas las ciudades (Cai *et al.*, 2011). Ya que la contribución global de los hogares hacia el consumo energético hoy en día, tanto residencial como comercial, ha aumentado de forma sostenida hasta situarse entre el 20% y el 40% en los países desarrollados, superando

así a los otros sectores importantes como al industrial y de transporte (Ortiz *et al.*, 2007). Es aquí donde la comprensión de efectos de los factores que influyen el consumo de energía en los hogares puede apoyar las estrategias de reducción de tal consumo (Fuertes *et al.*, 2014).

La rápida urbanización en los países en desarrollo está poniendo énfasis en la infraestructura actual, lo que se traduce en el rápido consumo de recursos naturales para hacer frente a la creciente demanda de la población, y en los próximos años varios recursos (como los combustibles fósiles y el agua natural) se enfrentarán a una escasez si no se gestionan adecuadamente (Saied *et al.*, 2014). Por lo tanto, para reducir la emisión de carbono en las ciudades, es necesario comprender las características del consumo de energía urbana, especialmente de las edificaciones urbanas (Sad de Asis y Pereira, 2011).

Con la mejora del nivel de vida que buscan todas las personas y el aumento del área de construcción per cápita, el consumo de energía del edificio residencial se ha convertido en la rama de crecimiento más rápido (Ling *et al.*, 2014). Por lo mismo, el consumo de energía en el sector residencial ofrece una gran oportunidad para la conservación de los recursos, donde es importante comprender los determinantes del consumo de energía residencial, para el diseño e implementación de políticas eficaces que incrementen la eficiencia energética del edificio (Brounen *et al.*, 2012). Aunque los políticos suelen ser distantes al aplicar políticas estrictas, porque creen que estas pueden amenazar la calidad de vida individual, piensan que, al aplicar políticas difíciles, como aumentos sustanciales de los precios de la energía, pueden reducir la calidad de vida individual en algunos aspectos, pero también pueden aumentar la calidad de vida individual en otros aspectos, por ejemplo, mejorando la calidad ambiental y la salud de las personas (Steg, 2008).

Factores que afectan el consumo eléctrico en el hogar

El uso de electricidad en las edificaciones de tipo doméstico se debe a la necesidad de servicios energéticos de los ocupantes, como la luz, el confort y el entretenimiento, pero la energía utilizada resulta de una serie compleja

de factores relacionados e interactuantes socioeconómicos, de vivienda y de aparatos (Fuertes *et al.*, 2014), donde el papel de la energía, como mercancía global en el proceso de crecimiento económico y desarrollo, es altamente imperativo (Ahmad *et al.*, 2014).

El uso de la energía eléctrica en el hogar puede variar de acuerdo a factores demográficos, socioeconómicos, vivienda, comportamiento humano, tipo de clima, niveles educativos y culturales (Chen *et al.*, 2013). En un estudio realizado en Holanda, se llevó a cabo un análisis de regresión múltiple con varios factores de consumo como, por ejemplo, cantidad de electrodomésticos, tamaño de la vivienda, uso de electrodomésticos, y características de la vivienda, dando como resultado que el uso de los electrodomésticos explica la mayor varianza en el consumo de energía eléctrica y, segundo, las características de la vivienda (Bedir *et al.*, 2012). Mientras que los factores que resultaron para el consumo de energía eléctrica residencial en viviendas unifamiliares de Texas, EE. UU., fueron las características de los hogares, los cambios en la temperatura y el tipo de clima (Cano *et al.*, 2013).

Morales y Luyando (2014) desarrollaron un estudio para el Área Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, para investigar los factores determinantes del consumo de energía eléctrica en el hogar. En los datos analizados se aplicaron la estadística de series de tiempo, utilizando datos mensuales para el periodo de 1993 a 2010, obteniendo que el factor principal fueron los ingresos económicos percibidos por los habitantes de la región, el crecimiento demográfico fue el segundo factor con mayor consumo de electricidad, en tanto que el efecto de la temperatura media de la zona es la tercera variable que ayudó a explicar el comportamiento del consumo, de electricidad. El costo de la tarifa no tuvo impacto alguno en el consumo ya que debido a las altas temperaturas en dicha zona el consumo de esta energía es una necesidad que no se puede pasar por alto. Por su parte, Franco y Velazco (2014) realizaron un estudio del consumo de energía eléctrica y su relación con las características sociodemográficas en los hogares rurales y urbanos de México, buscando proponer políticas del uso racional de la energía eléctrica en el hogar.

Guan y Tso (2013) aplicaron un modelo de regresión múltiple para examinar indicadores ambientales y características del hogar que influyen en los consumos de energía; dicho análisis dio como resultado la ubicación

geográfica (clima), el tamaño de la vivienda, el número de personas en el hogar, siendo que el nivel de educación de los habitantes no mostró variación en el consumo de energía dentro del hogar. Otro análisis llevado a cabo en Texas, utilizando un análisis de regresión para conocer la relación entre variables independientes con la variable dependiente (consumo de energía), dio como resultado que las características demográficas, socioeconómicas y de vivienda influyen en la variación del consumo de energía de los hogares (Cano *et al.*, 2013). La comprensión de los efectos de los factores que inciden en el consumo en los hogares puede apoyar tanto la aplicación de una política energética eficaz, como la predicción del futuro consumo de electricidad en el sector nacional y mundial (Fuertes *et al.*, 2014).

Por otro lado, Belaid (2015) llevó a cabo un enfoque estadístico para explorar los determinantes del consumo de energía de los hogares en Francia, a diferencia de otros estudios que demuestran que los precios no influyen mucho en el consumo. Estos resultados revelaron que los precios de la energía eran los factores más importantes que determinaban el consumo de energía doméstica, además, el estudio mostró que las características de los ocupantes afectan significativamente el uso doméstico de energía. Wilson (2012), por su parte, realizó una investigación en Illinois, EE. UU., para determinar los factores del consumo doméstico; esto lo hizo con ayuda del método de análisis de regresión múltiple, dando como resultado de mayor impacto el tipo clima de la región, el tamaño de la vivienda, el número de dormitorios y el equipo de calefacción, ya que estos últimos son grandes consumidores de energía eléctrica si no se eligen de una manera correcta.

Materiales y métodos

El estudio se desarrolló durante el año 2017, con el propósito de identificar y conocer las variables urbanas más influyentes en el consumo de energía eléctrica, en los hogares de la ciudad capital de Sonora. Para ello se utilizaron datos secundarios cuantitativos, referentes a los consumos mensuales de energía eléctrica (kwh) en los hogares de la ciudad de Hermosillo, cuyos datos son registrados por la dependencia federal CFE, quien es responsable de ello. Asimismo, se utilizaron datos de los indicadores sociodemográficos

que registra el INEGI, derivados de los datos censales. De igual manera, se utilizaron datos climáticos referidos a la temperatura, precipitación pluvial y humedad relativa, cuya información es registrada por la Comisión Nacional del Agua a través del servicio meteorológico, utilizando en este caso los que corresponden a la Estación Climatológica Central ubicada en la ciudad, y tres estaciones adicionales ubicadas en la zona urbana, que también disponían de datos para el año de estudio 2015. Así entonces, las cuatro estaciones climatológicas fueron: Central, Aeropuerto, Misión del Sol y Altares.

La pregunta de investigación que se buscó responder en la presente investigación fue la siguiente: ¿Qué variables socioeconómicas, de urbanización y climáticas son significativas para lograr explicar el consumo doméstico de energía eléctrica a nivel de AGEB?

Los datos climáticos promedio de las estaciones climatológicas, mencionadas para el año de estudio, se indican a continuación en la tabla 1.

Tabla 1. Información climática en la zona urbana de Hermosillo, año 2015

Estación	Coordenadas geográficas	Precipitación media (mm)	Temperatura media (°C)	Humedad relativa (%)
Central	29.078 – 110.93	55.10	25.96	46.67
Aeropuerto	29.09 – 111.05	43.84	24.83	43.19
Misión del Sol	29.124 – 110.95	32.03	26.55	43.50
Altares	29.012 – 110.94	51.86	25.63	50.20

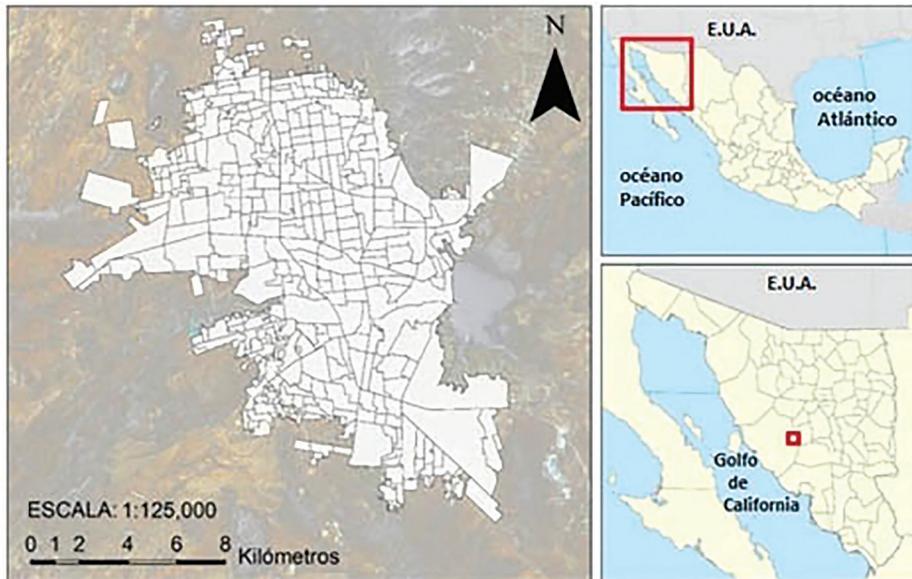
Descripción del caso de estudio

El Estado de Sonora se localiza al noroeste de México en la zona más árida del territorio nacional conocida como desierto de Sonora, que se extiende al sur de Estados Unidos de América, a través de los estados de Arizona y California y, en México, por el Estado de Baja California y Sonora. La ciudad de Hermosillo, capital del Estado de Sonora, se ubica en la parte central-poniente de la planicie costera del Estado; se dispone en la región noroeste de México a una elevación de 210 metros sobre el nivel del mar (msnm), y se localiza geográficamente (fig. 1) a los 29° 06' de latitud norte y 110° 58' de longitud oeste; concentra el 29 % de la población estatal (2 944 840 habitantes), de acuerdo a los datos censales más recientes del Instituto Nacio-

nal de Estadística Geografía e Informática (INEGI). En esta ciudad, el clima cálido desértico es predominante, prevaleciendo una temperatura máxima de 42 grados centígrados con valores extremos de 46 °C (108°F y 115 °F); la precipitación pluvial media anual registrada en la ciudad, en el período 1982 a 2015, presentó un valor de 330 mm (Conagua, 2018).

El crecimiento de la urbanización en Hermosillo ha sido creciente de

Figura 1. Localización geográfica de la zona de estudio. Se indica el área urbana de la ciudad



manera continua, ya que en el año 1950 registró una población de 43 516 habitantes, y con su elevada tasa de crecimiento de 8.2%, en la década de los cincuenta y sesenta, generó un repunte importante en la población en el año 1960 al incrementarse en un 120%. Su crecimiento demográfico continuó con altas tasas de 6.28% y 5.34% en los periodos 60-70 y 70-80. En las décadas 1980 a 2000, el crecimiento poblacional se presentó con tasas de crecimiento por encima de la media nacional (5.34%, 3.18% y 4.2%), lo cual originó una amplia extensión territorial y dispersa, generando en consecuencia una mayor exigencia en la atención y demanda en los servicios básicos urbanos (Ojeda, 2013).

Variables y bases de datos

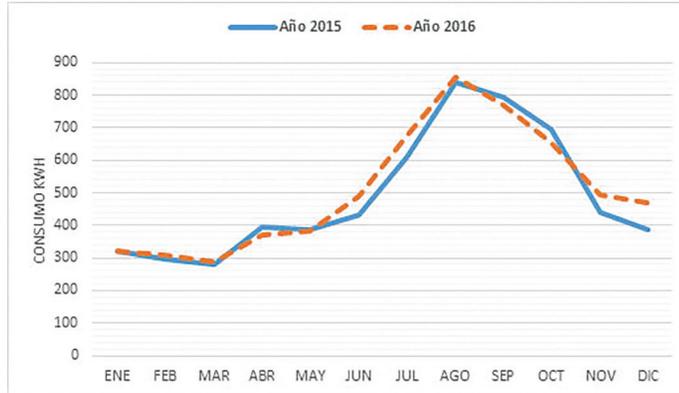
El estudio se desarrolló al nivel de Área Geoestadística Básica (AGEB), siendo éste un concepto urbano universal en México establecido por INEGI, quien lo define como: área geográfica ocupada por un conjunto de manzanas perfectamente delimitadas por calles, avenidas, andadores o cualquier otro rasgo de fácil identificación en el terreno, y cuyo uso del suelo es principalmente habitacional, industrial, de servicios y comercial.

La variable dependiente corresponde al consumo de energía eléctrica (uso interior y exterior), en los hogares de la ciudad de Hermosillo a nivel de AGEB, con los valores del consumo para el año 2015. Sus datos se gestionaron en la dependencia federal conocida como CFE, la cual es la responsable de otorgar el servicio de energía eléctrica. La información colectada consistió en el consumo mensual de energía (kWh) de cada una de las viviendas (sin nombres de usuarios, por ser esta información reservada). La extensión de la base de datos fue para el 100 % de las viviendas ubicadas y habitadas en la ciudad para ese año. Los datos de los consumos de energía fueron elegidos para el año 2015, por ser éste el año central de la década 2010-2020, dado que la población del censo 2010 fue, prácticamente, la que generó dichos consumos al 2015, pues no se disponía en México de datos censales más recientes en ese momento. La figura 2 ilustra el comportamiento de los consumos mensuales gestionados, para el año 2015 y 2016, y que muestran similitud.

En virtud de que la CFE tiene sus registros del consumo de energía eléctrica por vivienda en cada colonia, y de que las variables sociodemográficas en INEGI y de urbanización se resumen por AGEB —de acuerdo con Ojeda (2013)—, es necesario homogenizar el nivel de información haciendo una conversión e intersección geográfica, para transferir los consumos de las colonias hacia las AGEB, en la cartografía urbana de la ciudad de Hermosillo. Esto consiste en realizar una intersección geoespacial entre polígonos de la cartografía de colonias y de AGEB, utilizando ArcGis 9.3 para asignar, finalmente, el valor correspondiente del consumo de energía eléctrica.

Por otra parte, de acuerdo a una amplia revisión bibliográfica de casos similares en otros países, se eligió el grupo de variables catalogadas como independientes para buscar su relación con el consumo de energía eléctrica.

Figura 2. Consumo promedio mensual de energía eléctrica en los hogares de Hermosillo



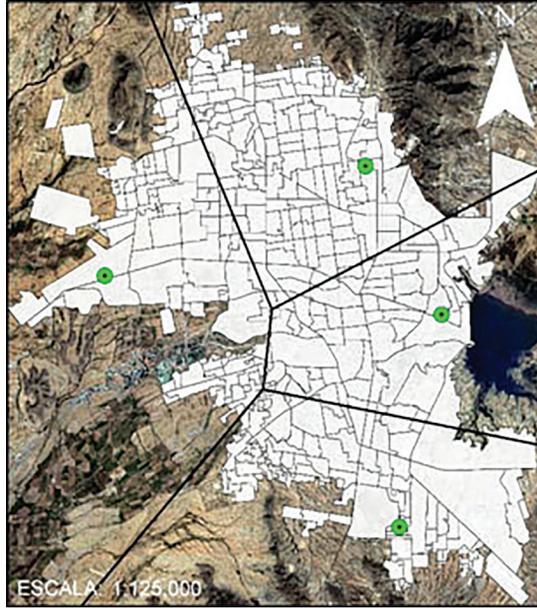
Nota: La información del consumo de energía eléctrica con sus valores mensuales en cada vivienda para el año 2015 fue gestionada durante el año 2017; como ya se ha dicho en las oficinas de la CFE, su base de datos presentó un registro total de 256 201 viviendas ubicadas en 535 colonias de la ciudad.

La información recolectada fue para un grupo de 24 variables independientes, las cuales se identifican en las dimensiones: de tipo socioeconómico, densidad urbana y variables climáticas. Las variables socioeconómicas se refieren a los indicadores generados por el INEGI, las cuales representan los datos censales a nivel de AGEB y se derivan del censo de población del año 2010. Así entonces, tales indicadores socioeconómicos representan su distribución en la cartografía de la zona urbana de la ciudad, y con el procesamiento geográfico se pueden generar mapas temáticos con ArcGis, para algunas variables más convenientes.

La recopilación de las variables climáticas se derivó de datos climáticos registrados en las estaciones climatológicas que se ubican en la ciudad (fig. 3), mismas que ya se describieron en la tabla 1. Teniendo en cuenta que toda estación tiene un área de influencia urbana, tales sectores se definieron a través del método universal polígonos de Thiessen (1911), el cual permite establecer sectores geográficos. En seguida, se asignaron los valores climáticos en cada uno de los AGEB referentes a la temperatura máxima media, precipitación media, precipitación de enero-junio, precipitación de julio a diciembre, de cada estación climatológica según el sector geográfico.

Las variables de la dimensión densidad urbana se refieren a la densidad de población y densidad de vivienda, mismas que relacionan los datos censales del total de habitantes y la cantidad de viviendas por AGEB y su área corres-

Figura 3. Sectores geográficos para cada estación climatológica



pendiente en cada sector geográfico; para ello se calcularon con datos censales y la superficie en hectáreas de cada polígono AGEB utilizando en ello el sistema ArcGis 9.3, generando así estas dos variables de urbanización (hab/Ha, y viv/Ha).

Análisis estadístico de los datos

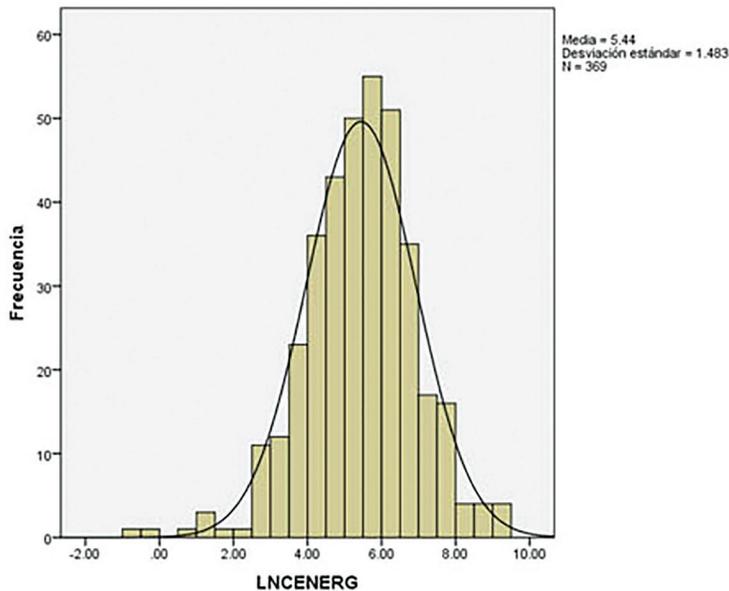
Este análisis se desarrolló a través del software que ya es prácticamente uno de los principales en esta temática, denominado SPSS; se utilizó la versión SPSS22.

Requerimientos necesarios para el análisis

En esta etapa del estudio, se examinó la significancia estadística de la variable dependiente (consumo de energía eléctrica) al nivel de AGEB, utilizando la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S), la cual permite medir el grado de concordancia entre la distribución de un conjunto de datos y su distribución

de probabilidad de tipo normal. Este análisis indicó que los datos de la variable dependiente inicialmente no cumplían con los criterios de una distribución normal, presentando un p -valor = 0.000, que es menor al estipulado de 0.05 (5%). Por lo que fue necesario transformar sus valores utilizando el criterio de logaritmo natural (LN), asignando para ello el nombre de LNCENERG. Transformada la variable dependiente, se aplicó de nuevo la prueba K-S y se obtuvo el p -valor = 0.15, cumpliendo, así, el requisito estadístico de normalidad (figura 4).

Figura 4. Histograma de la variable dependiente LNCENERG



Análisis de correlación

El análisis de correlación bivariada se efectuó para encontrar el grado de relación entre las variables independientes con el consumo de energía eléctrica (LNCENERG). Dentro de este proceso a través de SPSS22, se calculó el coeficiente de correlación utilizando el criterio de Pearson, el cual marca el grado de asociación que tiene una variable con otra. El coeficiente

de correlación es un índice de fácil interpretación, sus valores pueden oscilar desde -1 a 1. Cuando el valor es más cerca de 1 o -1, su relación es la máxima. En el caso de correlaciones igual a 1, la relación es positiva (indicando que cuando aumenta una variable, la otra también aumenta), y en el caso de valores -1 indica que cuando aumenta una variable disminuye la otra. Ahora bien, en el grado de asociación entre las dos variables debe cumplirse que exista un valor adecuado de significancia estadística (p-valor <5%), comprobando a través de la hipótesis nula “Ho” que no existe correlación. Por lo tanto, al utilizar un nivel de confianza de 95%, debemos obtener una significancia p-valor <0.5, lo cual indica que se rechaza la hipótesis nula “Ho”, pues se confirma que sí existe una correlación significativa.

Análisis de regresión múltiple

A partir de las variables que resultaron del análisis de correlación se llevó a cabo el proceso del análisis de regresión múltiple, mediante el cual se identificó el modelo, la congruencia y los términos de la ecuación que representan las variables independientes, que son estadísticamente significativas y que logran influir en la variabilidad del consumo de energía. La ecuación general que representa al modelo teórico es la siguiente:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 \dots + B_nX_n \quad (1)$$

Donde:

- Y: es la variable dependiente a explicar (consumo doméstico de energía eléctrica)
- X_1, X_2, \dots, X_n : son las variables independientes
- B_0 : coeficiente o constante
- B_i : coeficientes que acompañan a la variable independiente
- ϵ : error o residuales

La base de datos integral se constituyó con la variable consumo de energía eléctrica y con las variables independientes que mostraron asociación y significancia estadística, todas al nivel de AGEB. El análisis fue mediante el software SPSS22. Esta etapa permitió elegir las variables predictoras aplican-

do el método de mínimos cuadrados ordinarios y utilizando el criterio *stepwise*. Una vez definido el modelo, se verificó el cumplimiento de las condicionantes de la regresión, referidas a las pruebas de linealidad entre la relación de variables y no colinealidad de las mismas, así como la homoscedasticidad, independencia y normalidad de los residuos, a fin de garantizar la validez del modelo y su aplicación.

Después de efectuado el análisis, se seleccionó el modelo que presentó el menor error típico y el mejor coeficiente de determinación (R^2), eligiéndose el valor de R^2 *corregida*. En seguida, mediante el Análisis de la Varianza (ANOVA), se determinó si el modelo era estadísticamente significativo al verificar su valor $\text{Sig.} < 0.05$. Asimismo, el estadístico de Fisher (F) permite resolver el contraste del coeficiente de correlación obtenido en el modelo, de manera que F , en tal situación, se espera que resulte mayor que 1 y presente un p -valor también significativo con p -valor < 0.05), de acuerdo a Pérez (2009).

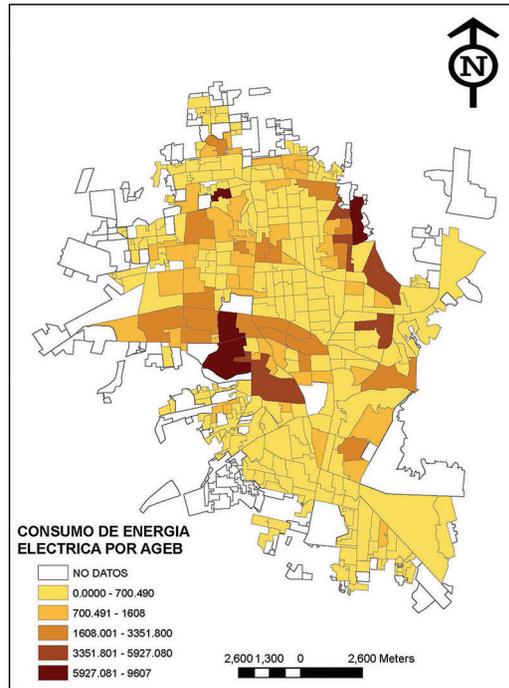
Resultados y discusión

El estadístico descriptivo de la variable dependiente consumo de energía en las viviendas resultó un valor promedio en la ciudad de 450.71 kWh, con una desviación estándar superior del doble del valor medio (1048.7); mientras que la variable humedad relativa presentó un valor promedio de 45.6%, con una desviación estándar de 3.08, mientras que la figura 5 muestra la distribución geográfica del consumo de energía eléctrica a nivel de AGEB en la ciudad de Hermosillo.

La distribución geográfica del consumo ilustra que los sectores habitacionales de alta plusvalía del sector poniente y noreste de la ciudad son los que presentan los mayores consumos, los cuales están en el rango de 5 927 a 9 607 kWh. Mientras que en la mayor parte de la ciudad —de acuerdo al mapa geográfico— predominan los consumos más bajos, que van del rango 0 a 700 kWh, lo cual permite identificar que en muchos sectores geográficos el consumo de energía eléctrica rodea al valor medio que presentó toda la ciudad de 450 kWh.

Se infiere también que sólo en los meses más calurosos (julio a septiem-

Figura 5. Consumo medio mensual geográfico de energía eléctrica (kWh) para el año 2015



bre) se llega al límite máximo, de 700 kWh, en tales sectores indicados en el mapa, lo cual se confirma con lo descrito en la figura 2 que ilustra los consumos mensuales promedio. El mapa referido en la figura 5 muestra algunos sectores geográficos en la zona central y norte de la mancha urbana que no tienen datos de consumo doméstico; esto es debido a que son áreas que no son habitacionales. Mientras que los sectores de la periferia urbana mostrados como “no datos” aparece sin valor, porque se está analizando la distribución de los consumos 2015 en la cartografía urbana 2020 de INEGI, lo cual indica el crecimiento territorial que presentó la ciudad en la última década (2010-2020).

Del análisis de correlación bivariada, el resultado reveló las variables que presentaron correlación con la variable dependiente consumo de energía (LNCENERG). Dicho resultado se redujo a 22 variables que se describen en la tabla 2, mostrando su coeficiente de correlación (r) y los niveles de significancia estadística (Sig.) p -valor de cada variable.

Tabla 2. Variables correlacionadas con LNCENERG

No.	Variable independiente	Descripción de la variable	r
1	VPH_PFem	Viviendas particulares habitadas con población femenina	.579**
2	LNVPH_Lav	Vivienda particulares con lavadora	.573**
3	LNPobTOT	Población total	-.552**
4	PobMasc	Población masculina	.500**
5	Pob_0-14	Población de cero a 14 años de edad	.423**
6	Pob_65mas	Población de 65 años y más	.247**
8	Pob15m_PInc	Población de 15 años y más con estudios primaria incompleta	.195**
9	PrOcupViv	Promedio de ocupantes en la vivienda	.173**
10	TotVivHab	Total de vivienda habitadas	.509**
11	VivRefrig	Viviendas con refrigerador	.512**
12	VivAuto	Viviendas con automóvil	.560**
14	VivCompu	Viviendas que tienen computadora	.581**
15	LNviv-Inter	Viviendas que tienen servicio de Internet	.587**
16	Temp. Max. m	Temperatura máxima media	.143**
17	VivTV	Viviendas que tienen TV	.509*
18	Viv_Telmovil	Viviendas que tienen tel celular	.522**
19	Dens_Viv	Densidad de vivienda	-.267**
20	Dens_Pob	Densidad de población	-.189**
21	Precip	Precipitación pluvial media	-.168**
22	Precip_1	Precipitación pluvial media del periodo enero a junio	-.158**
23	Precip_2	Precipitación pluvial media del periodo julio-diciembre	-.161**
22	HumRelat	Humedad relativa	-.188**

*. Significativa al nivel $p < 0.0$

** . Significancia al nivel $p < 0.01$

A partir de estos resultados puede observarse que todas las variables muestran alta significancia estadística en su asociación con la variable dependiente. La mitad de las variables mostradas poseen un coeficiente de correlación de Pearson mayor de 0.5, situación idónea para competir entre ellas en dicho análisis y buscar representar el modelo del consumo energía eléctrica.

Modelo del consumo de energía eléctrica en Hermosillo

En el análisis de los datos se hicieron varios cálculos para asegurar un modelo libre de colinealidad entre variables y de autocorrelación de los residuos, que cumplan también con las condicionantes establecidas en la teoría.

Se eligió el modelo con menor error típico, donde las variables en conjunto explicaron, en mayor proporción, el consumo de energía eléctrica en los hogares de Hermosillo.

En lo referente al supuesto de independencia de los residuos del modelo verificado con el estadístico Durbin Watson ($D-W = 1.7$), se mostró que se cumple con este requisito al revelar que los residuos son aleatorios y no están correlacionados entre sí, ya que el valor $D-W$ aceptable se encuentra entre 1.5 a 2.5 (Pérez, 2009).

El modelo seleccionado arrojó un coeficiente de determinación R^2 corregida = 0.366, lo cual explica el 36.6% de la variación conjunta observada en los datos del consumo de energía eléctrica.

Las cinco variables siguientes son las que representan el modelo y son estadísticamente significativas con $\text{Sig} < 0.05$, mismas que se listan en seguida. En un estudio similar, Chen (2013 *et al.*), en su análisis, obtuvo un valor del coeficiente de determinación de $R^2 = 0.263$ y, en el caso de Kavousian (2013 *et al.*) encontró un valor de $R^2 = 0.56$ para ese coeficiente.

- ✓ LNDens_Viv (Densidad de vivienda)
- ✓ LNViv_Inter (Viviendas habitadas que tienen Internet)
- ✓ LNPob_65 y más ... (Población de 65 y más)
- ✓ Pob_Fem (Población femenina)
- ✓ Precip 2 (Precipitación pluvial media del periodo Julio-diciembre)

La variable de tipo socioeconómico en el modelo resultó ser LNViv_Inter con un coeficiente positivo (+ 0.582); induce a definir que tales viviendas disponen también de computadora(s) y TV posible, con efectos de video y demás, lo cual es indicativo de que se dirijan recursos financieros para disponer de tales servicios y equipos. La tabla 3 muestra valores de los coeficientes de las cinco variables que forman el modelo, indican también la significancia estadística que confirma su presencia en el modelo.

Mientras que las variables de tipo sociodemográfico LNPob_65 y más con un coeficiente negativo (- 0.322), así como Pob_Fem con el coeficiente positivo (+ 0.001), reflejan situaciones distintas. La primera indica que los adultos mayores al estar en la casa, procuran con sus hábitos cotidianos

Figura 6. Modelo del consumo de energía eléctrica al nivel de AGEB en Hermosillo, Sonora

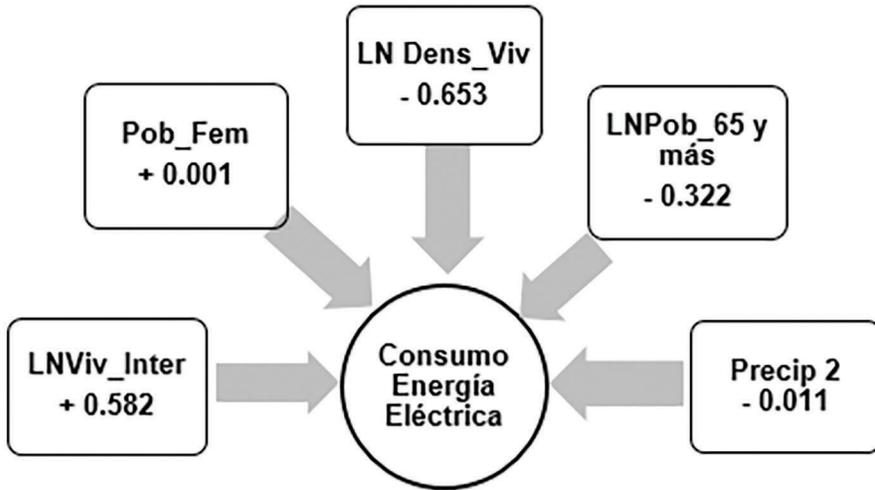


Tabla 3. Modelo del consumo de energía eléctrica con sus variables y coeficientes

Modelo / variables	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes Estandarizados	t	Sig.	Estadísticos de Colinealidad			
	B	Error Std.	Beta			T	FIV	IC	
5	Constante	6.074	.594		10.234	.000	---	---	1.00
	LNViv_Inter	0.582	.079	.485	7.353	.000	.482	2.076	4.85
	LNDens_Viv	-0.653	.098	-.350	-6.656	.000	.756	1.322	7.90
	LNPob65ymás	-0.322	.059	-.349	-5.502	.000	.520	1.921	9.75
	Pob_Fem	0.001	.000	.297	4.736	.000	.533	1.877	17.51
	Precip2	-.011	.004	-.125	-2.624	.009	.922	1.084	28.85

$R^2 = 0.376$

R^2 corregida = .366

D-W = 1.70

F valor = 35.97

Sig. F valor = 0.000

consumir menos energía eléctrica, aspecto que se confirma con el coeficiente negativo. En tanto que la segunda variable refleja que las mujeres —por las propias actividades que desarrollan en el hogar— consumen más energía al emprender sus actividades cotidianas de limpieza, preparar alimentos, uso de lavadora para lavado y secado de ropa y otras similares. Indica también que las mujeres, en su mayoría, son las que más tiempo pasan en la vivienda y suelen llevar comúnmente el liderazgo respecto a las actividades

que se desarrollan en el hogar y que están vinculadas con el consumo de energía eléctrica.

La variable del tipo urbanización, por su parte, es la densidad de población (LNDens_Viv) que resultó con el coeficiente más alto y además negativo, lo cual favorece que, al tener una mayor densidad de vivienda en los sectores habitacionales de Hermosillo, disminuye el consumo de energía resultante en la ecuación de modelo. Esto se relaciona con la mayor concentración de viviendas en menor superficie; en todo caso, se vincula con el crecimiento urbano vertical (referido al desarrollo habitacional vertical).

Por su parte, la variable explicativa de tipo climático (Precip 2), que corresponde a la precipitación pluvial media en el segundo semestre del año (periodo julio a diciembre), resultó muy congruente al tener un coeficiente negativo, ya que esto comprueba que, al presentarse mayores y continuas precipitaciones pluviales, se refresca el ambiente urbano y disminuye temporalmente el índice de calor, favoreciendo el ahorro de energía eléctrica en los hogares.

Al utilizar los coeficientes (B no estandarizados) en la ecuación (1), mostrada anteriormente para el modelo teórico, se llega a la ecuación que describe y representa el modelo de consumo de energía eléctrica en el sector vivienda a nivel de AGEB, siguiente:

$$\text{LnY} = 5.248 + 0.582 \text{ LnViv_Inter} - 0.653 \text{ LnDens_Viv} - 0.322 \text{ LnPob_65y más} + 0.001 \text{ Pob_Fem} - 0.011 \text{ Precip2}$$

El valor del consumo de energía eléctrica (Y), en esta ecuación del modelo, puede ser calculado al sustituir los valores de las variables explicativas en un determinado sector geográfico identificado como AGEB, en la urbanización de la ciudad. Las unidades del consumo de energía son kWh, mientras que en el caso de las variables predictoras corresponde en el orden a: total de viviendas que disponen de Internet, total de viviendas por hectárea, total de habitantes de 65 años y más, total de habitantes de género femenino y la precipitación pluvial media en el segundo semestre del año; todas a nivel del AGEB correspondiente de interés.

El modelo presentó el menor error típico y un coeficiente de determinación $R^2_{\text{corregida}} = 0.366$, cuyo valor puede ser tolerable. El resultado del

Análisis de la Varianza (ANOVA) reveló que existe un efecto real de las variables independientes sobre el consumo de energía eléctrica en el modelo elegido, dado que el estadístico Fisher (F) así lo demuestra. Su valor de “F” es aceptable, ya que resultó mayor que la unidad ($F = 35.97$ con un $\text{Sig.} = 0.000$). Por lo tanto, el modelo es estadísticamente significativo al mostrar el valor $\text{Sig.} < 0.05$ (denominado *p-valor*), de tal manera que se rechaza la hipótesis nula “ H_0 ” de inexistencia de relación. Asimismo, los coeficientes (B) no estandarizados establecen la ecuación del modelo, como ya se ha expresado arriba, y los coeficientes tipificados indican el peso relativo en valor absoluto que tiene cada variable.

Al revisar tales coeficientes, resalta que la variable LNViv_Inter es la que muestra más importancia debido al mayor peso relativo, que indica una influencia del nivel económico en los hogares al provocar a consumir más energía eléctrica, relacionándose así con niveles altos de confort que se busca tener en una vivienda por parte de los integrantes del hogar.

En segundo lugar, de importancia por su peso relativo, es la variable de urbanización referida a la densidad de vivienda. Y, en tercer lugar, resultó la variable de tipo sociodemográfica Pob65_y más, referente a los adultos mayores. La significancia estadística en cada una de las variables predictoras resultó *p-valor* < 0.05 , lo cual también contrasta la hipótesis nula “ H_0 ” descrita anteriormente. A su vez, en el estadístico tolerancia “T” para cada variable su resultado se aproxima a 1 (uno), lo cual revela que la solución es aceptable.

Ahora bien, en la revisión de los condicionantes de un modelo de regresión para acreditar su validez y aplicación, se observó que se cumple adecuadamente con tales especificaciones de la estadística multivariada. Dado que, en el caso de la revisión del supuesto de colinealidad revisado con el valor del factor de inflación de la varianza (FIV), se observa en la tabla 3 que su valor es adecuado para todas las variables puesto que el FIV < 5 , ya que algunos autores mencionan que cuando FIV > 5 indica que ya es relevante la colinealidad (Kizys y Pérez, 2002), y valores de FIV > 10 , implica problemas de multicolinealidad (Mahía, 2013). Asimismo, para confirmar la ausencia de este condicionante, se determinó el estadístico Índice de Condición (IC) mediante el diagnóstico correspondiente. Del diagnóstico respectivo se logró corroborar que todas las variables mostraron un IC menor a 30, lo cual señala que no es crítica la multicolinealidad en las va-

riables del modelo, ya que existen sugerencias de que un valor de $IC < 15$, indica que no hay presencia de tal condicionante, pero si el IC excede de un valor 30 implica colinealidad severa (Fernández, 2004).

Por otro lado, el término de homoscedasticidad se refiere a que la varianza de los residuos es constante, de ahí que, al revisar la dispersión de los residuos tipificados *vs.* los residuos tipificados predichos, donde se muestra la nube de puntos, no muestra tendencia alguna. Respecto a la linealidad que debe guardar el modelo, la misma aleatoriedad adecuada de los residuos infiere que se cumple dicho supuesto, pues en todo caso la falta de aleatoriedad en los residuos revelaría problemas de falta de linealidad; por lo que no existe nada que haga pensar la falta de adecuación del modelo de regresión, ya que los residuos resultaron aleatorios, lo cual es señal del cumplimiento de estos dos últimos supuestos.

Conclusiones

El grupo de variables independientes, que inicialmente se analizaron para conocer la correlación que muestran con el consumo de energía eléctrica, mostraron asociación con la variable dependiente, algunas con mayor presencia que otras. Sin embargo, de las variables de origen climático ninguna mostró niveles altos de asociación, ya que su coeficiente de correlación de Pearson resultó en el rango mínimo de 0.143 en la variable temperatura media, a un máximo de 0.188 en la variable humedad relativa, ambas con buen nivel de significancia estadística. Se infiere que la razón de la baja correlación se debe a que las estaciones climatológicas ubicadas en la zona urbana de Hermosillo abarcan sectores geográficos muy amplios, fenómeno derivado de que sólo fueron cuatro estaciones las que cumplieron con la información continua para el año de estudio. Esto hace concluir que es necesario que en el análisis estadístico se integren mayor número de estaciones climatológicas para lograr un efecto de su presencia en sectores geográficos más reducidos al momento de distribuir sus datos a través de los polígonos de Thiessen.

Se buscó reducir tal situación al considerar en el caso de la precipitación pluvial dos periodos en el año, esto es, al dividir el año en dos semestres

para determinar la precipitación media de seis meses en cada uno. No se aprecia más efecto si se divide el año en tres periodos, dado que solamente interviene cuatro estaciones climatológicas en el análisis de datos. Por lo tanto, es motivo de conclusión, en este apartado, la gran utilidad de que las ciudades dispongan de mayor cantidad de estaciones climatológicas que monitoreen el clima urbano, continuamente, para favorecer los estudios e investigaciones relacionadas con el medio ambiente urbano.

No obstante, una de las variables climáticas conservó su presencia en el modelo, esta se refiere a la precipitación pluvial (Precip 2) del periodo julio-diciembre. En esta variable, su coeficiente (B) resultó muy pequeño, pero afortunadamente con signo negativo, lo cual influye para que disminuya temporalmente el consumo de energía eléctrica en las viviendas, en tanto se conserva el fresco del aire que fluye en la ciudad, lo que dependerá de la constancia y permanencia del fenómeno de lluvia en la zona urbana.

El modelo obtenido quedó integrado por cinco variables, de las cuales dos variables son referidas a distintos estratos de la población, y de éstas la principal variable influyente es la de población de 65 y más, en los hogares, la cual resultó con un coeficiente negativo indicando que, a mayor población de este estrato, será menor el consumo de energía eléctrica en el hogar. Este comportamiento de los adultos mayores, puede estar relacionado con acciones conductuales al mostrar sensibilidad para el ahorro de energía eléctrica en el uso de menor tiempo de los equipos relacionados con ello. Esta conclusión coincide con lo obtenido por Chen *et al.* (2013), al exponer que el consumo de energía tiende a disminuir cuando es mayor la edad de las personas que habitan el hogar.

Se observó influencia del efecto urbano, ya que la variable densidad de vivienda resultó como se esperaba con un coeficiente negativo, significando que, a mayor crecimiento en la densidad urbana (más cantidad de viviendas por hectárea), el consumo de energía disminuye en el cálculo con la ecuación del modelo. Esto hace concluir que las ciudades compactas generan menos consumos en los servicios, en este caso referido al de energía eléctrica, ya que disminuyen las pérdidas de energía en las líneas de transmisión y distribución de la energía en la ciudad. Lo mismo sucede con otros servicios básicos que se ven beneficiados (agua, transporte, residuos, y demás), en las ciudades de mayor crecimiento habitacional del tipo vertical.

Lo anterior se confirma al observar el mapa de la distribución geográfica del consumo de energía en la ciudad, donde se distingue que los sectores geográficos que tienen muy baja densidad de vivienda (sectores poniente y noreste) presentan mayor consumo de energía eléctrica; esto es más crítico en esos casos, ya que son sectores habitacionales de alta plusvalía urbana.

Al observar la gráfica de evolución de consumo mensual de energía eléctrica para el año 2015, en donde se determinó el consumo mensual promedio de energía eléctrica en las viviendas, éste resultó de 450.7 kWh. Ahora bien, al considerar una densidad de población media por vivienda, de 3.63 habitantes en la ciudad por vivienda, de acuerdo a Ojeda *et al.* (2017), se arroja un resultado del consumo per cápita de energía eléctrica de 124 kWh /habitante-vivienda.

Finalmente, para un mayor conocimiento y comportamiento de la situación del consumo de energía en la geografía de la ciudad, es importante que la base de datos integral se amplíe con información más actualizada y para recalcular y obtener un modelo más reciente. Asimismo, es conveniente aplicar técnicas estadísticas de tipo geoespacial para conocer la influencia de las variables predictoras por sectores geográficos, esto es al utilizar regresión geográficamente ponderada y autocorrelación espacial.

Bibliografía

- Abdo, H., Almarri, W. y Alhabaibeh, A. (2017). Exploring The Relationship Between Energy Cost and People's Consumption Behaviour, *Energy Procedia*, 105, 3464-3470.
- Ahmad, M., Azam, M., Khan, A. y Zaman, K.. (2014). Factors Determining Energy Consumption: Evidence from Indonesia, Malaysia and Thailand, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1123-1131.
- Bedir, M., Hasselaar, E. y Itard, L. (2013). Determinants of Electricity Consumption in Dutch Dwellings, *Energy and Buildings*, 58, 194-207.
- Belaid, F. 2015. Understanding the Spectrum of Domestic Energy Consumption: Empirical Evidence from France, *Energy Policy*, 92, 220-233.
- Brounen, D., Kok, N. y Quigley, J. (2012). Residential Energy Use and Conservation: Economics and Demographics, *European Economic Review*, 56, 931-945.
- Buen, O., Hernández, F. y Navarrete, J. (2016). *Análisis de la evolución del consumo eléctrico del sector residencial entre 1982 y 2014 e impactos de ahorro de energía por*

- políticas públicas* [archivo PDF]. SENER y CONUEE. file:///C:/Users/Alumnos/Desktop/MUSICAS/Análisis%20de%20evolucionn%20del%20consumo%20electrico%20Residencial.pdf>
- Cai, Y., Liang, J., Yang, Z. y Zhang, L. (2011). Spatial Variation and Distribution of Urban Energy Consumptions from Cities in China, *Energies*, 4, 26-38.
- Cano, S., Jordan, J., Keating, J., Nagorski, J., Potter, L.,... Valencia, A. (2013). An Analysis of Monthly Household Energy Consumption among Single-Family Residences in Texas. *Energy Policy*, 69, 263-272.
- Comisión Federal de Electricidad (2016-2019). http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/Estadisticas/Paginas/clientes.asp
- Comisión Nacional del agua (2018). *Servicio Meteorológico Nacional*. Conagua. <http://smn.cna.gob.mx/es/>
- Cui, Y., Dong, B., Guo, S., Hu, S. y Yan, D. 2017 A Survey on Energy Consumption and Energy Usage Behavior of Households and Residential Building in Urban China, *Energy and Buildings*, 148, 366-378
- Chen, J., Steemers, K. y Wang, X., (2013). A Statistical Analysis of a Residential Energy Consumption Survey Studyin Hangzhou, China, *Energy and Buildings*, 66, 193-202.
- Cheng, V. y Steemers K. (2011). Modelling Domestic Energy Consumption at District Scale: A Tool to Support National and Local Energy Policies, *Environmental Modelling & Software*, 26, 1186-1198.
- Chu, W., Feng, S., Jin, G., Ping, Q., Xinye, Z. y Zhanming, C. (2014). Characteristics of Residential Energy Consumption in China: Findings from a Household Survey, *Energy Policy*, 75, 126-135.
- Ekholm, T., Krey, V., Pachauri, S. y Riahi, K. (2010). Determinants of Household Energy Consumption in India, *Energy Policy*, 38, 5696-5707.
- Fernández, T. (2004). *Estadística II*. El Colegio de México, Centro de Estudios Sociológicos. <http://tabarefernandez.tripod.com/multico.pdf>
- Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (Eds.) (2014). *Cambio climático, impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes, preguntas frecuentes y recuadros multicapítulos. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [archivo PDF]. IPCC, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf>
- Franco, A. y Velazco, M. (2014). *Una aproximación sociodemográfica al consumo de energía en los hogares mexicanos*. Consejo Nacional de Población. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232092/07_Franco_Velazquez.pdf
- Fuertes, A., Jones, R. y Lomas, K. (2014). The Socio-Economic, Dwelling and Appliance Related Factors Affecting Electricity Consumption in Domestic Buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 901-917.
- Garrido, A. (2009). *La energía como elemento esencial del desarrollo* [archivo PDF, pp. 1.57]. <https://www.crisisenergetica.org/ficheros/Energia-y-desarrollo-Agustin-Alonso-Junio09-sFinal.pdf>

- Guan, J. y Tso, G. (2013). A Multilevel Regression Approach to Understand Effects of Environment Indicators and Household Features on Residential Energy Consumption, *Energy*, 6, 722-731.
- Hammer, S., Howard, B., Modi, V. y Thompson, J. (2011). Spatial Distribution of Urban Building Energy Consumption by End Use, *Energy and Buildings*, 45, 141-151.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). Población. <http://www.inegi.org.mx/>
- Kavousian, A., Rajagopal, R. y Fischer, M. (2013). Determinants of Residential Electricity Consumption: Using Smart Meter Data to Examine the Effect of Climate, Building Characteristics, Appliance Stock, and Occupants' Behavior. *Energy, Elsevier*, 55(C), 184-194. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.086>
- Kizys, R. y Pérez, A., 2002. *Multicolinealidad y observaciones atípicas*. Proyecto e-Math. Secretaría de Estado de Educación y Universidades (MECD). Recuperado el 9 de mayo de 2016: http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/T03_Multicolinealidad.pdf
- Ling, J., Lu, Z., Xing, J. y Zhao, L. (2014). Statistical Analysis of Residential Building Energy Consumption in Tianjin, *Front. Energy*, 8, 513-520.
- Mahia, R. (2013). Multicolinealidad. http://www.uam.es/personal_pdi/economicas/rmc/econometria/pdf/HPMultico_2013.pdf
- Maqueda, M. y Sánchez, L. (2011). Curvas de demanda de energía eléctrica en el sector doméstico de dos regiones de México Maqueda. *Boletín IIE*, 173-180.
- Morales Ramírez, D. y Alvarado Lagunas, E. (2014). Análisis del consumo de energía eléctrica domiciliaria en Tampico, Tamaulipas, *Ciencia UAT*, 8, 62-67.
- Morales, D. y Luyando, J. (2014). Análisis del consumo de energía eléctrica residencial en el Area Metropolitana de Monterrey, Nuevo Leon. *Estudios Económicos*, 31, 27-48.
- Organización de las Naciones Unidas (2014). Departamento de asuntos económicos y sociales. <http://www.un.org/es/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects-2014.html>
- Ojeda, A. (2013). *Análisis Socioespacial del consumo de agua doméstica en Hermosillo, Sonora* [Tesis de Doctorado]. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- Ojeda, A., Alvarez Chávez C.R., Ramos, M. y Soto, F. (2017). Determinants of Domestic Water Consumption in Hermosillo, Sonora. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1901-1910.
- Ortiz, J., Pérez, L. y Pout, C. (2007). A Review on Buildings Energy Consumption Information, *Energy and Buildings*, 40, 394-398.
- Pérez, C. (2009). *Técnicas de análisis de datos con SPSS15*. Universidad Complutense de Madrid, Pearson Prentice Hall.
- Saied, M., Susilawati, C. y Susilawati, T. (2014). Case Study Analysis for the Development and Implementation of Sustainable Housing in the Kingdom of Saudi Arabia. Asian Real Estate Society (ASRES) 19th Annual Conference Gold Coast, Australia 2014.
- Sad de Asis, E. y Pereira, I. (2011). Urban Energy Consumption Mapping for Energy Management, *Energy Policy*, 59, 257-269.
- SENER (2012, 2016, 2017). Sistema de Información Energética (SIE). Base de datos. <http://sie.energia.gob.mx/>

- Steg, L. (2008). Promoting Household Energy Conservation, *Energy Policy*, 36, 4449–4453.
- UNESCO (2017). Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos. <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-19-energy-needs/>
- Wilson, B. (2012). Urban form and Residential Electricity Consumption: Evidence from Illinois, USA. *Landscape and Urban Planning*, 115, 62-71.

Sobre las coordinadoras y autores

Coordinadoras

María Guadalupe Alpuche Cruz. Doctora en Ingeniería con especialidad en Diseño Bioclimático y maestra en Arquitectura por la UNAM. Profesora e investigadora del Departamento de Arquitectura y Diseño y Directora de la División de Humanidades y Bellas Artes de la Universidad de Sonora. Sus líneas de investigación son la eficiencia energética y la energía en edificaciones; la habitabilidad sustentable y la energía y medio ambiente en los proyectos arquitectónicos y urbanos. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1, forma parte del Laboratorio de Vivienda y Comunidades Sustentables. Ha colaborado en múltiples proyectos de investigación, publicado libros, capítulos de libros, artículos en revistas científicas indexadas así como, participado como ponente en congresos nacionales e internacionales. Algunas de sus publicaciones son: Alpuche, M.G., Heard, C., Best, R., Rojas, J. (2005). Exergy Analysis of Air Cooling Systems in Buildings in Hot Humid Climates, *Applied Thermal Engineering*, *Dialnet*, 25(4), 507-517.; Romero-Pérez, C.K., Rodríguez-Muñoz, N. A., Borbón Almada, A.C., Alpuche-Cruz, M.G., Martín-Domínguez, I. (2020). Energy and Thermal Performance of Social Housing: Analysis of Heat Flow Through the Envelope and Comparison with International Schemes. *Journal of Solar Energy Engineering*, 142(2), 1-41, <https://doi.org/10.1115/1.4045171>.

Ana Cecilia Borbón Almada. Ingeniera Civil, maestra en Arquitectura y doctora en Ciencias, profesora e investigadora del Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora. Miembro de la Asociación Nacional de Energía Solar. Miembro del Sistema Nacional de investigadores Conacyt. Miembro del Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidad Sustentables Conacyt. Sus líneas de investigación son: evaluación termo-física-estructural de materiales de construcción, diseño y construcción de prototipos de medición de propiedades térmicas de materiales y simulación energética en edificios. Algunas de sus publicaciones son: Borbón Almada, A.C., Rodríguez Muñoz, N.A. y Nájera Trejo, M., (2019) Energy and Economic Impact on the Application of Low-Cost Lightweight Materials in Economic Housing Located in Dry Climates. *Sustainability*, 11(6), 1586, <https://doi.org/10.3390/su11061586>. Sau Soto N., Medina Mendoza J., Borbón Almada A.C., (2019). Peridynamic Modelling of Reinforced Concrete structures. *Engineering Failure Analysis*, 103, 266–274, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.05.004>.

Autores

Cecilia María Galindo Borbón. Arquitecta egresada de la Universidad de Sonora, actualmente estudiante en el Doctorado en Innovación para el Hábitat Sustentable en la Universidad de Guadalajara. Tiene maestría de doble titulación en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México y en Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo por la TH Köln, en Alemania, así como una especialidad en Energía y Medioambiente en Arquitectura por la UNISON. Adscrita al Departamento de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Sonora como profesora de asignatura nivel B. Sus principales líneas de investigación son habitabilidad sustentable, confort ambiental y eficiencia energética en la edificación.

José Manuel Ochoa de la Torre. Arquitecto especializado en Heliodesign por la UNAM, así como en Ingeniería de Fuentes Renovables de Energía por la ENEA, en Italia, y doctor en Arquitectura por la 3. Es miembro del

Sistema Nacional de Investigadores de Conacyt y profesor e investigador titular en el Departamento de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Sonora. Su línea de investigación versa sobre la tecnología en energía y medioambiente aplicada al desarrollo de proyectos urbanos y arquitectónicos, donde ha desarrollado en conjunto con su grupo, proyectos de investigación aplicada, consultoría y proyectos arquitectónicos para instituciones públicas y privadas, así como empresas y despachos de arquitectura. Es autor de varios libros y artículos publicados en revistas especializadas, así como ponente habitual en congresos nacionales e internacionales sobre el tema.

Irene Marincic Lovriha. Profesora e investigadora de tiempo completo en el Dpto. de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Sonora. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores, Nivel 2 de Conacyt. Se especializa en temas de investigación relacionados con edificios de bajo consumo de energía, confort térmico, análisis del comportamiento térmico y lumínico de edificios, entre otros. Participa activamente en proyectos de investigación y redes de colaboración nacionales e internacionales con varias universidades mexicanas y extranjeras, así como en consultorías especializadas en temas energéticos y formación de recursos humanos de licenciatura, maestrías y doctorado. Tiene numerosas publicaciones como libros, capítulos de libro y artículos en prestigiosas revistas nacionales e internacionales.

Cecilia María Galindo Borbón. Tiene maestría de doble titulación en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México y en Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo por la TH Köln, en Alemania. Adscrita al Departamento de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Sonora como profesora de asignatura nivel B. Actualmente, es estudiante del Doctorado en Innovación para el Hábitat Sustentable de la Universidad de Guadalajara.

Fátima Anahí Córdova Borbón. Estudiante de Doctorado en Humanidades en la Universidad de Sonora, tiene Maestría en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente por la Universidad Politécnica de Cataluña, España. Actualmente, es profesora adscrita al Departamento de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Sonora. Su línea de investigación es la arquitectura,

energía y medio ambiente. Entre sus publicaciones está Córdova, F. y Alpuche Cruz, M. G. (2022). Relación entre la intensidad de uso de energía y la morfología urbana densificación como estrategia de mitigación del cambio climático. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 12, 27-54. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i12.194>

Glenda Bethina Yanes Ordiales. Arquitecta por la Universidad de Sonora (2003), maestra en Ciencias Sociales en el Área de Estudios Urbanos y Ambientales por el Colegio de Sonora (2005) y doctora en Ciencias Sociales por la Universidad Autónoma de Sinaloa. Adscrita al Departamento de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Sonora como profesora de tiempo completo desde 2016, actualmente con cargo de Jefa Departamento. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel 1) y del cuerpo académico consolidado CA-079 Estudios integrales en Arquitectura, así como del Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables (UniSon, UdG, UNACH, UACJ, UNAM, Conacyt). Cultiva las líneas de generación de conocimiento relacionadas con los estudios urbanos y la habitabilidad sustentable.

Jesús Quintana Pacheco. Doctor en Gestión y Valoración Urbana. Coordinador de la Maestría en Ingeniería Urbana y profesor investigador del Departamento de Ingeniería Civil y Minas de la Universidad de Sonora. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Conacyt SNI Candidato. Sus líneas de investigación son la Valoración Urbana y la Gestión Sustentable de Servicios Urbanos. Entre sus publicaciones están: Ojeda de la Cruz, A., Ramos Corella, M. A., Quintana Pacheco, J., Ramírez Uribe, G., Miranda Pasos, I. y Verduzco Bojórquez, C. E. (2021). Efectos sociodemográficos, de urbanización y clima en el consumo de agua doméstica en Hermosillo, Sonora, *Bitácora Urbano Territorial*, 31(2); A., Escalante Ley, I., Quintana, I., Ramos, M. A. (2019). Percepción en la motivación de los trabajadores de la construcción en Hermosillo, Sonora. *Urbana*, 20; Quintana, J., Ojeda de la Cruz, A. y García, J. F. (2018). Factores que explican el valor del suelo. Caso Hermosillo, Sonora, México. *Contexto. Revista de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Nuevo León*, 12(16). <https://doi.org/10.29105/contexto12.16-7>.

Carlos Eduardo Quijada González. Maestro en Ingeniería Urbana con Opción en Construcción por la Universidad de Sonora. Actualmente, labora como Ingeniero Civil en Takco Construction. Sus líneas de investigación son la construcción y el medio ambiente.

Gema Karina Ibarra Torúa. Doctorado en Ciencias, Instituto de Ingeniería de la UABC. Profesora e investigadora del Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora. Miembro de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. Sus líneas de investigación son: obra civil, medio ambiente e infraestructura sustentable, estructuras y materiales en la construcción, tecnologías ambientales y sustentabilidad. Algunas de sus publicaciones son: Ibarra Torúa, G. K., Ruiz Aguirre, D., Burgos Flores, D. y Yepis Osuna, I. I. (2019). Análisis y diseño de mejora de desempeño estructural de pérgolas. *Epistemus*, 13(26), 13–21. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v13i26.91>; Araux Sánchez, E., Gómez Valencia, A., Ibarra Torúa, G. K. y Meza Figueroa, D. M. (2021). Fortaleciendo a la minería artesanal sostenible: proyecto pilotolas minitas, sonora México. *Epistemus*, 14(29), 45–51. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v14i29.147>; Ibarra Torua, G., Acosta Chang, J. y López Pineda, L. (2015). Microzonation of Ground Dominant Periods at City of Ensenada, Baja California. *Revista de la Construcción*, 14(1), 1-46, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2015000100005>.

Armando Ayala Corona. Doctorado en Ciencias en Ingeniería Industrial. Profesor e investigador del Departamento de Física, Universidad de Sonora. Miembro de la Sociedad Mexicana de Física (en trámite). Sus líneas de investigación son: Mecanismo de Antikythera monumental para Hermosillo, Síntesis y caracterización de hidróxidos de Cd, Pb, Zn y Cu, para su transformación en calcogenuros por intercambio iónico y su aplicación en celdas fotovoltaicas, Desarrollo de equipo e instrumentos para la enseñanza de la física y diseño de sistemas de instrumentación para la medición de variables físicas y sistemas fotovoltaicos. Entre sus publicaciones están: Ayala Corona, A. y Rodríguez Medina, M.A. (2011). Estudio de la degradación de tomate por vibración mediante inferencia bayesiana. *Epistemus*, 5(10); y Ayala Corona, A., Munguía Aguilar, H. y Franco Maldonado, R. (2017).

Comparación de producción fotovoltaica con seguimiento estacional vs. ángulo fijo en Hermosillo, Sonora. *Academia Journals.com*, 9(2).

María de los Ángeles Villarreal Andrade. Ingeniera Química, estudiante de la Maestría en Ciencia y Tecnología Ambiental del Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., en Durango. Ha participado en las líneas de investigación de Evaluación fotocatalítica en fases acuosa y gaseosa de películas delgadas de los sistemas TiO₂ y Cu₂O fabricadas por síntesis sol-gel y, recientemente, en la de Valorización de los neumáticos de desecho como un aislante térmico en edificios. Entre sus publicaciones están M. A. Badillo Ávila, R. Castanedo Pérez, M. A. Villarreal Andrade, G. Torres Delgado (2018). Cu₂O thin Films Obtained at Low Temperature by Mono-Ethanolamine Decomposition in Open Atmosphere. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 85, 168-176. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.06.009>

Norma Alejandra Rodríguez Muñoz. Ingeniera química, maestra y doctora en Ciencias de la Ingeniería, Investigadora Conacyt en el Departamento de Ingeniería Sustentable del Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., en Durango. Dentro del Sistema Nacional de Investigadores Conacyt, nivel SNI I y del Sistema Estatal de Investigadores del Estado de Durango como Investigador Honorífico. Integrante de la Task 66: Solar Energy Buildings de la Agencia Internacional de Energía (IEA) y DAAD Alumni. Participa en las líneas de investigación de: Energía y sustentabilidad en edificaciones, Materiales para sistemas constructivos y Normativa en energía y eficiencia energética en edificaciones. Entre sus publicaciones están: Borbón Almada, A. C., Lucero-Alvarez, J., Rodríguez Muñoz, N. A., Ramírez Celaya, M., Castro Brockman, S., Sau Soto, N. y Najera-Trejo, M. (2020). Design and Application of Cellular Concrete on a Mexican Residential Building and Its Influence on Energy Savings in Hot Climates: Projections to 2050. *Applied Sciences.*, 10, 8225. <https://doi.org/10.3390/app10228225>; Romero Pérez, C. K., Rodríguez Muñoz, N. A., Borbón Almada, A. C., Alpuche Cruz, M. G., Ignacio R. Martín-Dominguez (2019). Energy and Thermal Performance of Social Housing: Analysis of Heat Flow through the Envelope and Com-

parison with International Schemes. *J. Sol. Energy Eng.*, 142(2), 021007
<https://doi.org/10.1115/1.4045171>

José Rafael Irigoyen Campuzano. Maestro en Ciencias en Gestión Ambiental, Técnico Académico en el Departamento de Ingeniería Sustentable del Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C., en Durango. Participa en las líneas de investigación de: Escenario presente y tendencias de la disponibilidad y calidad del agua subterránea ante la demanda en el acuífero Valle del Guadiana, Estadística aplicada y química analítica ambiental. Entre sus publicaciones están: Rafael Irigoyen Campuzano, María González Béjar, Eduardo Pino, José B. Proal Nájera, Julia Pérez Prieto (2017). A Metal-Free, Nonconjugated Polymer for Solar Photocatalysis. *Chemistry a European Journal*, 23(12), <https://doi.org/10.1002/chem.201605064>; M. López Guzmána, M. T. Alarcón Herrera, J. R. Irigoyen Campuzano, L. A. Torres Castañón, Liliana Reynoso Cuevas (2019). Simultaneous Removal of Fluoride and Arsenic from Well Water by Electrocoagulation, *Science of The Total Environment*, 678, 181-187 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.400>

Liliana Reynoso Cuevas. Doctora en Biotecnología, Investigadora Conacyt en el Departamento de Ingeniería Sustentable del Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., en Durango. Dentro del Sistema Nacional de Investigadores Conacyt, nivel SNI I e integrante de la Red Temática para la Gestión de la Calidad y Disponibilidad del Agua. Participa en las líneas de investigación de: Evaluación de la incidencia y persistencia de contaminantes emergentes en agua, Desarrollo y aplicación de bio y nanomateriales para el tratamiento de agua de consumo humano e Implementación de técnicas de tratamiento de agua avanzadas para la remoción de contaminantes emergentes. Entre sus publicaciones están: M. López Guzmána, M. T. Alarcón Herrera, J. R. Irigoyen Campuzano, L. A. Torres Castañón, Liliana Reynoso Cuevas (2019). Simultaneous Removal of Fluoride and Arsenic from Well Water by Electrocoagulation, *Science of The Total Environment*, 678, 181-187 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.400>; López Guzmán, M., Flores Hidalgo, M.A., Reynoso Cuevas, L. (2021). Electrocoagulation Process: An Approach to Continuous Processes, Reactors Design,

Pharmaceuticals Removal, and Hybrid Systems—A Review. *Processes*, 9, 1831. <https://doi.org/10.3390/pr9101831>. Robledo Peralta, A., García Quiñonez, L.V., Rodríguez Beltrán, R. I., Reynoso Cuevas, L. (2022). Zr-Based Biocomposite Materials as an Alternative for Fluoride Removal, Preparation and Characteristics. *Polymers*, 14, 1575. <https://doi.org/10.3390/polym14081575>

Arturo Ojeda de la Cruz. Doctor en Filosofía en Asuntos Urbanos, maestro en Geohidrología, ingeniero civil por la Universidad Autónoma de Nuevo León. Es profesor e investigador titular en el Departamento de Ingeniería Civil y Minas, de la División de Ingeniería en la Universidad de Sonora. miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I del Conacyt. Líder del Cuerpo Académico Gestión Urbana (nivel consolidado). Es perfil Prodep por parte de la SEP. Es miembro del núcleo académico del posgrado maestría en Ingeniería Urbana. Su publicación más reciente es: Efectos Urbanos en el Consumo de Agua de los Hogares de la Zona Metropolitana de Monterrey, N. L. (2021), en el libro: *Análisis Espacial Metropolitano en Ambientes Antrópicos y Originarios*. <https://investigadores.unison.mx/es/persons/arturo-ojeda-de-la-cruz>. Correo electrónico: arturo.ojeda@unison.mx

Gerardo Ramírez Uribe. Doctor en Gestión y Valoración Urbana y Arquitectónica por la Universidad Politécnica de Cataluña. Es profesor investigador titular de tiempo completo y tiene más de 10 años de experiencia académica e investigación, así como en labores de gestión académica y administrativa en la Universidad de Sonora. Cultiva la línea de investigación Gestión Sostenible de Servicios Urbanos, y la Valoración Urbana. Es Candidato del Sistema Nacional de Investigadores, del Conacyt. Correo electrónico: gerardo.ramirez@unison.mx

Aldo Apodaca Mendoza. Egresado del posgrado Desarrollo Sustentable, e Ingeniero en Minas por la División de Ingeniería de la Universidad de Sonora. Se desarrolla en el medio profesional de la Minería en Sonora. Correo electrónico: aldoapodaca03@gmail.com

*Energía y medio ambiente en edificaciones:
casos de estudios en el Norte de México*, María
Guadalupe Alpuche Cruz, Ana Cecilia Borbón
Almada (coordinadoras), publicado por la Universidad de
Sonora y Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., se
terminó de imprimir en diciembre de 2022, en los talleres de Litográfica
Ingramex S.A. de C.V., Centeno 162-1, Granjas Esmeralda, 09810, Ciudad de
México. El tiraje fue de 50 ejemplares impresos y en versión digital en los
formatos PDF, Epub y HTML.

La problemática global sobre la optimización del recurso energético genera temáticas muy diversas en cuanto a la conservación, uso, optimización y especialmente lo relacionado con el ahorro energético, es un campo de estudio que debe continuar desarrollándose. Ciudades con climas extremos, como las presentadas en los casos de estudio del presente libro, necesitan estrategias de diseño para desarrollar e implementar tecnologías que permitan la generación de espacios habitables, confortables y eficientes en el consumo de energía.

Sin duda, los temas de estudio relacionados con la energía y los edificios son muy diversos, se han seleccionado estos temas con la intención de tocar aspectos abordados de diferentes perspectivas, pero que convergen en un mismo objetivo: ampliar el conocimiento y ofrecer soluciones prácticas en los aspectos que continúan pendientes de resolver y que cada vez son más apremiantes en función del correcto uso de la energía para beneficio del medio ambiente y combate al cambio climático.



María Guadalupe Alpuche Cruz es Doctora en Ingeniería con especialidad en Diseño Bioclimático por la UNAM. Profesora e investigadora del Departamento de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Sonora. Sus líneas de investigación son la eficiencia energética y la energía en edificaciones; la habitabilidad sustentable y la energía y medio ambiente en los proyectos arquitectónicos y urbanos. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores del Conacyt, nivel I.



Ana Cecilia Borbón Almada es Doctora en Ciencias y maestra en Arquitectura. Profesora e investigadora del Departamento de Ingeniería Civil y Minas de la Universidad de Sonora. Miembro del Sistema Nacional de investigadores del Conacyt. Sus líneas de investigación son la evaluación termo-física-estructural de materiales de construcción, diseño y construcción de prototipos de medición de propiedades térmicas de materiales y simulación energética en edificios.



**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA** PUBLICACIONES
ARBITRADAS

HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS

www.comunicacion-cientifica.com



[DOI.ORG/10.52501/CC.072](https://doi.org/10.52501/CC.072)



ISBN: 978-607-518-499-9



9 786075 184999

ISBN (USON): 978-607-518-499-9
ISBN (ECC): 978-607-59473-2-7