

 *Ciencia
Nicolaita* 87



abril de 2023

Revista Científica

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Ciencia Nicolaita

ISSN: 2007-7068

Jesús Campos García
Coordinador de la Investigación Científica

José López Bucio
Editor

Comité Editorial

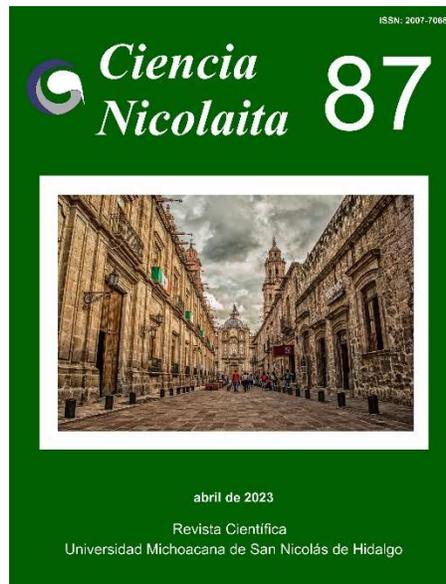
Luca Tessieri, Instituto de Física y Matemáticas; **Sabina Irene Lara Cabrera**, Facultad de Biología; **Martina Medina Nava**, Facultad de Biología; **María de Lourdes González Arqueros**, Conacyt – Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra; **Jeannette Sofía Bayuelo Jiménez**, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales; **José Miguel Cervantes Alfaro**, Facultad de Medicina; **Jorge Alejandro Verduzco Martínez**, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales; **Claudio Rubén Fuerte Esquivel**, Facultad de Ingeniería Eléctrica; **Jesús Cirilo Trujillo Jiménez**, Facultad de Ingeniería Mecánica; **Elia Mercedes Alonso Guzmán**, Facultad de Ingeniería Civil.

Comité Editorial Externo

Daniele Colosi, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México; **Carlos Alonso Maya Lastra**, Columbia University, Department of Ecology, Evolution and Environmental Biology, USA; **Rafael Ángel Reyna Hurtado**, Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Campeche, México; **Zayre Ivonne González Acevedo**, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, México; **Ramón Marcos Soto Hernández**, Colegio de Postgraduados, Postgrado en Botánica, Estado de México; **María Esther Olvera Cortés**, Centro de Investigación Biomédica de Michoacán, Instituto Mexicano del Seguro Social, México; **Ignacio Alejandro Figueroa Vargas**, Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México; **Enrique Acha Daza**, Profesor Emérito de la Universidad de Tampere, Finlandia; **Víctor Manuel Ambríz Díaz**, Instituto Tecnológico de Chihuahua; **Luis Fernando Guerrero Baca**, Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Equipo Editorial: Sergio Ramírez Murillo, Naborina Villaseñor Santoyo.

Administrador página web: Hugo César Guzmán Rivera.



Ciencia Nicolaita

ISSN: 20007-7068

Revista Ciencia Nicolaita Número 87, abril de 2023

<https://www.cic.cn.umich.mx/cn>

Directorio	2
Contenido	3
Presentación	6

VOLUMEN MONOGRÁFICO

“RESILIENCIA Y SUSTENTABILIDAD EN EL AMBIENTE CONSTRUIDO”

Editores invitados

**Elia Mercedes Alonso Guzmán, David De León Escobedo,
Aldo Iván Ramírez Orozco y Andrés Antonio Torres Acosta**

Respuesta dinámica de Torres Autosoportadas utilizando registros sintéticos de viento huracanado y atmosférico

Hugo Hernández Barrios y Carlos M. Patlán Manjarrez

<https://doi.org/10.35830/cn.vi87.626>

7

Factores inhibidores de la eficiencia energética en inmuebles patrimoniales del Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca

Karime Yasmín Hernández Matus, Heidy Gómez Barranco, Naoki Enrique Solano García y Raúl Pavel Ruíz Torres

<https://doi.org/10.35830/cn.vi87.627>

29

Desarrollo de un panel con caucho reciclado para mejorar la absorción acústica María de Jesús Olvera-Martínez, Teresa López-Lara, Juan Bosco Hernández-Zaragoza y Jaime Moisés Horta-Rangel https://doi.org/10.35830/cn.vi87.631	43
Implementación de la Realidad Virtual en los modelos BIM para la sostenibilidad Miguel Cervantes-García y David Joaquín Delgado-Hernández https://doi.org/10.35830/cn.vi87.632	61
El vidrio con película óxido conductor transparente y su uso en un espacio habitable David Álvarez Rodríguez, Haydee Pérez Castro, Jorge Flores González y Violeta Escobar Ruíz https://doi.org/10.35830/cn.vi87.634	79
Determinación de la rugosidad de discontinuidades en roca a través del método de fotogrametría José E. Arreygue Rocha, Marsella G. Rodríguez Servín y Carlos Chávez Negrete https://doi.org/10.35830/cn.vi87.657	88
Ajuste de curvas a los datos de caracterización físico-mecánica de la roca ignimbrita Marco A. Navarrete-Seras, Elia. M. Alonso-Guzmán, Wilfrido Martínez-Molina, Hugo L. Chávez-García, Mauricio Arreola-Sánchez, Jorge A. Borrego-Pérez, Cindy Lara-Gómez, Ramiro Silva-Orozco y Carlos A. Júnez-Ferreira https://doi.org/10.35830/cn.vi87.659	99
Remoción de contaminantes del agua en humedales artificiales de flujo subsuperficial, utilizando <i>Typha domingensis</i>, tezontle y grava triturada y su relación con la conductividad hidráulica Roberto García-Acevedo, Ezequiel García-Rodríguez y Norma Erika Pérez-Amezcuca https://doi.org/10.35830/cn.vi87.660	108
Sistemas de enfriamiento evaporativo para uso en elementos verticales: una revisión del estado del arte Roberto Ernesto Cárdenas-Rodríguez, Luis Aarón García Solorzano, Carlos Javier Esparza López, José Ricardo Moreno Peña y José Fidel Navarro Arellano https://doi.org/10.35830/cn.vi87.663	121
Reutilización de partículas de PET en la elaboración de morteros para construcción Marcelino Benito Vásquez-López, Prisciliano Felipe de Jesús Cano-Barrita, Frank Manuel León-Martínez y Martín Hidalgo-Reyes https://doi.org/10.35830/cn.vi87.664	134
Análisis de las propiedades físicas de suelos volcánicos de bancos de materiales para construcción: efecto en su comportamiento mecánico Diana Concepción Santos-Tress, Teresa López-Lara, Juan Bosco Hernández-Zaragoza, Jaime Horta-Rangel y Luis Arturo Vidal-Sampayo https://doi.org/10.35830/cn.vi87.666	149

Pilas helicoidales en suelos expansivos: caso de aplicación Andrea Berenice Medina Ramírez, Teresa López Lara, Jaime Moisés Horta Rangel, Juan Bosco Hernández Zaragoza y Erika Elaine Bernal Dauben https://doi.org/10.35830/cn.vi87.668	159
Estrategias de eficiencia energética en un edificio privado en clima cálido subhúmedo Andrea Palacios De Paz, Raúl Pavel Ruiz Torres, Heydi Gómez Barranco, y Eddy González García https://doi.org/10.35830/cn.vi87.670	175
Intensificación de procesos: alternativa sustentable para la producción de biocombustibles para el sector transporte María de los Ángeles Olán-Acosta, Juan Barajas-Fernández y Claudia Gutiérrez-Antonio https://doi.org/10.35830/cn.vi87.675	197
Habitar en un contexto de vulnerabilidad climática, durante una ola de calor en Torreón, Coahuila, México Alleck J. González Calderón, Jaime Andrés Quiroa Herrera y Jorge Villanueva Solís https://doi.org/10.35830/cn.vi87.700	208
Página legal y créditos	228

Presentación

La Revista **Ciencia Nicolaita** publica artículos científicos que presentan información original y novedosa relacionados con las ciencias físico-matemáticas, ciencias de la tierra, biología y química, ciencias de la salud, biotecnología y ciencias agropecuarias e ingenierías. En su época más reciente, gracias a la contribución del **Dr. Pedro Corona Chávez** como Editor en Jefe y del grupo de Editores de Sección y asistente editorial, se ha llevado a cabo una revitalización de la revista, con la presentación regular, en formato cuatrimestral, de los trabajos evaluados rigurosamente por los revisores. Agradecemos al **Dr. Corona Chávez** por su excelente trabajo en dicho cargo, el cual concluyó el pasado mes de diciembre. Estamos seguros que sus aportaciones se verán reflejadas en la consolidación de la revista. Con ese mismo espíritu se asume como uno de los compromisos de la actual administración la obtención del registro de Ciencia Nicolaita en el padrón de revistas del CONACYT.

Para abonar en la consecución de las nuevas metas, se incorporó como Editor en Jefe al **Dr. José López Bucio**, quien toma la tarea de coordinar los esfuerzos del equipo editorial, para que, con la participación de la comunidad científica nicolaita, así como de colegas de otras instituciones educativas y de investigación, se mantenga la vocación de difundir a la sociedad los avances en el conocimiento con los más altos estándares de calidad.

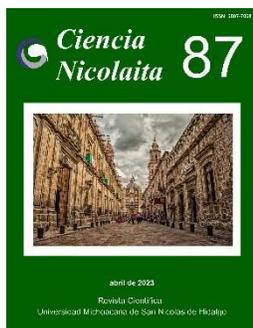
Una de las tareas inmediatas es disminuir el tiempo de la primera revisión de los manuscritos sometidos a **Ciencia Nicolaita** a un máximo de dos meses y el de publicación de los artículos aceptados a no más de cuatro meses. El compromiso de los editores seguirá siendo contribuir con su experiencia en la mejoría de los contenidos, trabajando en cercanía con los autores y atendiendo con prontitud las recomendaciones de los revisores.

Es importante mencionar que los artículos que se publican en **Ciencia Nicolaita** cuentan con el registro de Latindex, así como con identificadores URL y DOI, con lo que se facilita su seguimiento en las bases de datos y su presentación pública.

El número 87 de **Ciencia Nicolaita** incluye 15 artículos de la sección de ingeniería civil y arquitectura, contribuciones seleccionadas para el volumen especial “Resiliencia y sustentabilidad en el ambiente construido”, rigurosamente revisados por Elia Mercedes Alonso Guzmán, David De León Escobedo, Aldo Iván Ramírez Orozco y Andrés Antonio Torres Acosta, como editores invitados. En este número se publican reportes que consideramos de gran relevancia, los cuales abordan temas que van desde las propiedades de los materiales que se utilizan en la construcción y su reciclaje, soportes estructurales, eficiencia energética, así como modelos de sostenibilidad, confort y tratamiento de residuos, tan necesarios en la actualidad. Esperamos que este número cumpla con las expectativas de los autores y que tenga una buena recepción por parte de los lectores.

Finalmente, confiamos en que la comunidad científica siga considerando a **Ciencia Nicolaita** como el escaparate para difundir en el futuro próximo sus trabajos de investigación.

Jesús Campos García, Pedro Corona Chávez, José López Bucio



Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Respuesta dinámica de Torres Auto-soportadas utilizando registros sintéticos de viento huracanado y atmosférico

Dynamic response of Self-supporting Towers using synthetic histories of hurricane and atmospheric wind

Hugo Hernández Barrios* y Carlos M. Patlán Manjarrez

Para citar este artículo: Hernández Barrios Hugo y Patlán Manjarrez Carlos M., 2023. Respuesta dinámica de Torres Auto-soportadas utilizando registros sintéticos de viento huracanado y atmosférico. Ciencia Nicolaita no. 87, 7-28. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.626>



Historial del artículo:

Recibido: 2 de mayo de 2022

Aceptado: 6 de octubre de 2022

Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: hugo.hernandez@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Respuesta dinámica de Torres Autoportadas utilizando registros sintéticos de viento huracanado y atmosférico

Dynamic response of Self-supporting Towers using synthetic histories of hurricane and atmospheric wind

Hugo Hernández Barrios* y Carlos M. Patlán Manjarrez

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Morelia, Michoacán, México

Resumen

En las últimas décadas, debido a los fuertes vientos huracanados en México, se han colapsado varias torres autoportadas para telecomunicaciones, causando pérdidas económicas y sociales importantes. Las torres autoportadas de telecomunicaciones son altamente sensibles a los efectos dinámicos de las cargas de viento. El objetivo de este trabajo es comparar la respuesta dinámica de torres autoportadas en términos de desplazamientos, utilizando historias de viento sintéticas, de viento atmosférico y de huracán. Las historias sintéticas de viento atmosférico se simularon aplicando el método espectral de dos y cuatro parámetros, y la metodología denominada Viento Sintético. Las historias de viento de huracán se realizaron por medio de la técnica de Montecarlo.

Palabras clave: torres autoportadas, diseño eólico, vientos huracanados, simulación de series de tiempo, análisis dinámico

Abstract

In recent decades, due to strong hurricane winds in Mexico, several self-supporting towers for telecommunications have collapsed, causing significant economic and social losses. Self-supporting telecommunications towers are highly sensitive to the dynamic effects of wind loads. The objective of this work is to compare the dynamic response of self-supporting towers in terms of displacements, using synthetic wind histories of atmospheric and hurricane winds. Synthetic atmospheric wind histories were simulated by applying the spectral method of two and four parameters, and the methodology called synthetic wind. The hurricane wind histories were made using the Monte Carlo technique.

Keywords: self-supported tower, wind design, hurricane winds, wind series simulations, dynamic analysis



Introducción

En la última década, en la República Mexicana, se ha incrementado el uso de sistemas de telefonía, radio y telecomunicación. Las torres de telecomunicación componen el 90% de la infraestructura civil de este tipo de sistema, por lo que en caso de desastres naturales es importante que la comunicación no se interrumpa, ya que es el medio para coordinar las tareas de reacción y contrarrestar los efectos de los fenómenos naturales que afectan a una comunidad o ciudad; la infraestructura utilizada en dichos sistemas tiene un carácter vital, no por su costo económico, sino por su importancia social. En México no existen códigos exclusivos para el diseño eólico de este tipo de estructuras; sin embargo, los lineamientos que existen desde 1993 y hasta la fecha (MDOC, 1993, 2008 y 2020), sugieren que este tipo de estructuras, por ser inmuebles de telecomunicaciones principales, se clasifiquen como del grupo A o importantes. A nivel internacional los códigos de diseño eólico AS 3995-1994, TIA-222-G-1-2019 y S37-01 CSA-2006, sugieren que estas estructuras pueden clasificarse como principales o secundarias cuando son de apoyo a las principales.

Las torres de telecomunicación comúnmente construidas en México, son del tipo autosoportadas, es decir, estas están formadas por marcos de celosías con perfiles estructurales de acero. En la práctica profesional la altura de las torres va de los 19 m a los 85 m y, por lo general, se construyen en tramos de 6 m. En Hernández-Barrios, De León y Valdés (2013) se revisa-

ron 214 proyectos estructurales de torres autosoportadas, construidas en diversas zonas de México y calculadas por cinco diferentes despachos especializados en cálculo estructural. La relación del número de torres analizadas y su altura se muestran en la Figura 1, siendo la altura más empleada la de 30 m.

La configuración estructural de las torres de celosías construidas en México, son de dos tipos: 1) cuadradas con sección constante para alturas de hasta de 40 m y con sección variable cuando se trata de alturas que pueden alcanzar hasta los 100 m; y 2) triangulares con alturas que van desde los 19.0 m a los 60.0 m (Figura 2).

Debido a sus características estructurales, las torres de celosías autosoportadas tienen propiedades dinámicas que las hacen más susceptibles a los efectos eólicos que a las cargas sísmicas (Smith, 2007). La demanda de la excitación eólica en México se ha incrementado ya que registros de velocidades de viento obtenidos recientemente, indican un incremento del orden del 30% con respecto a las registradas hace 25 años, principalmente en las zonas de generación de huracanes. Este incremento de velocidades se debe principalmente al aumento de la temperatura en los mares y en las capas atmosféricas, causado por el calentamiento global de la Tierra (Hernández-Barrios, 2010).

En la Tabla 1 se muestran las velocidades medias del viento registradas en el MDOC-1993 y en el

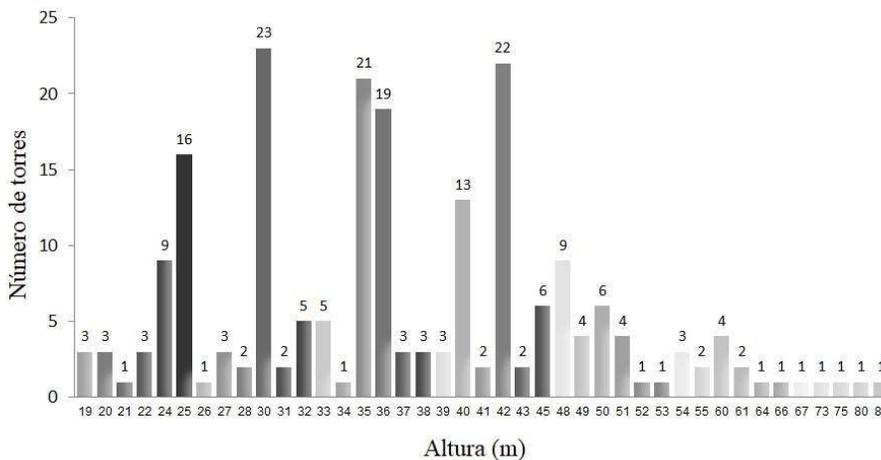


Figura 1. Altura de las torres autosoportadas, comúnmente diseñadas en México.

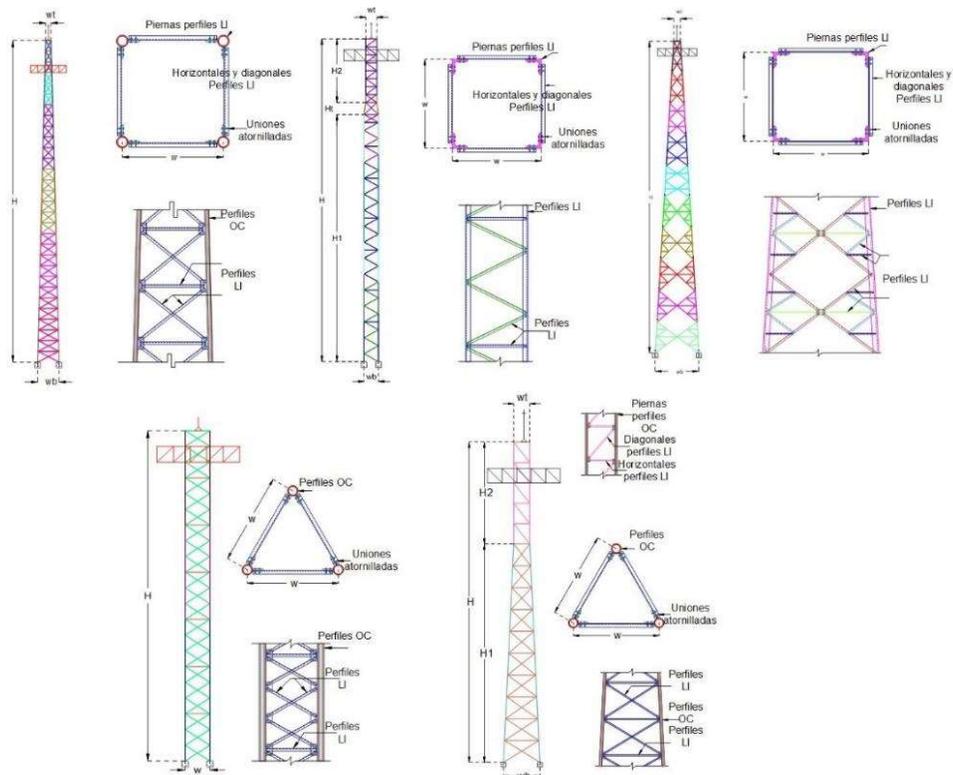


Figura 2. Configuración estructural de las torres de celosías construidas en México.

MDOC-2020 en algunas ciudades de México en las que se registran un incremento —datos más detallados en Hernández-Barrios (2010) y en Soto (2022)—, para un periodo de retorno de 50 años y su incremento en términos de porcentaje; mientras que en la Tabla 2 se muestran las mismas relaciones, pero para un periodo de retorno de 200 años. En la Tabla 1 se observa cómo en Tepic, Nayarit, el incremento de velocidades medias es del 30% para un periodo de retorno de 50 años; en tanto que en la Tabla 2, para Cozumel, Quintana Roo, es del 33% para un periodo de retorno de 200 años.

Año con año, durante los meses de mayo a diciembre, la República mexicana se ve afectada por la incidencia de fuertes vientos en las zonas costeras del Golfo de México y del Pacífico. Después de haber realizado un análisis estadístico de la incidencia de los ciclones tropicales en México desde 1950 hasta 2021, en los cuales se han reportado 232 huracanes, se identifica una alta incidencia en el estado de Quintana Roo, y para el caso de Michoacán, una incidencia media alta, con la presencia de un gran número de huracanes categoría 2, según se observa en la Figura 3 (Soto, 2022).

Tabla 1
Velocidades medias registradas en las versiones MDOC-93-20, periodo de retorno 50 años

División política	Ciudad	MDOC-2020	MDOC-1993	Incremento (%)
		Velocidad (km/h)		
Nayarit	Tepic	132.50	102.00	29.90
Quintana Roo	Cozumel	198.70	158.00	25.76
Coahuila	Piedras Negras	193.60	155.00	24.90
San Luis Potosí	Río Verde	137.12	111.00	23.53
Michoacán	Morelia	108.10	92.00	17.50



Tabla 2

Velocidades medias registradas en las versiones MDOC-93-20, periodo de retorno de 200 años

División política	Ciudad	MDOC-2020	MDOC-1993	Incremento (%)
		Velocidad (km/h)		
Nayarit	Tepic	148.80	115.00	29.39
Quintana Roo	Cozumel	245.50	185.00	32.70
Coahuila	Piedras Negras	209.10	168.00	24.46
San Luis Potosí	Río Verde	155.12	130.00	19.32
Michoacán	Morelia	120.50	102.00	18.14



Figura 3. Susceptibilidad de incidencia de huracanes en México por estado (Soto, 2022).

Además de la incidencia y del incremento de número de ciclones tropicales en México que afectan principalmente a los municipios de las costas, es importante remarcar que en la parte centro del país conocida como Franja Volcánica Transmexicana, o también llamada eje Neovolcánico Transversal o simplemente Eje Volcánico (Figura 4) en la que se ubican 14 estados y viven más de 50 millones de personas, se pueden registrar velocidades regionales de diseño del mismo orden que las que se han presentado en la costa Michoacana.

En la Figura 4 se muestran las velocidades regionales de viento medidas a 10 m de altura en terreno categoría 2 (terreno plano y libre de obstrucciones) para un periodo de retorno de 200 años y promediadas a 10 minutos (Soto, 2022). Es importante considerar que el tiempo de promediación de un registro eólico, es un parámetro clave de diseño y que las velocidades de viento registradas por los organismos internacionales para la medición de huracanes, la consideran en un minuto como viento sostenido, y para comparar

con las velocidades de viento registradas en el Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Viento (MDOC, 2020), habrá que hacer la equivalencia mostrada en la Tabla 3. Por lo que según la Figura 4, en algunos estados del centro de México, es posible que se presenten velocidades de diseño típicas de un huracán categoría 1-alto y categoría 2-bajo.

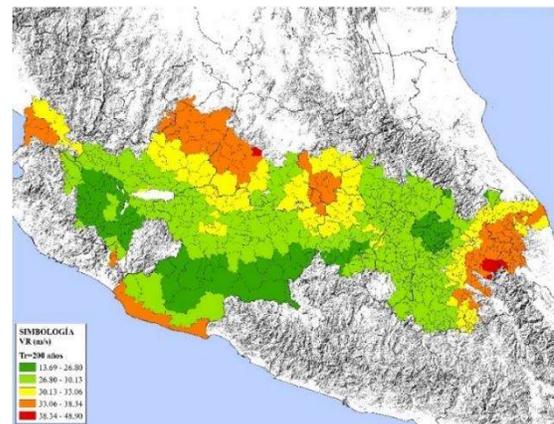


Figura 4. Velocidades regionales en el Eje Volcánico y en Michoacán (Soto, 2022).

Tabla 3
Velocidades de viento para ciclones tropicales según la escala de Saffir-Simpson.

Ciclón Tropical	Velocidad sostenida, tiempo de promediación					
	1 min			10 min	3 s (MDOC 2020)	
	nodos	m/s	km/h	m/s	m/s	km/h
Depresión tropical	34≤	≤ 17.8	≤ 64.0	≤ 15.5	≤ 23.13	≤ 83.0
Tormenta tropical	35-63	17.8-32.8	64.00-118	15.6-28.9	23.14 - 43.2	83.1 - 145
Categoría 1	64-82	32.9-42.2	118 - 154	29.0-37.1	43.3 - 55.4	146 - 190
Categoría 2	83-95	42.7-48.9	154 -178	37.2-43.0	55.5 - 64.2	191 -219
Categoría 3	96-112	49.3-57.6	178 -210	43.1-50.7	64.3 -75.7	220 -259
Categoría 4	113-136	58.1-70.0	210 -250	50.8- 61.5	75.8 - 91.8	260-308
Categoría 5	≥ 137	≥ 70.0	≥ 250	≥61.6	≥91.9	≥309.7

Por otro lado, la zona geográfica donde se ha documentado la mayor cantidad de tornados en México, se extiende desde el sur de Veracruz hasta Nayarit (León-Cruz, 2019), a lo largo de la Franja Volcánica Transmexicana. Entre los años 2000 y 2012, los municipios del Estado de México fueron los lugares de mayor incidencia de tornados (Macías y Avendaño, 2013). En la Figura 5 (Soto, 2022) se observa la incidencia de tornados en diversos estados que pertenecen a la Franja Volcánica Transmexicana, incluyendo a Michoacán. Las velocidades registradas han sido equivalentes a un Tornado EF2 (escala de Fujita mejorada) que son comparables a las que presenta un huracán categoría 3 (escala Saffir-Simpson).

Probablemente, una gran cantidad de torres de celosías autoportadas han colapsado (Figura 6) debido a las altas velocidades del viento atmosférico, el incremento del número de ciclones tropicales y la aparición de tornados en zonas geográficas en las que no era

común su incidencia, aunado a las metodologías simplificadas de diseño proporcionadas por los códigos.

El objetivo de este trabajo es realizar la respuesta dinámica empleando un software comercial (SAP 2000; ver Figura 14) ampliamente usado en México por los despachos de cálculo, lo que lo hace de aplicación práctica convencional. Se realizaron simulaciones de ráfagas de viento atmosférico y simulaciones de ráfagas de huracán; para ambos casos se considerará la hipótesis de estacionariedad de la excitación (Tianyou y Wang, 2016).

Expresiones simplificadas de diseño

En México, el Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Viento (MDOC, 2020) es el documento que sirve como guía de diseño para este tipo de estructuras. En la edición anterior de dicho manual (MDOC, 2008), el primer autor de este trabajo actualizó el procedimiento de diseño para el cálculo de la respuesta dinámica equivalente de torres de celosías. El procedimiento propuesto se basó en el criterio del Factor de Amplificación Dinámico (FAD), adaptando las expresiones sugeridas por las normas japonesas de diseño eólico de estructuras (AIJ, 2005) para un tiempo de promediación de la velocidad de 3 s. La mayoría de los códigos de diseño eólico en el mundo (Hernández-Barrios, 2009) proponen calcular la respuesta dinámica de estructuras con base en un método simplificado, en el que existe un solo factor de respuesta o factor de amplificación en todos los puntos de la estructura considerada como un oscilador de un grado

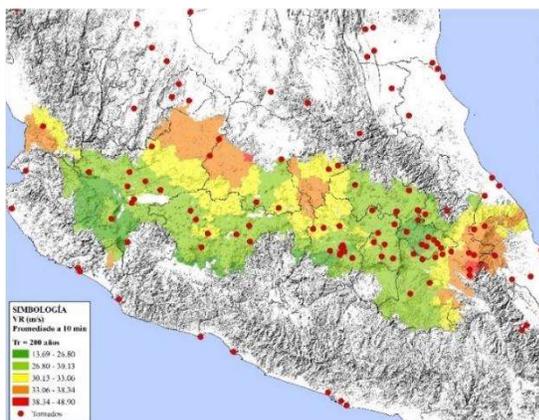


Figura 5. Incidencia de tornados en la Franja Volcánica Transmexicana (Soto, 2022).



Figura 6. Fallas estructurales de torres de celosías autoportadas.

de libertad. Holmes (1994, 1996a, 1996b) propone una metodología más detallada para calcular la respuesta dinámica de este tipo de estructuras, en la cual se calculan tres diferentes factores de respuesta de ráfaga que varían con la altura de la estructura: 1) G_p para la fuerza cortante; 2) G_m para el momento flexionante; y 3) G_x para el desplazamiento. Para torres de comunicación autoportadas, existen algunos códigos de diseño especializados (AS 3995-1994, TIA-222-G-1-2019, S37-01 CSA-2006) que proponen calcular el factor de amplificación de manera diferente. En la referencia TIA-222-G-1 (2019) se proponen calcular el factor de ráfaga, G_h , con:

$$G_h = 0.85 + 0.15 \left[\frac{H}{45.7} - 3.0 \right] \quad (1)$$

Donde H es la altura de la torre en metros y el valor del factor de ráfaga se encuentra entre 0.85 y 1.0.

En el código canadiense S37-2018 CSA (2018) se define un factor de ráfaga estático independiente de la altura, y propone un valor de $C_g=2$ para torres de celosías autoportadas, valor que está basado en una velocidad media horaria.

El coeficiente de amortiguamiento con respecto al crítico, es la suma del coeficiente de amortiguamiento estructural más el coeficiente de amortiguamiento ae-

rodinámico. El amortiguamiento aerodinámico aumenta con la velocidad media y contribuye grandemente en el amortiguamiento total de la estructura. Para estructuras formadas por celosías, el amortiguamiento aerodinámico comúnmente es alto debido a la poca masa de la estructura; y a altas velocidades puede ser mayor que el amortiguamiento estructural. En Holmes (1994) se usa un valor del coeficiente de amortiguamiento aerodinámico del orden de tres veces el valor del coeficiente de amortiguamiento estructural. La mayoría de los códigos de diseño proponen valores del 1% y del 2% de amortiguamiento estructural con respecto al crítico, para torres soldadas y atornilladas, respectivamente. Sin embargo, algunos códigos sugieren despreciar el amortiguamiento aerodinámico y considerar el estructural del orden de 5% (AS/NZN 1170.2). Experimentalmente, Glanville (1997) encontró valores del amortiguamiento estructural con respecto al crítico, relativamente bajos, del orden de 0.3 y 1.1%.

Perfil de velocidad media del viento sinóptico

Actualmente existen tres modelos que permiten obtener el perfil teórico de velocidades medias del viento: ley de potencia, ley logarítmica y ley logarítmica corregida. Los códigos de diseño eólico suelen utilizar la ley de potencia y la ley logarítmica para el

cálculo del perfil de velocidades medias del viento; sin embargo, es recomendable utilizar el perfil logarítmico corregido de Harris y Deaves (1980), ya que este modelo contempla la altura de la capa límite atmosférica del sitio de interés. Las ecuaciones para cada perfil de velocidades son:

Para la ley de potencia,

$$\bar{U}(z) = \bar{U}(z_r) \left(\frac{z - z_d}{z_r} \right)^a \quad (2)$$

Donde Z_r es la altura de referencia ($Z_r = 10$ m) y a es el exponente propuesto por Counihan el cual está definido como:

$$a = 0.096 \log_{10} z_o + 0.016 (\log_{10} z_o)^2 + 0.24 \quad (3)$$

Para la ley logarítmica,

$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z - z_d}{z_o} \right) \quad (4)$$

Para la ley logarítmica corregida,

$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z - z_d}{z_o} \right) + 5.75b - 1.88b^2 - 1.33b^3 + 0.25b^4 \right] \quad (5)$$

Donde κ es la constante de Von Kármán ($\kappa \approx 0.4$) y u^* es la velocidad de fricción del viento, la cual está definida como

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho_a}} = \bar{U}(z_r) \sqrt{r_D} \quad (6)$$

Donde τ_s es el esfuerzo cortante de la superficie del terreno y r_D es el coeficiente de arrastre de la superficie del terreno, el cual a su vez está dado por

$$r_D = \left[\frac{\kappa}{\ln(z_r / z_o)} \right]^2 \quad (7)$$

Por último, el parámetro b queda definido como

$$b = \frac{z - z_d}{z_g} \quad (8)$$

Donde la altura gradiente está dada por

$$z_g = \frac{u^*}{6 f_c} \quad (9)$$

Donde f_c es el coeficiente de Coriolis en s^{-1} , el cual a su vez queda definido como

$$f_c = 2 \Omega \sin(\zeta) \quad (10)$$

Donde Ω es la velocidad angular de la Tierra ($\Omega = 7.27 \times 10^{-5}$ rad/s) y ζ es la latitud del sitio de interés en grados decimales.

En la Figura 7 se muestra la comparación de los tres modelos de los perfiles de velocidad media, considerando un sitio con latitud de 21.10° y una velocidad media del viento a 10 m de altura de 32 m/s y cuatro diferentes valores de la longitud de rugosidad del terreno, z_o . La velocidad media del viento por debajo de z_r puede considerarse como constante.

En la Figura 7 se observa que la ley de potencia y la ley logarítmica tienden a subestimar la velocidad media del viento conforme la altura se incrementa. Por lo tanto, se recomienda usar siempre la ley logarítmica corregida para el perfil teórico de velocidades medias del viento.

Simulación de ráfagas de viento sinóptico

La simulación de las historias de viento atmosférico se realizó por medio de tres metodologías: 1) Técnica Espectral de dos parámetros; 2) Técnica Espectral de cuatro parámetros; y 3) Técnica denominada Viento Sintético. Para realizar las simulaciones de ráfagas de huracán se utilizaron las expresiones recomendadas por Tamura *et al.* (2012). Una vez realizadas las simulaciones de ráfagas de viento en cada punto de interés de la torre, éstas se aplicarán en cada área expuesta de la torre (Figura 8).

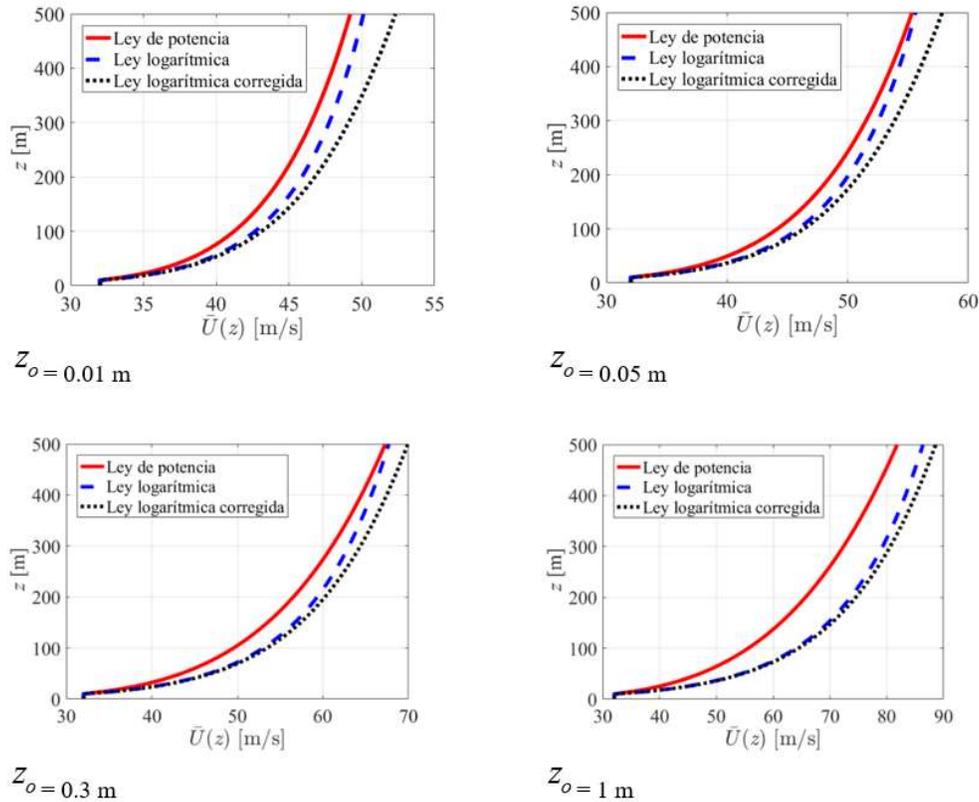


Figura 7. Comparación de $\bar{U}(z)$ para diferentes valores de Z_o

Simulación de historias de viento atmosférico

Las fluctuaciones de la velocidad del viento reflejan la superposición de los innumerables torbellinos o vórtices en un flujo de aire que producen la turbulencia y cuyo movimiento puede ser descrito como oscilatorio armónico de una frecuencia dada. Uno de los métodos numéricos más recurrentes para describir la velocidad fluctuante del viento, consiste en simularlo por medio de la suma de funciones que traducen movimientos armónicos de diferentes frecuencias y amplitudes, con ángulos de fase aleatorios. Este tratamiento matemático se conoce como el método de WAWS (Weighted Amplitude Wave Superposition) o descomposición espectral.

Metodología espectral de dos parámetros

Para el cálculo de las velocidades de viento que representan las ráfagas, $\tilde{v}(z, t)$, si se considera que las

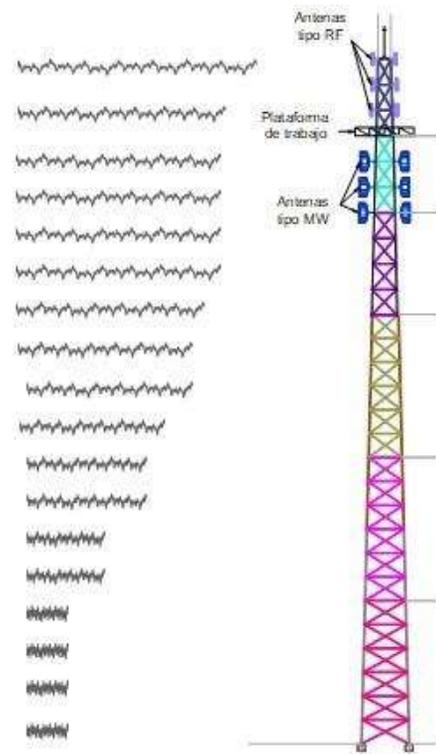


Figura 8. Aplicación de las historias de viento, modelo de la torre.

historias de velocidades están correlacionadas en diferentes puntos de la estructura (Shinozuka y Jan, 1972), las fluctuaciones de la velocidad del viento se expresan por medio de la sumatoria de N funciones armónicas de diferentes frecuencias y amplitudes que son funciones de la densidad espectral de potencia, por medio de la expresión,

$$\tilde{v}(z,t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{2S_v(z, f_n)\Delta f} [\cos(2\pi f_n t + \phi_n)] \quad (11)$$

Donde $S_v(z, f_n)$ es el espectro de potencia del viento.

La Ecuación 2 se puede escribir,

$$\tilde{v}(z,t) = \sum_{n=1}^N A_n [\cos(2\pi f_n t + \phi_n)] \quad (12)$$

Donde ϕ_n es ángulo de fase aleatorio de la función armónica n de valor comprendido entre $[0, 2\pi]$ rad y la amplitud A_n está referida como,

$$A_n = \sqrt{2S_v(f_n, z)\Delta f} \quad (13)$$

Donde el intervalo de frecuencias se obtiene dividiendo una banda de frecuencias de interés, de los valores comprendidos entre f_1 y f_N , entre $N - 1$ intervalos de igual frecuencia.

$$\Delta f = \frac{f_N - f_1}{N - 1} \quad (14)$$

Las frecuencias referidas en este trabajo están comprendidas en el intervalo de f_n en $[0.01; 7.00]$ Hz. La discretización en el dominio de las frecuencias se efectúa considerando N número de frecuencias f_n , que van de $i = 1, \dots, N$, o de forma equivalente en el intervalo de frecuencias Δf adoptado, tal que $N = 2^m$. En este trabajo se tomó $m = 12$. El valor del intervalo debe satisfacer la relación $2^m = \frac{f_N - f_1}{\Delta f} + 1$. Las series se obtienen para un intervalo T de 600 s, es decir, de 10 minutos y el intervalo de tiempo es $\Delta t = \frac{T}{2^{m-1}}$.

Para considerar las velocidades del viento entre dos puntos extremos que no estén correlacionadas,

Shinozuka y Jan (1972) propusieron un proceso numérico para simular las velocidades fluctuantes del tiempo que contempla la correlación temporal y la espacial. En este proceso la velocidad fluctuante del viento descrita en M puntos del espacio por un vector $\tilde{v}_j(t)$, para el cual $j = 1, 2, \dots, M$, se puede representar como,

$$\tilde{v}_j(t) = \begin{Bmatrix} \tilde{v}_1(t) \\ \tilde{v}_2(t) \\ \vdots \\ \tilde{v}_M(t) \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Se requiere la descomposición de la matriz de densidad espectral cruzada $S(f_n) = [S_{v_j v_k}(f_n)]_{M \times M}$ representada por,

$$S(f) = \begin{bmatrix} S_{v_1 v_1}(f_n) & S_{v_1 v_2}(f_n) & \dots & S_{v_1 v_M}(f_n) \\ S_{v_2 v_1}(f_n) & S_{v_2 v_2}(f_n) & \dots & S_{v_2 v_M}(f_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{v_M v_1}(f_n) & S_{v_M v_2}(f_n) & \dots & S_{v_M v_M}(f_n) \end{bmatrix} \quad (16)$$

Los elementos de $S_{v_j v_k}(f_n)$ para $j, S_{v_j v_k}(f_n), j \neq k$ están dados por la ecuación,

$$S_{v_j v_k}(f_n) = \sqrt{S_v(z_j, f_n)S_v(z_k, f_n)} \text{Coh}(P_j, P_k; f_n) \quad (17)$$

y representa la densidad espectral cruzada para la frecuencia f_n de dos procesos $\tilde{v}_j(t)$ y $\tilde{v}_k(t)$ en los puntos $P_j(x_j, y_j, z_j)$ y $P_k(x_k, y_k, z_k)$, respectivamente. Los elementos de la diagonal principal $j, k = 1, 2, \dots, M, j = k$, representan la función de densidad espectral del proceso $\tilde{v}_j(t)$ para la frecuencia f_n , y se obtienen con,

$$S_{v_j v_j}(f_n) = \sqrt{S_v(z_j, f_n)S_v(z_j, f_n)} \text{Coh}(P_j, P_j; f_n) = S_v(z_j; f_n) \quad (18)$$

La Ecuación 17 se puede ver que es igual a la Ecuación 18 cuando $j = k$, tal que $\text{Coh}(P_j, P_j; f_n) = 1.0$. Suponiendo que se admitieran N número de frecuencias f_n para generar $\tilde{v}_j(t)$ será necesario definir N matrices cuadradas de $M \times M$,

$$S(f_n) = \left[S_{v_j v_k}(f_n) \right]_{M \times M} \quad (19)$$

Existen dos métodos para realizar la descomposición de la matriz $S(f_n)$: 1) Descomposición de Cholesky y (2) Descomposición POD o descomposición de Karhunen-Loeve (Chen y Kareem, 2005; Thai y Tamura, 2008; Thai, 2009). En este trabajo se utilizó la descomposición de Cholesky, para la cual se usa el modelo numérico de Shinozuka y Jan (1972) para simular la componente fluctuante de velocidades de viento en los puntos $j = 1, 2, 3, \dots, M$,

$$\tilde{v}_j(t) = \sum_{k=1}^j \sum_{n=1}^N \left[H_{jk}(f_{kn}) \left[2\sqrt{\Delta f} \right] \cos \left[2\pi f_{kn} t + \theta_{jk}(f_{kn}) + \phi_{kn} \right] \right] \quad (20)$$

Donde Δf es el intervalo de frecuencias considerado, ϕ_{kn} es el ángulo de fase comprendido entre 0 y 2π , y H_{jk} es el elemento genérico de la matriz triangular inferior,

$$H(f_{kn}) = \left[H_{jk}(f_{kn}) \right]_{M \times M} \quad (21)$$

La cual es obtenida de,

$$S(f_n) = H(f_{kn}) \bar{H}^T(f_n) \quad (22)$$

En la que $\bar{H}^T(f_n)$ es la matriz traspuesta conjugada de $H(f_{kn})$.

La Ecuación 22 representa la descomposición de Cholesky de la matriz de densidad espectral cruzada $S(f_n)$. El ángulo de fase está definido por,

$$\theta_{jk}(f_{kn}) = \tan^{-1} \frac{\Im \{ H_{jk}(f_{kn}) \}}{\Re \{ H_{jk}(f_{kn}) \}} \quad (23)$$

Y las frecuencias

$$f_{kn} = \left(n + \frac{k}{M} - 1 \right) \Delta f \quad (24)$$

Para $n = 1, 2, 3, \dots, N$.

Metodología espectral de cuatro parámetros

La técnica de cuatro parámetros o modelo de la velocidad del viento a pequeña escala, es un proceso estocástico que supone que en cada instante la velocidad del viento, $v_w(t)$, está formada por la suma de cuatro componentes,

$$v_w(t) = v_{wa} + v_{wr}(t) + v_{wg}(t) + v_{wt}(t) \quad (25)$$

Siendo v_{wa} el valor de la velocidad promedio y corresponde al promedio aritmético de la velocidad del viento registrada durante un cierto periodo; $v_{wr}(t)$ la componente rampa que representa un incremento continuo de la velocidad del viento; $v_{wg}(t)$ es la componente de la ráfaga del viento; y $v_{wt}(t)$ es la componente de la turbulencia.

La componente de rampa, $v_{wr}(t)$, se emplea para la simulación de cambios en la velocidad del viento, cuyo comportamiento puede ser considerado de manera aproximada como lineal (ascenso y descenso). Esta rampa es caracterizada por tres parámetros: la amplitud de la rampa, $\hat{A}_r \left(\frac{m}{s} \right)$; el tiempo de inicio de la rampa, $T_{sr}(s)$; y el tiempo final de la rampa, $T_{er}(s)$. La formulación matemática de la componente de rampa de la velocidad del viento se describe con:

$$t < T_{sr} \quad \text{para} \quad v_{wr} = 0$$

$$T_{sr} \leq t \leq T_{er} \quad \text{para} \quad v_{wr} = \hat{A}_r \frac{(t - T_{sr})}{(T_{er} - T_{sr})} \quad (26)$$

$$T_{er} < t \quad \text{para} \quad v_{wr} = \hat{A}_r$$

Las ráfagas representadas por fluctuaciones rápidas en la velocidad del viento, $v_{wg}(t)$, tienen cierta variación en los picos y la parte estable de la curva, es decir, un cambio temporal en la velocidad del viento.

La ráfaga está caracterizada por tres parámetros: la amplitud, $\hat{A}_g \left(\frac{m}{s}\right)$, el tiempo de inicio, $T_{sg}(s)$ y el tiempo final, $T_{eg}(s)$. La formulación matemática de la componente de ráfaga, $v_{wg}(t)$, de la velocidad del viento se describe con:

$$t < T_{sg} \quad \text{para} \quad v_{wg} = 0$$

$$T_{sg} \leq t \leq T_{eg} \quad \text{para} \quad v_{wg} = \hat{A}_g \left\{ 1 - \cos \left[2\pi \frac{(t - T_{sg})}{(T_{eg} - T_{sg})} \right] \right\} \quad (27)$$

$$T_{eg} < t \quad \text{para} \quad v_{wg} = 0$$

La componente de la turbulencia del viento, $v_{wt}(t)$, se obtiene de la misma manera que en el método propuesto por Shinozuka y Jan (1972). La suma de los valores máximos de la componente de rampa, $v_{wr}(t)$, y de la componente de la ráfaga del viento, $v_{wg}(t)$, se considera en este trabajo como:

$$v_{wr}(t) + v_{wg}(t) = 0.50v_{wa} \quad (28)$$

Además, se consideró que el tiempo de la ráfaga no debe exceder del 60% del tiempo de la señal simulada, y que el periodo de duración de rampa está limitado al 80% del tiempo de estudio. De esta manera, la amplitud de la componente de ráfaga, $v_{wg}(t)$, para la j -ésima señal es del 25% del valor medio de la velocidad, v_{wa} ; mientras que la amplitud de la rampa, $v_{wr}(t)$, para la j -ésima señal es del 25% del valor medio de la velocidad, v_{wa} .

Metodología denominada viento sintético

La importancia de incorporar en este trabajo la técnica de simulación de viento atmosférico denominada Viento Sintético, es que fue la primera técnica sugerida por una norma de diseño eólico en el mundo y es, hasta hoy en día, ampliamente utilizada en Brasil.

Franco (1993) presentó una técnica para determinar la presión del viento, considerando la carga aleatoria con un enfoque probabilístico desarrollado por

Davenport (1962), así como del método de Monte-carlo. Dicha técnica la denominó Viento Sintético y consiste en transformar la carga aleatoria del viento obtenido a través de un espectro de potencia en funciones armónicas de diferentes frecuencias y fases aleatorias, en dichas frecuencias se incluyen la frecuencia fundamental de la estructura a analizar. Franco (1993) empleó el método Viento Sintético para analizar la acción del viento en un edificio de concreto con una altura de 158 m, conocido como la Torre Norte del Centro Empresarial Naciones Unidas, ubicado en São Paulo, Brasil. Los resultados fueron comparados con los obtenidos con la norma brasileña y con el programa de cálculo para estructuras de concreto armado, mostrando buena aproximación entre ambos métodos.

Carril (2000) modeló una torre autosoportada de 100 m de altura y evaluó su comportamiento dinámico ante la acción del viento utilizando tres metodologías: el método de Davenport, el propuesto en la norma brasileña y el método del Viento Sintético; concluyó que los resultados obtenidos mediante el método del Viento Sintético presentan diferencias relativamente grandes en relación con los resultados generados con el procedimiento dinámico de la norma brasileña y el método de Davenport. Reyolando *et al.* (2000) evaluaron el efecto del viento sobre una torre para telecomunicaciones de concreto, aplicando el método estático y el dinámico propuesto en la norma brasileña y por el método del Viento Sintético. Sosa (2006) estudió el comportamiento dinámico de un edificio de concreto armado de 102 m de altura mediante el método del Viento Sintético, el método simplificado de la norma brasileña y el método estático. Encontró que los desplazamientos obtenidos con los tres métodos son similares; sin embargo, las aceleraciones obtenidas mediante el método simplificado resultaron ser hasta 132% más altas que las obtenidas por medio del método del Viento Sintético. Chaves (2009) destaca que el método propuesto por Franco (1993), a pesar de su dificultad computacional, sobresale como la opción más viable para considerar el aspecto de confort de los usuarios.

De acuerdo con Franco (1993), la aproximación de este método se mejora mientras más funciones armónicas se tengan; sin embargo, el procesamiento se complica si la cantidad de armónicos es muy grande, la sugerencia que se hace es que se tome una cantidad

de armónicos $m \geq 11$, considerando que $m = 11$ es una buena aproximación, además se recomienda realizar por lo menos 20 series de simulaciones de la carga dinámica para determinar la respuesta media.

La descripción de la técnica de simulación denominada Viento Sintético, en forma detallada, se encuentra en Hernández-Barrios, Mosqueda y Huergo (2018), por lo que en este trabajo únicamente se registran los resultados de la aplicación de dicha técnica.

Perfil de velocidades medias del viento huracanado

La metodología utilizada en este trabajo es la propuesta por Fernández *et al.* (2020), adecuando el perfil de velocidades medias por el propuesto en Snaiki y Teng (2018). Dicho perfil está dado por:

$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \eta_0 \sin\left(\frac{z}{\delta}\right) \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \right] \quad (29)$$

Siendo z la altura de interés en metros del punto donde se desea calcular la velocidad media; u^* la velocidad de fricción del viento en m/s; η_0 es una constante de valor 9.026; κ es la constante de Von Kármán de valor 0.4; δ es la altura máxima de velocidad de huracán; y z_0 la altura de rugosidad del terreno (Tabla 4). La velocidad de fricción del viento se puede aproximar mediante,

$$u^* \approx \frac{k \bar{U}(z_r)_{D,10 \text{ min}}}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (30)$$

Donde $\bar{U}(z_r)_{D,10 \text{ min}}$ es la velocidad de diseño con un tiempo de promediación de 10 minutos en m/s; y z_r es la altura de referencia igual a 10 m.

Simulación de historias de viento huracanado

Actualmente, en ningún código internacional de diseño eólico se contempla explícitamente la utilización de simulaciones de viento huracanado para el cálculo de la respuesta dinámica. Es evidente que en la literatura existe un gran número de propuestas de expresiones para el cálculo del espectro de densidad de potencia del viento, pero para todos los casos, solo es contemplado para viento sinóptico. Los modelos teóricos más comunes se muestran en la Tabla 5 (Huergo, 2021).

Tabla 4
Categoría del terreno y su rugosidad.

Categoría de Terreno	z_0 (m)	Descripción
I	0.01	Lagos o área plana con vegetación despreciable y sin obstáculos.
II	0.05	Área con pocas obstrucciones, como vegetación, hierba y obstáculos aislados (árboles, edificios, etc.).
III	0.30	Área con cobertura regular de vegetación o edificios o con obstáculos aislados (terreno suburbano, bosque permanente).
IV	1.00	Área en la que al menos el 15% de la superficie está cubierta con edificios y su altura promedio supera los 15 m.

Tabla 5
Modelos más comunes del espectro de densidad de potencia del viento.

Modelo	Espectros de potencia de $u(z, t)$
Kolmogorov (1941)	$S_u(z, f) = \frac{0.26 (u^*)^2 [f z / \bar{U}(z)]^{\frac{2}{3}}}{f}$
Von Kármán (1948)	$S_u(z, f) = \frac{4 \sigma_u^2(z) L_u(z) / \bar{U}(z)}{1.339 \left[1 + 39.48 (f L_u(z) / \bar{U}(z))^2 \right]^{5/6}}$
Davenport (1961)	$S_u(z, f) = \frac{2 \sigma_u^2(z) [1200 f / \bar{U}(z)]^2}{3 f (1 + f^2 (1200)^2 / \bar{U}^2(z))^{4/3}}$
Von Kármán modificado por Harris (1968)	$S_u(z, f) = \frac{4 \sigma_u^2(z) L_u(z) / \bar{U}(z)}{\left[1 + 70.8 (f L_u(z) / \bar{U}(z))^2 \right]^{5/6}}$
Harris (1970)	$S_u(z, f) = \frac{2 \sigma_u^2(z) [1800 f / \bar{U}(z)]}{3 f \left[2 + (1800 f / \bar{U}(z))^2 \right]^{5/6}}$
Kaimal (1972)	$S_u(z, f) = \frac{105 (u^*)^2 z / \bar{U}(z)}{\left[1 + 33 (f z / \bar{U}(z)) \right]^{5/3}}$
Simiu (1974)	$S_u(z, f) = \frac{200 (u^*)^2 f z / \bar{U}(z)}{f \left[1 + 50 (f z / \bar{U}(z)) \right]^{5/3}}$
Högström <i>et al.</i> (1982)	$S_u(z, f) = \frac{86.6 (u^*)^2 f z / \bar{U}(z)}{f \left[1 + 29.6 (f z / \bar{U}(z)) \right]^{5/3}}$
Solari (1993)	$S_u(z, f) = \frac{6.868 \sigma_u^2(z) L_u(z) / \bar{U}(z)}{\left[1 + 10.302 (f L_u(z) / \bar{U}(z)) \right]^{5/3}}$
Kaimal modificado por Hiriart (2001)	$S_u(z, f) = \frac{100 (u^*)^2 z / \bar{U}(z)}{\left[0.44 + 33 (f z / \bar{U}(z)) \right]^{5/3}}$

En este trabajo se utilizará el espectro de densidad de potencia de Von Kármán, el cual es definido como el que mejor representa la acción de huracanes (Tamura *et al.*, 2012; Fernández *et al.*, 2020):

$$S_u(\omega) = \frac{4 \sigma_u^2 \frac{f L_u}{h}}{n \left[1 + 70.8 \left(\frac{f L_u}{h} \right)^2 \right]^{5/6}} \tag{31}$$

Donde $f = \frac{nh}{\bar{U}}$ es la coordenada de Monin; $n = \frac{2\pi}{\omega}$ es la frecuencia en Hz; L_u es la longitud de escala integral de la turbulencia; y σ_u^2 es la varianza de la componente turbulenta. La longitud de escala integral (Solari y Piccardo, 2001) se determina mediante:

$$L_u = 300 \left(\frac{h}{200} \right)^v \quad (32)$$

Siendo

$$v = 0.67 + 0.05 \ln(z_o) \quad (33)$$

La varianza está dada por:

$$\sigma_u^2 = \beta (u^*)^2 \quad (34)$$

Donde:

$$\beta = (2.72 - 0.25 \log(z_o))^2 \quad (35)$$

La velocidad total del viento a la altura z , es la suma de la velocidad media más la ráfaga, es decir:

$$U(z, t) = \bar{U}(z) + u(z, t) \quad (36)$$

Donde $U(z, t)$ es la velocidad total del viento a la altura z ; y $u(z, t)$ la velocidad de la ráfaga del viento obtenida con,

$$u_i(t_j) \cong \sqrt{\Delta\omega} \sum_{m=1}^i \sum_{k=1}^{N_\omega} |H_{im}(\omega_{mk})| \cos(\omega_{mk} t_j + \phi_{mk}) \quad (37)$$

Donde $\Delta\omega = \omega_u / N_\omega$; ω_u es la frecuencia de corte de la simulación; $N_\omega = N_T = T / \Delta t$ es el número de puntos de la simulación; T es la duración total de la simulación; Δt es el intervalo de muestreo del registro simulado; ω_{mk} es la frecuencia angular de interés; y ϕ_{mk} es el ángulo de fase generado pseudoaleatoriamente entre $[0, 2\pi]$. Empleando la descomposición de Cholesky, de la matriz del espectro de densidad cruzada, se puede conocer la matriz $H(\omega)$.

$$S_{u_i u_i}(\omega) = H(\omega) H^*(\omega)^T \quad (38)$$

Las simulaciones de la ráfaga requieren considerar la coherencia espacial, esto se realiza mediante el espectro de densidad cruzada,

$$S_{u_1 u_2}(\omega) = \sqrt{S_{u_1}(\omega) S_{u_2}(\omega)} \exp(-f_{12}(\omega)) \quad (39)$$

Donde

$$f_{12}(\omega) = \frac{2n \sqrt{k_z^2 \Delta z^2}}{[(\bar{U}(z_1) + \bar{U}(z_2))]} \quad (40)$$

Siendo $f_{12}(\omega)$ la función de coherencia; Δz la distancia vertical entre los puntos z_1 y z_2 ; y k_z el coeficiente de decaimiento igual a 10.

Ejemplo de aplicación

Como ejemplo de aplicación se consideró una torre de celosía autoportada para telecomunicaciones construida con perfiles estructurales de acero. La geometría general de la torre se muestra en la Figura 9. La altura total de la torre es de 100.3 m, con sección transversal cuadrada con una base de 9.5 m de lado y un remate de 1.80 m. Para realizar el modelo se consideraron tres tramos y cada uno se dividió en secciones (Figura 9).

Los perfiles estructurales utilizados, los coeficientes de arrastre, C_d , y las áreas de contacto en la dirección perpendicular al viento, $A(m^2)$, para cada sección en la que se dividió la torre, se describen en la Tabla 6. Para el análisis se despreció la masa de las antenas de microondas.

En la Tabla 7 se resumen las tres primeras frecuencias de vibrar obtenidas mediante un software comercial (SAP, 2000; ver Figura 14).

Las formas modales asociadas a los tres primeros modos de vibrar se muestran en la Figura 10.

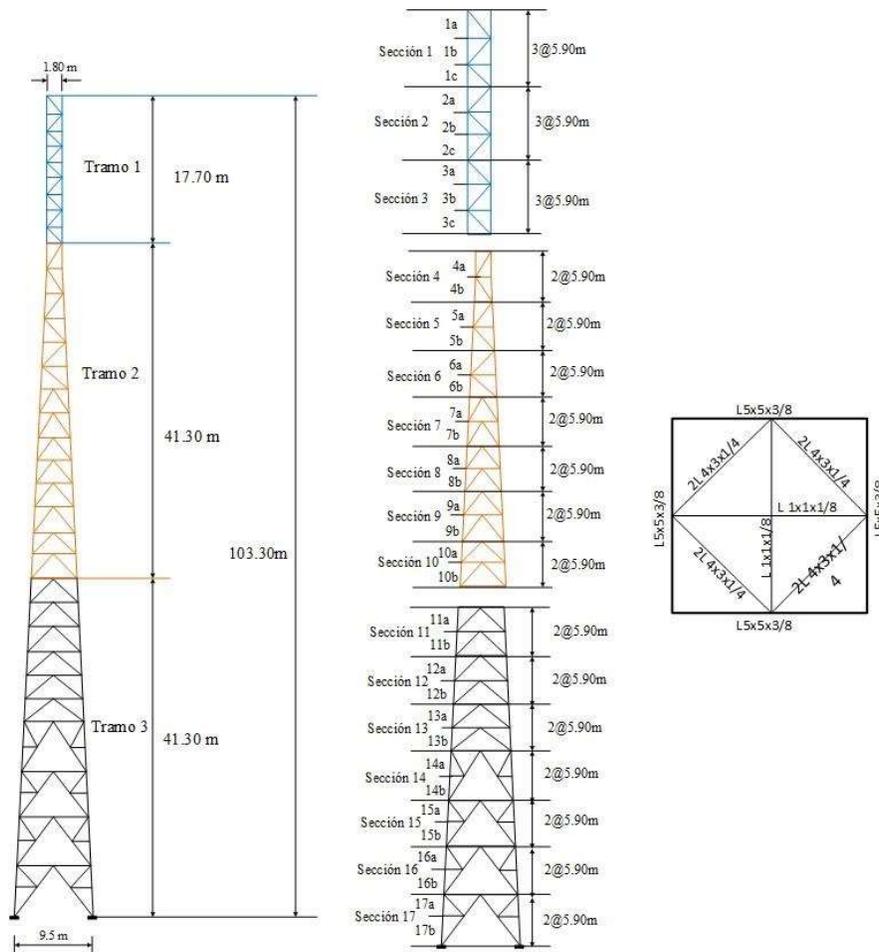


Figura 9. Geometría general de la torre autoportada de celosías.

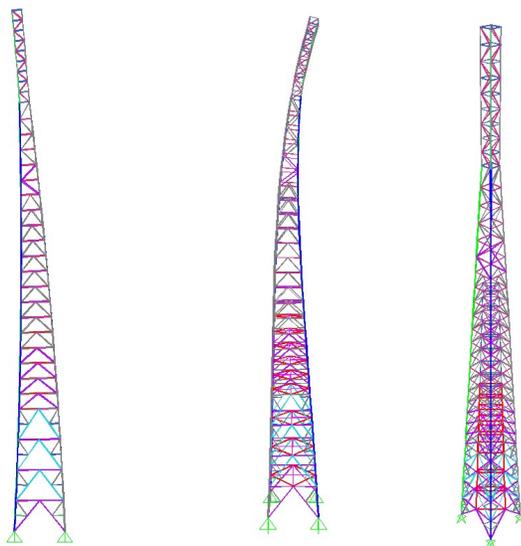


Figura 10. Primeras dos formas modales de la torre autoportada en estudio.

Resultados: viento sinóptico

Para realizar las simulaciones de viento atmosférico se consideró una velocidad media del viento a 10 m de altura promediada a 10 minutos de 23.74 m/s (85 km/h), velocidad que corresponde a un terreno tipo III con una longitud de rugosidad del terreno de 0.3 m. Para las tres técnicas de simulación empleadas en este trabajo, se consideró el espectro de potencia de velocidad de Davenport y un coeficiente de decaimiento de $C_z=7$ y $C_y=12$.

Para la simulación de las historias de tiempo empleando de la técnica de cuatro parámetros se consideró:

$$0.25v_{wr}(t) + 0.25v_{wg}(t) = 0.50v_{wa} \quad (41)$$

Para cada una de las $j = 1, 2, 3 \dots 37$ simulaciones.



Tabla 6
Propiedades estructurales de cada sección de la torre.

Altura (m)	Sec.	Perfil (mm)	Cd	Á(m ²)	Altura (m)	Sec.	Perfil (mm)	Cd	Á(m ²)
100.3	1a		2.5	0.531	53.1	9a		3.10	2.28
	1b	L 64 x 64 x 4.7	3.15	0.531		9b	2L 102 x 102 x 9.5	3.10	2.28
	1c		3.15	0.531	47.2	10a		3.15	2.3775
94.4	2a		3.05	0.602		10b	2L 102 x 102 x 9.5	3.15	2.3775
	2b	L 76 x 76 x 6.4	3.05	0.602	41.3	11a		3.11	2.765
	2c		3.05	0.602		11b	2L 127 x 127 x 9.5	3.11	2.765
88.5	3a		2.90	0.708	35.4	12a		3.05	3.247
	3b	L 102 x 102 x 6.4	2.90	0.708		12b	2L 127 x 127 x 9.5	3.05	3.247
	3c		2.38	1.239	29.5	13a		3.10	3.341
82.6	4a		2.78	1.4145		13b	2L 127 x 127 x 9.5	3.10	3.341
	4b	2L 102 x 102 x 6.4	2.78	1.4145	23.6	14a		3.15	3.353
76.7	5a		2.78	1.78		14b	2L 152 x 152 x 9.5	3.15	3.353
	5b	2L 102 x 102 x 6.4	2.78	1.78	17.7	15a		3.15	3.59
70.8	6a		2.86	1.967		15b	2L 152 x 152 x 9.5	3.15	3.59
	6b	2L 102 x 102 x 6.4	2.86	1.967	11.8	16a		3.20	3.59
64.9	7a		2.90	2.2		16b	2L 152 x 152 x 9.5	3.20	3.58
	7b	2L 102 x 102 x 7.9	2.90	2.2	5.9	17a		3.20	3.808
59.0	8a		3.02	2.23		17b	2L 152 x 152 x 9.5	3.20	3.808
	8b	2L 102 x 102 x 9.5	3.02	2.23					

En el análisis dinámico, paso a paso se adoptó un amortiguamiento proporcional del 1% y la respuesta dinámica de la torre fue calculada para las tres metodologías de simulaciones. En la Figura 11 se muestran las historias de desplazamientos en la parte superior de la torre obtenidas con las tres metodologías de simulación empleadas en este trabajo.

Se realizó la simulación de 10 series para cada metodología de simulación. Una vez realizados todos los análisis, la respuesta característica se puede calcular con:

1) Por medio de una distribución de extremos de Gumbel (Carril, 2000) que admite una curva exponencial para la distribución de probabilidad, considerando

un índice de confianza del 95%, es decir, una probabilidad del 5% de ser excedida; se considera como valor característico la variable seleccionada aquel valor que más se aproxime al valor obtenido de x_c ,

Tabla 7
Periodos y frecuencias de vibrar.

Modo	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)
1	0.7448	1.3422
2	2.3581	0.4206
3	4.4604	0.2242

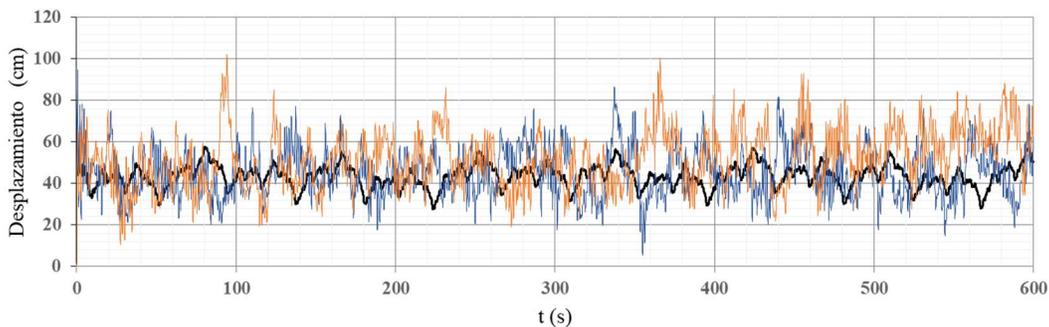


Figura 11. Comparación de la historia de desplazamientos en la parte superior de la torre:

— Viento sintético, — dos parámetros, — cuatro parámetros.

$$x_c = \bar{x} + \frac{w}{\tilde{\alpha}} \tag{42}$$

Donde,

$$w = -\ln[-\ln(0.95)] = 2.970195249 \tag{43}$$

La medida de dispersión,

$$\tilde{\alpha} = \frac{\pi}{\sigma\sqrt{6}} \tag{44}$$

Donde σ es la desviación estándar y la moda es,

$$\bar{x} = \mu - \frac{\gamma}{\tilde{\alpha}} \tag{45}$$

Donde la media es μ y la constante de Euler $\gamma = 0.5772157$.

2) Por medio de una distribución Gaussiana con una probabilidad del 95% de ocurrencia, es decir, del 5% de ser excedida,

$$x_{m\acute{a}x} = \mu + 1.65\sigma \tag{46}$$

Donde $x_{m\acute{a}x}$ es el valor máximo probable de la variable aleatoria.

Utilizando la terminología empleada en el MDOC-2020, la relación entre la respuesta máxima y la media se conoce como Factor de Amplificación Dinámico (FAD). En la Tabla 8 se muestran los resultados de los desplazamientos medios probables, X_{medio} (m); los desplazamientos máximos dinámicos probables, $X_{m\acute{a}x}$ (m); y el FAD asociado a ellos.

En la Tabla 8 se puede ver que los desplazamientos medios obtenidos con las tres metodologías son similares. Por otro lado, la respuesta máxima probable se obtiene con la técnica de cuatro parámetros (1.11 m); sin embargo, el FAD mayor se obtiene para la metodología de dos parámetros (2.60). El FAD obtenido con la metodología de Viento Sintético es del orden del 51% menos comparado con el FAD obtenido con la metodología de los dos parámetros, y del orden del 56% menos comparado con el obtenido con la metodología de cuatro parámetros. De forma general, y considerando que la metodología de cuatro parámetros da valores medios y máximos, mayores que las otras dos metodologías, se puede considerar que del lado de la seguridad, es la metodología ingenierilmente la recomendable.

Tabla 8
Desplazamientos medios y máximos dinámicos, así como su FAD.

Metodología	$X_{m\acute{a}x}$ (m)	X_{medio} (m)	FAD
Dos parámetros	1.07	0.41	2.60
Cuatro parámetros	1.11	0.47	2.36
Viento sintético	0.53	0.40	1.33

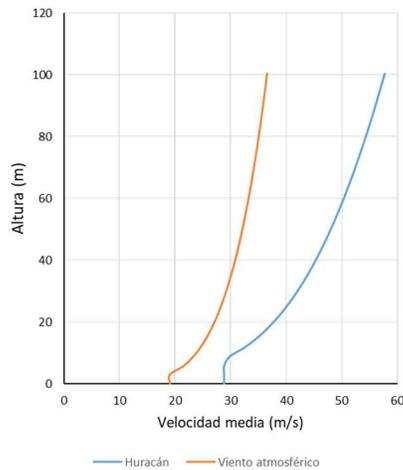


Figura 12. Comparación de perfiles teóricos de velocidad media.

Resultados: huracanado

Para las simulaciones de viento huracanado se consideró una velocidad de 30 m/s (108 km/h), a 10 m de altura promediada a 10 minutos y una altura gradiente $\delta=862.45$ m. En la Figura 12 se muestra la comparación de los perfiles de velocidad media para viento atmosférico considerado con la ley logarítmica corregida y con la expresión (29).

En la Figura 13 se muestran las historias de viento simuladas por la técnica espectral con cuatro parámetros para el caso de huracanes. Las velocidades se calcularon en un punto ubicado a una altura de 40 m.

En la Figura 14 se muestran las historias de desplazamientos en la parte superior de la torre, obtenidas considerando en las simulaciones del viento sinóptico

una velocidad media a 10 m de altura de 23.74 m/s y para el viento huracanado de 30 m/s.

En la Tabla 9 se muestran los desplazamientos medios y máximos probables calculados con historias de tiempo simuladas considerando viento huracanado.

El FAD obtenido para una carga de huracán es del 4.25, es decir, la respuesta máxima probable es del orden de 4.25 veces la respuesta media. Es lógico que el modelo elástico de la torre no refleja el comportamiento real que se obtendría ante una carga de huracán, como la contemplada en este trabajo, ya que es probable que incurriera en el intervalo inelástico primero, y se formarían articulaciones plásticas antes del colapso. Este tema será abordado en investigaciones futuras por los autores de este trabajo.

Conclusiones

Las torres autosportadas para telecomunicaciones son estructuras altamente sensibles a las cargas eólicas y, debido a su importancia económica y social, se clasifican como estructuras que deben permanecer en operación después de la ocurrencia de algún evento extraordinario de la naturaleza, como son vientos atmosféricos fuertes o ciclones tropicales.

Para obtener la carga eólica, en este trabajo se realizaron simulaciones de historias de viento atmosférico por medio de dos metodologías espectrales conocidas como de dos y cuatro parámetros, así como la metodología ampliamente utilizada en Suramérica, denominada Viento Sintético. Para el caso de simulaciones de vientos huracanados, se utilizó la técnica de Montecarlo y parámetros de ciclones tropicales sugeridos en la bibliografía especializada. Se realizaron 10

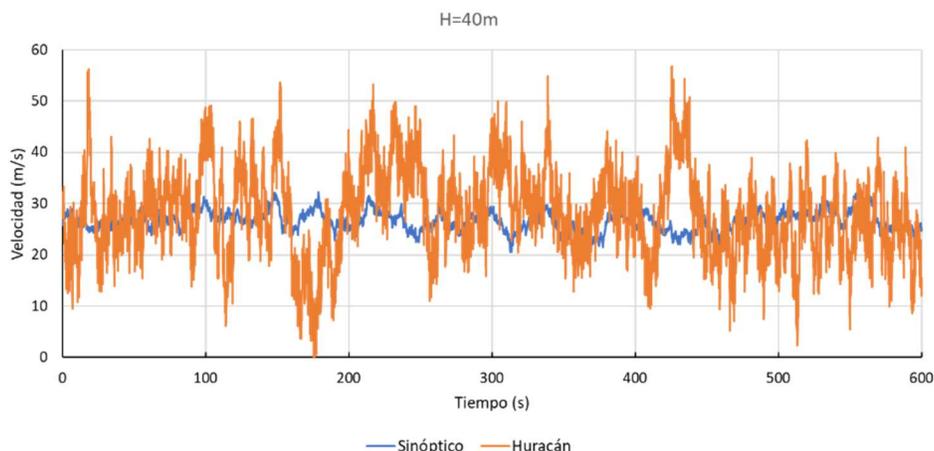


Figura 13. Historia de fuerzas sintéticas, viento sinóptico y huracán a 40 m de altura.

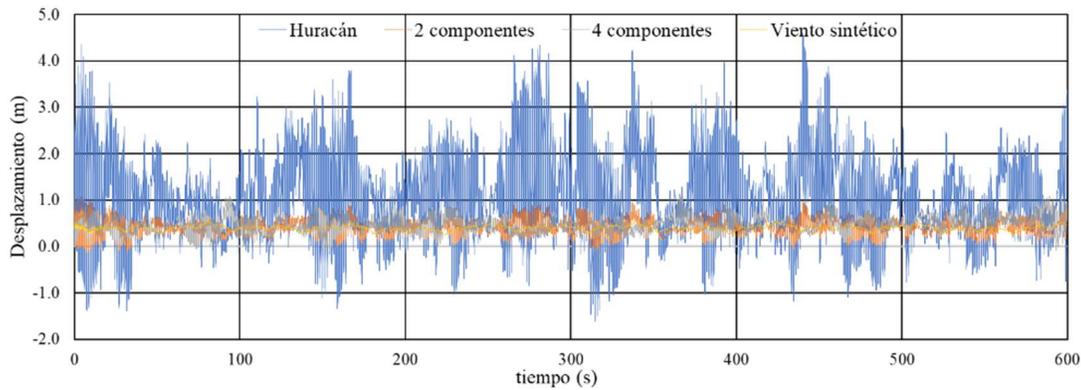


Figura 14. Respuesta dinámica de desplazamientos en la parte superior de la torre.

Tabla 9
Desplazamientos medios y máximos dinámicos, así como su FAD.

Metodología	$X_{m\acute{a}x}(m)$	$X_{medio}(m)$	FAD
Huracán	4.60	1.08	4.25

series de simulaciones para elaborar los análisis dinámicos, uno para cada técnica de simulación, con lo cual se pretende considerar la forma modal y los modos superiores de vibrar de la estructura, evitando utilizar la metodología simplificada recomendada en los códigos de diseño y que en ocasiones no reflejan las características estructurales necesarias para evitar colapsos.

Como ejemplo de aplicación se utilizó una torre de celosías de 103 m de alto con características estructurales comúnmente utilizadas en México. Los resultados obtenidos muestran que la mejor técnica para hacer simulaciones de viento atmosférico es la metodología espectral de dos o cuatro parámetros y que es posible obtener la respuesta máxima dinámica de una torre ante cargas de huracán, procedimiento no establecido en ningún código de diseño. Con lo anterior se contribuye con el diseño de estructuras resilientes y sustentables ante los efectos adversos de los cambios climáticos, al conocer el estado de carga que hará que probablemente las torres autosoportadas incursionen en el intervalo inelástico para que se diseñe adecuadamente y se mantenga funcionando durante la ocurrencia de una carga eólica extrema.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la Facultad de Ingeniería Civil, que por medio de la Coordinación de la Investigación

Científica, otorgaron el apoyo necesario para la realización de este trabajo. Asimismo, se agradece al CONACyT por el apoyo otorgado para la realización de estudios de posgrado del autor Carlos M. Patlán M. Especial agradecimiento para el Dr. Iván Huergo Ríos, quien apoyó con los análisis estructurales.

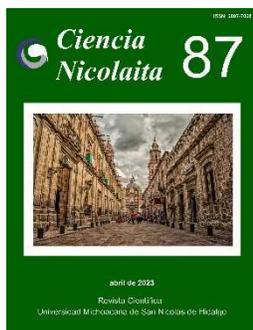
Referencias

AIJ, 2005, Recommendations for Load on Buildings, Chapter 6, Wind Loads, *Architectural Institute of Japan*.
 AS/NZS 1170.2:2021, 2021, Structural Design Actions, Part. 2, Wind actions, *Australian/New Zealand Standard*. ISBN 978-0-7337-9805-4.
 AS 3995-1994, 1994, Australian Standard, Design of Steel lattice towers and masts. ISBN 0 7262 8945 6.
 Carril, C., 2000, Análise numérica e experimental de efeito para telecomunicações: Tesis Doctoral, *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, São Paulo.
 Chaves, J., 2009, Análise dinâmica de pórticos metálicos contraventados: Tesis de Maestría, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, *Universidade de Brasilia*, Brasilia.
 Chen, J. and Liang, L., 2012, Investigation on Dynamic Response of Steel Tower Structure under Time-history Wind Load: *Applied Mechanics and Materials*, 166-169, 699-707. DOI:[10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.699](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.699)



- Chen, X. and Kareem, A., 2005, Proper orthogonal decomposition-based modeling analysis and simulation of dynamic wind load effects on structures: *Journal of Engineering Mechanics*, 131(4), 325-339. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2005\)131:4\(325\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:4(325))
- Davenport, A.G., 1962, The response of slender line-like structures to a gusty Wind: *Proc. Institution of Civil Engineers*, 23, 389-408.
- Fernández, L., Chavero, B., Martín, R. and Elena, P., 2020, Dynamic analysis of self-supported tower under hurricane wind conditions: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 197. <http://doi.org/10.1016/j.jwea.2019.104078>
- Franco, R., 1993, Direct along wind dynamic analysis of tall structures, Departamento de Ingeniería de Estructuras y Cimentaciones, Boletín técnico de la *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, São Paulo.
- Glanville, M.J. and Kwok, K.C., 1997, Wind-induced deflection of freestanding lattice towers: *Engineering Structures*, 19(1), 79-91. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(96\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(96)00025-9)
- Harris, R.I. and Deaves, D.M., 1980, The structure of strong winds, Wind Engineering in the Eighties: Proceeding of the CIRIA, Conference held on 12-13 November 1980: *London, Construction Industry Research and Information Association*, paper 4.
- Hernández-Barrios, H., Muñoz-Black, C. and López-López, A., 2009, Along-wind response in prismatic structures, design statements in Mexico: *11th Americas Conference on Wind Engineering, San Juan Puerto Rico*, June 22-26.
- Hernández-Barrios, H., 2010, El impacto del cambio climático en el diseño eólico de estructuras civiles en México: *México, 6to. Congreso Estatal de Ciencia y Tecnología, COECyT, Michoacán*, artículo 434.
- Hernández-Barrios, H., De León-Escobedo D. and Valdés-Vázquez, G., 2013, Simplified expresion to predict the Dynamic response of self-supporting tower: *Structure and Infrastructure Engineering*. <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2012.759239>
- Hernández-Barrios, H., Mosqueda, S. and Huergo, R.I., 2018, Respuesta eólica de Estructuras tipo punto ante Viento Sintético: *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, SMIE, noviembre, Campeche, Campeche, México*.
- Holmes, J.D., 1994, Along-wind response of lattice towers: part I-derivation of expression for gust response factors: *Engineering Structures*, 16(4), 287-292. [https://doi.org/10.1016/041-0296\(94\)90069-8](https://doi.org/10.1016/041-0296(94)90069-8)
- Holmes, J.D., 1996a, Along-wind response of lattice towers-II. Aerodynamic damping and deflections: *Engineering Structures*, 18(7), 483-488. [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(95\)00131-X](https://doi.org/10.1016/0141-0296(95)00131-X)
- Holmes, J.D., 1996b, Along-wind response of lattice towers-III. Effective load distributions: *Engineering Structures*, 18(7), 489-494. [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(95\)00166-2](https://doi.org/10.1016/0141-0296(95)00166-2)
- Huergo, R.I., 2021, Control pasivo de vibraciones inducidas por viento en edificios altos con base flexible: Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Leite, E., 2015, Análise comparativa entre respostas de torre de transmissão sujeita a carregamentos obtidos através do método do vento sintético e da norma NBR 6123/88: Tesis de Maestría, *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, programa Pós-graduação em Engenharia Civil*.
- León-Cruz, J.F., 2019, Climatología y meteorología de Tornados en México: Tesis Doctoral en Geociencias Aplicadas, Posgrado en Geociencias Aplicadas, *Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.*
- Macías-Medrano, J. and Avendaño-García, A., 2014, Climatología de tornados en México, Investigaciones Geográficas: *Boletín del Instituto de Geografía*, 83. ISSN: 0188-4611. <http://doi:10.14350/ig.3526>.
- MDOC, 2008, Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento: *México, Comisión Federal de Electricidad*.
- MDOC, 2020, Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento: *México, Comisión Federal de Electricidad*.
- NBCC 48192, 2020, National Building Council Canada, 1, Structural Commentaries (part 4 of Division B). <http://doi.org/10.4224/w324-hv93>
- Reyolando, M.L., Pauletti, R.M., Lanza, E. and Carril Jr., C., 2000, Efeito do Vento sobre uma Torre para Telecomunicações em Concreto Pré-moldado: *V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo*.
- Shinozuka, M. and Jan, M., 1972, Digital simulation of random process and its applications: *Journal of Sound and Vibration*, 25(1), 111-128. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(72\)90600-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(72)90600-1)
- Smith, W.B., 2007, Communication Structures, *Thomas Telford*. ISBN: 978 0 7277 3400 6.

- Snaiki, R. and Teng, W., 2018, A semi-empirical model for mean wind velocity profile of landfalling hurricane boundary layers: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 180, 249-261.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.08.004>
- Solari, G. and Piccardo, G., 2001, Probabilistic 3-D turbulence modeling for gust buffeting of structures: *Probabilistic Eng. Mech.*, 16, 73-86.
- Sosa, E., 2006, Análise estrutural de edifício alto submetido às pressões flutuantes induzidas pela ação do Vento: Tesis de Maestría, *Universidade Federal de Minas Gerais*, Belo Horizonte.
- Soto-Hernández, M.C., 2022, Efectos de las tormentas severas y velocidades de viento en México: Tesis de Maestría en el área de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*.
- S37-2018 CSA, 2018, Antennas, Towers, and Antenna-Supporting Structures, *Canadian Standards Association*.
- Tamura, Y., Cao, S. and Gian, L.T., 2012, Wind characteristics of strong tropical cyclones. Institute, ISFWEIAC-CBRR: *VI National Conference on Wind Engineering*, Roorkee at New Delhi, India.
- TIA-222-G-1, 2019, TIA Standard, Structural Standards for Steel Antenna Towers and Antenna Supporting Structures-Addendum 1, *Telecommunications Industry Association*.
- Thai, L.H. and Tamura, Y., 2008, Analysis and identification of multivariate random pressure fields using covariance and spectral proper transformations: *VNU Journal of Science, Mathematical-Physics*, 24, 209-222.
- Thai, L. H., 2009, Proper orthogonal decomposition and recent advanced topics in wind engineering: *VNU Journal of Science, Mathematical-Physics*, 25, 21-38.
- Tianyou, T. and Wang, H., 2016, Wind Characteristics of a Tropical Storm from Stationary and Nonstationary Perspectives: *The 2016 World Congress on Advances in Civil, Environmental and Materials Research*, ACEM16, Korea.



Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Factores inhibidores de la eficiencia energética en inmuebles patrimoniales del Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca

Lack of energy efficiency in heritage buildings at the Historic Center of the City of Oaxaca

Karime Yasmín Hernández Matus,* Heidy Gómez Barranco, Naoki Enrique Solano García y Raúl Pavel Ruíz Torres

Para citar este artículo: Hernández Matus Karime Yasmín,* Gómez Barranco Heidy, Solano García Naoki Enrique y Ruíz Torres Raúl Pavel, 2023. Factores inhibidores de la eficiencia energética en inmuebles patrimoniales del Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca. Ciencia Nicolaita no. 87, 29-42. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.627>



Historial del artículo:

Recibido: 2 de mayo de 2022
Aceptado: 25 de septiembre de 2022
Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: karime.hdzm@gmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Factores inhibidores de la eficiencia energética en inmuebles patrimoniales del Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca

Lack of energy efficiency in heritage buildings at the Historic Center of the City of Oaxaca

Karime Yasmín Hernández Matus,^{1*} Heidy Gómez Barranco,¹ Naoki Enrique Solano García² y Raúl Pavel Ruíz Torres³

¹Universidad Autónoma “Benito Juárez” de Oaxaca, Facultad de Arquitectura “5 de Mayo”. México

²Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura, Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje. Ciudad de México, México

³Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Arquitectura. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

Resumen

El presente artículo tiene como objetivo analizar los principales factores que inhiben la difusión de la eficiencia energética en los inmuebles del Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca. La escasa incorporación del enfoque en inmuebles históricos situados en las zonas urbanas del país, ha ralentizado los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) y ha promovido a los agentes de deterioro. Los resultados mostraron que los aspectos económicos y administrativos son los principales factores que dificultan la incorporación de dichas estrategias; sin embargo, su identificación permite promover la conservación integral del patrimonio edificado en un entorno exiguamente abordado.

Palabras clave: patrimonio edificado, sustentabilidad, eficiencia energética

Abstract

This article analyzes the main factors that inhibit the spread of energy efficiency in buildings in the Historic Center of Oaxaca. This is due to the scant incorporation of the focus on historic buildings located in urban areas of the country, slowing down the Sustainable Development Goals and promoting spoilage agents. The results showed that the economic and administrative aspects are the main factors that hinder the incorporation of these strategies; however, its identification allows to promote the integral conservation of the built heritage in an environment that is poorly addressed.

Keywords: Built heritage, sustainability, energy efficiency.

Introducción

Desde la Cumbre de Río, en 1992, se ha incitado la incorporación de la eficiencia energética en todos los inmuebles, incluidos los históricos. Esta meta se basó en las recomendaciones del Informe Brundtland (1987) y ha sido reforzada por el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS, por sus siglas en inglés) en su Plan Científico, Patrimonio Cultural y Acción Climática (2021-2024), así como en la Agenda 2030 de la ONU-Hábitat. Empero, actualmente las ciudades demandan entre el 60% y el 80% de la energía global, y producen hasta el 75% de las emisiones de carbono (Organización de las Naciones Unidas, 2017), sometiendo a los entornos históricos del país a una gran cantidad de contaminantes antropogénicos, sobre todo los insertos en las centralidades urbanas.

La sustentabilidad del patrimonio busca incorporar técnicas innovadoras para gestionar el cambio climático y atenuar los daños ocasionados por los agentes de deterioro, especialmente los relacionados con la contaminación atmosférica. Particularmente, la eficiencia energética busca realizar las mismas actividades mediante la disminución de la energía utilizada (ASHRAE, 2019); su postura ha llevado a realizar estudios sobre sus beneficios en el patrimonio edificado, demostrando que su incorporación es la manera más viable para la conservación y adaptación de inmuebles históricos a la contemporaneidad (Martínez-Molina *et al.*, 2016). En consecuencia, el patrimonio cultural se consideró como uno de los principales actores para fomentar y lograr las metas establecidas para el año 2030, sobre todo las relacionadas con una ciudad sostenible, resiliente y energéticamente eficiente. Sin embargo, continúan existiendo múltiples factores que

ralentizan la inclusión de la eficiencia energética en dichas construcciones, tal como lo mencionan Del Burgo *et al.* (2018) y Barragán-Escandón *et al.* (2019), por lo que resulta imperativo la identificación de dichas barreras para el desarrollo de respuestas en entornos históricos rezagados en materia de gestión energética.

Un ejemplo es el Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca, considerado Patrimonio Cultural de la Humanidad desde 1987, y donde existen situaciones socioeconómicas y políticas que excluyen los análisis multidisciplinarios del enfoque (Figura 1), tales como el turismo insostenible o la gentrificación. En adición con la transformación tipológica de los inmuebles, se refleja una exigua gestión en el uso de la energía eléctrica utilizada en luminarias, equipos electrónicos y sistemas HVAC (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado, por sus siglas en inglés).

La presente investigación busca analizar los principales factores que obstaculizan la incorporación de la eficiencia energética en inmuebles del Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca. Para ello, en la parte introductoria abordamos los antecedentes y la metodología, la cual emplea una encuesta básica con escala de Likert; en la segunda parte presentamos la descripción de los cinco factores que inhiben la eficiencia energética en el entorno de estudio, a saber:

- Factores económicos relacionados con los altos costos de operación y el lento retorno de la inversión.
- Factores tecnológicos donde se aborda la falta de especialización en el área.
- Factores administrativos afines a la burocracia y reglamentación obsoleta.
- Factores sociales sobre el turismo, gentrificación, falta de interés o conocimiento.

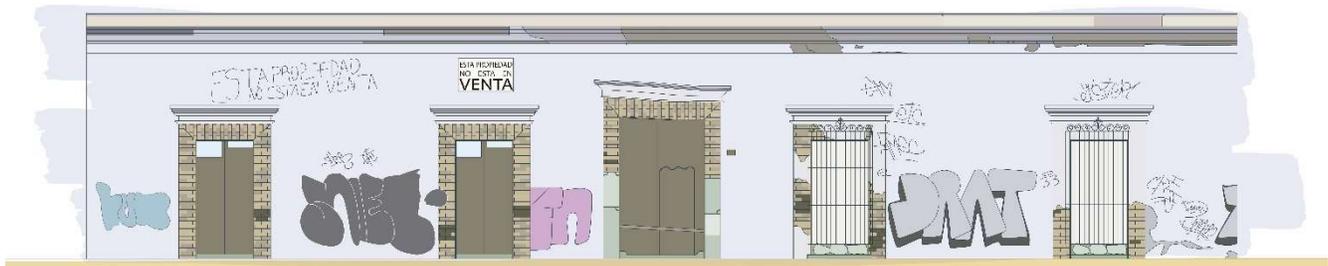


Figura 1. Abandono de inmuebles patrimoniales, una de las principales problemáticas en el entorno de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

- Factores patrimoniales relacionados con falta de compatibilidad con la morfología y carácter de los inmuebles.

Siendo una investigación descriptiva de carácter cualitativa, nos encontramos con un enfoque preexistente en un área exiguamente estudiada, donde se identificaron limitantes metodológicas relacionadas con el tamaño de la muestra, a los escasos estudios previos dirigidos específicamente al área de conservación y al acotado discernimiento de los participantes en la eficiencia energética en el patrimonio edificado, aspecto identificado en un acercamiento previo y por lo cual se generalizó el concepto en el presente trabajo.

Finalmente, se concluye con un alcance descriptivo del tema con las posturas de los profesionales del área y con la medición de fiabilidad del estudio, destacando el aporte disciplinar del mismo.

El patrimonio arquitectónico y la eficiencia energética

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés), por medio del ICOMOS, el patrimonio cultural material se define como una serie de monumentos, conjuntos o lugares con un valor universal excepcional visto desde diferentes perspectivas.

En la actualidad, el patrimonio cultural se volvió un actor que se involucra activamente en las necesidades de una sociedad contemporánea o como impulsor de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) (UNESCO, 2019), siendo recalcado en el objetivo siete, sobre la energía limpia; y en el once, sobre las ciudades sostenibles, así como por múltiples artículos de la Nueva Agenda Urbana.

Aún en la era globalizada en la que vivimos, la cultura nos conecta de formas inefables con nuestro pasado y futuro. A sabiendas de la importancia de la sostenibilidad del patrimonio (UNESCO, 2014) y de la historicidad de los mismos, se realizaron investigaciones que consideraron a la eficiencia energética como uno de los principales conceptos a implementar en la conservación del patrimonio.

Antecedentes de la investigación

Aún existen múltiples factores que condicionan la implementación de dichas estrategias, los cuales pueden variar de un entorno o de un proyecto a otro. Por ejemplo, para aumentar la inversión en tecnologías bajas en carbono, Polzin (2017) considera necesario superar barreras tecnológicas, institucionales, económicas-financieras y políticas, las cuales dependen de la viabilidad comercial y de la ausencia de demanda en una economía cimentada en los combustibles fósiles.

Múltiples trabajos dirigen la problemática a las barreras de las energías renovables en diversos contextos, como Eleftheriadis & Anagnostopoulou (2015), donde se calculó la puntuación media de cada factor con la ayuda de una escala de Likert, destacando la falta de interés en diferentes sectores, costos de construcción, entre otros.

Por su parte, Malik *et al.* (2019) realiza una revisión de la literatura, así como una aproximación estadística para comprender las políticas y barreras de las energías renovables en los países del Consejo de Cooperación del Golfo (CCG). A nivel urbano, de acuerdo a Barragán Escandón *et al.* (2019), existen inhibidores relacionados con los aspectos técnicos, económicos, ambientales y socio-políticos, los cuales se asemejan a las dimensiones que frenan la gestión integral de los entornos históricos.

En otras investigaciones realizadas en las universidades de España y Portugal, la eficiencia energética se aborda de manera general, como en el trabajo de Del Burgo *et al.* (2018), es decir, los factores están relacionados con aspectos económicos-financieros, tecnológicos, regulatorias-administrativas, de aceptación social y arquitectónicos.

A excepción del trabajo de Del Burgo *et al.* (2018), las investigaciones tenían un carácter empresarial o urbano y, aunque existen similitudes, no se abordan las problemáticas insertas en los entornos patrimoniales de México. Ante esto, el presente trabajo busca no solo describir los factores de inhibición, sino también ordenarlos por medio de una encuesta dirigida a los profesionales del área, similar al trabajo de Barragán Escandón *et al.* (2019).

Aunque existen planes de desarrollo enfocados en la gestión integral y sustentable de las ciudades patri-

moniales, estos no logran abordar eficientemente todas las problemáticas, lo que dificulta el cumplimiento de las metas propuestas para el 2030. El Plan de Desarrollo del Municipio de Oaxaca de Juárez (2019), aborda de manera exigua los puntos dirigidos a la sustentabilidad, así como a la conservación del patrimonio, reduciendo sus alcances en el ahorro eléctrico o el confort higrotérmico de inmuebles rehabilitados.

Esto nos lleva a la pregunta ¿Cuáles son las principales barreras que limitan la inclusión de estrategias de eficiencia energética en dicha ciudad patrimonial?

Objetivo de la investigación

Analizar los principales factores que inhiben la incorporación de la eficiencia energética en el patrimonio edificado en el Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca. Dichos factores fueron determinados a partir de una revisión bibliográfica, donde retomamos las barreras mencionadas en la investigación realizada por Del Burgo *et al.* (2018), debido a su abordaje de inmuebles históricos dentro de su análisis.

Metodología

Al ser una investigación cualitativa, se utilizó la revisión bibliográfica como punto de partida para establecer una encuesta básica a una muestra dirigida. En ella se busca reconocer la postura de incorporar estrategias de eficiencia energética en edificios patrimoniales en el Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca, así como cuantificar el nivel de influencia de los factores

de inhibición desde el punto de vista de los participantes por medio de la escala de Likert (Figura 2).

Debido a las escasas rehabilitaciones energéticas realizadas en el entorno, la encuesta generalizó el concepto de eficiencia energética para el análisis de resultados. Guest, Bunce y Jonhson (2006), consideran que una muestra relativamente homogénea de mínimamente doce personas, es suficiente para describir la percepción del grupo de interés (citado por Del Burgo *et al.*, 2018), siendo esta la principal limitante del estudio.

La encuesta fue dirigida a treinta profesionales con experiencia en el área de monumentos históricos, siendo el 90% de ellos arquitectos. La edad de los participantes fluctúa entre los veinte y los setenta años, donde el 60% cuenta con grado de licenciatura, 33% de maestría y el 7% doctorado. Se utilizó la escala de Likert (del uno al cinco) para establecer la influencia de los factores económicos, tecnológicos, administrativos, sociales y patrimoniales a partir del punto de vista de los involucrados, permitiendo clasificarlos en función del grado de atribución (Ospina Rave *et al.*, 2005).

A la par se realizaron los siguientes cuestionamientos con respuestas abiertas, politómicas y dicótomas, los cuales permitieron enriquecer la descripción de las barreras:

- ¿Conoces el término eficiencia energética?
- ¿Considera necesaria la incorporación de la eficiencia energética en los inmuebles patrimoniales?



Figura 2. Ruta crítica del trabajo de investigación. Fuente: Elaboración propia.

- ¿Considera que se incorpora la sustentabilidad en el trabajo de restauración, conservación, preservación o mantenimiento del patrimonio edificado en el Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca?
- ¿Qué medidas se pueden adoptar para incorporar estrategias de eficiencia energética en los inmuebles patrimoniales?
- ¿Ha trabajado o ha incorporado la eficiencia energética en sus proyectos de restauración, conservación, rescate, etc., del patrimonio edificado?
- ¿Ha cuantificado indicadores de eficiencia energética en dichos proyectos?

Al tener variables cualitativas con escala de medida ordinal, la escala de Likert nos permitió realizar operaciones de ordenamiento, por lo tanto, se utilizó el alfa de Cronbach para medir la fiabilidad de la escala de medida utilizada en la clasificación de factores.

$$\alpha = \frac{K}{K-1} \left(1 - \frac{\sum Si^2}{St^2} \right)$$

Donde K es el número de ítems, $\sum Si^2$ es la sumatoria de la varianza de los ítems y St^2 es la suma de los ítems. Mientras el valor sea entre 0.9 y 1.0 se considera excelente, sin embargo, se estima que existe redundancia; entre 0.8 y 0.9 es bueno; entre 0.7 y 0.8 es aceptable; entre 0.6 y 0.7 es débil; y menor a dichos valores se considera pobre o poco confiable (Oviedo & Campo-Arias, 2005).

Base filosófica de la rehabilitación energética

Con la finalidad de comprender la existencia de barreras o impulsores dentro de los trabajos de conservación patrimonial, es necesario analizar las bases filosóficas que existen detrás de las intervenciones o rehabilitaciones arquitectónicas de cualquier tipo, incluyendo las energéticas.

Existe una dicotomía entre los profesionales de la construcción con respecto a los valores a conservar o modificar. En algunos casos, como el arquitecto español Manuel Solà-Morales, se busca respetar la historicidad del inmueble y se plantea la posibilidad de in-

corporar tecnologías de vanguardia, realizando las mejores características de ambas épocas en un proyecto integral. Mientras que otros buscan con severidad la conservación y pureza de los valores patrimoniales.

Al respecto, se plantea que el interaccionismo simbólico es la capacidad de pensamiento, basado en símbolos y significados que desarrollan los seres humanos para con la sociedad y consigo mismos (Ritzer, 1993). En conjunto con el pragmatismo, se sustenta la idea de que los usuarios tienen la facultad de recrear y modificar un espacio, a partir de considerarlo útil.

Con el cambio de mentalidad suscitado en el siglo XX, se modificaron valores asignados a múltiples conceptos, tales como cultura, medio ambiente o funcionalidad de los inmuebles históricos, lo que generó que se llevaran a cabo rehabilitaciones arquitectónicas que adaptaron al patrimonio edificado a las necesidades contemporáneas de las sociedades, como lo es el turismo, procesos administrativos, urbanización, tecnológicos, entre otros. Sin embargo, aunque la eficiencia energética ha corroborado su utilidad en la conservación del patrimonio edificado, no es un concepto introducido en la cotidianidad de México y mucho menos en sus rehabilitaciones arquitectónicas.

Por ende, aún si consideramos su importancia, el valor de la eficiencia energética no ha superado el valor superpuesto por la globalización en múltiples esferas de acción; siendo este el motivo de nuestro lento avance hacia los ODS y de la existencia de barreras que inhiben la gestión energética en diversos ámbitos.

Caso de estudio y sus barreras

El espacio del centro histórico continúa siendo uno de los puntos principales de una ciudad. En él se preservan las costumbres y tradiciones, son el reflejo de la memoria social y concentran varias actividades político-administrativas. Su connotación histórica y de centralidad, los convierten en el punto neural de un entorno (Melé, 2006), y al estar insertos en focos urbanos, se ven envueltos en problemáticas que condicionan y perjudican dichos enfoques.

El Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca de Juárez es un entorno rico en patrimonio y cultura, tanto material como inmaterial; sin embargo, desde mediados del siglo XX ha sufrido múltiples cambios, entre ellos, las declaraciones como Zona de Monumentos

Históricos (1976) y como Patrimonio Cultural de la Humanidad (1987) por parte de la UNESCO. Al conjuntarse con su rápida urbanización y el proceso de globalización experimentado a nivel nacional, la connotación histórica quedó influenciada por intereses ajenos a la misma y se han eludido los métodos contemporáneos para su preservación.

De manera introductoria, la encuesta arrojó que más del 83% de los participantes consideraba necesaria la incorporación de la eficiencia energética en el patrimonio edificado, y solo el 39.1% del grupo muestra precisaba que dicho concepto era aplicado en nuestro caso de estudio, lo que comprueba la existencia de barreras inhibitorias relacionadas con la rehabilitación energética.

La rehabilitación energética en inmuebles históricos conlleva grandes desafíos para las sociedades; aunque todos los factores están ligados entre sí, la influencia de cada uno de ellos dependerá del contexto establecido.

Factores económicos

En una economía basada en combustibles fósiles, existe una alta inversión inicial para incluir las tecnologías de gestión, así como un lento retorno de dicha inversión, resultando en un impacto negativo e impráctico en los análisis costo-beneficio (Del Burgo *et al.*, 2018), lo que convierte al factor económico en una de las principales barreras que inhiben la integración de las estrategias de eficiencia energética.

Un ejemplo lo encontramos en el artículo de Doukas & Bruce (2017), donde, dependiendo de la estrategia a implementar, el retorno de la inversión variaba entre los cuatro y hasta los cuarenta años. Mientras que Del Burgo *et al.* (2018) menciona un tiempo estimado entre treinta y cuarenta años, siendo inviable para los profesionales y propietarios, sobre todo si consideramos los ya altos costes de restauración implicados en contextos terciaristas.

El petróleo fue una de las bases que propició la globalización y el modelo capitalista que rige nuestra nación, por lo que su relevancia impide cambiar el paradigma de una sociedad cimentada en dichos aspectos.

En el caso del Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca, al tener al turismo como fuente principal de ingresos, cuenta con una economía fluctuante afectada

por condiciones ajenas al contexto, tales como inversiones extranjeras o privadas, desastres naturales o aspectos epidemiológicos. Además, carece de revisiones puntuales sobre cómo abordar la transición a la sostenibilidad, tal y como se refleja en su Plan de Desarrollo Urbano (2019).

Factores tecnológicos

Uno de los principales factores relacionados con la economía y sus políticas, es el atraso tecnológico. Esto se debe a la moderada inversión relacionada con las tecnologías de eficiencia energética, lo que consecuentemente aumenta sus precios.

Esto es reiterado en múltiples análisis (Polzin, 2017), donde afirman que las barreras relacionadas con la política, economía y la situación del mercado nacional, influyen en la viabilidad comercial o la demanda de las tecnologías de eficiencia energética. En México, su cuasi urbanización hecha a nivel nacional en el siglo XX, ocasionó que se volviera dependiente de la mano de obra y de la industria petrolera extranjera.

Este hecho se repite en la actualidad con las energías renovables, aunque se cuenta con una limitada infraestructura, esta continúa siendo de inversión extranjera, evitando la autosuficiencia nacional. Un ejemplo es el Parque Eólico La Ventosa, ubicado en el Istmo de Tehuantepec y construido por la empresa española Iberdrola Renovables.

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM's) en eficiencia energética (ENER) representan un avance en materia de sustentabilidad, sobre todo las relacionadas con la regulación de electrodomésticos, motores o luminarias, como la NOM-020-ENER-2011 y la NOM-008-ENER-2001, donde se aborda la envolvente en edificios residenciales y no residenciales, o la NOM-007-ENER-2014 sobre los sistemas de alumbrado en edificios no habitacionales.

Debido al cambio de tipologías y al incremento de rehabilitaciones arquitectónicas de índole comercial, es imperativo reconocer la normativa aplicable. Empero, al no contemplar al patrimonio en la normativa, se carece de un análisis integral que contemple la envolvente y sus procesos constructivos, desconociendo el ahorro energético que un inmueble puede tener en su totalidad.

De acuerdo a la Secretaría de Energía (SENER) se tiene solo la capacidad para generar el 31% de la energía a partir de fuentes renovables (Forbes, 2020), mientras que el grupo técnico del ODS7 estimaba un 10% en 2017 (Grupo asesor técnico del ODS7, 2021), denotando su falta de independencia energética y automatización tecnológica en múltiples esferas de acción.

Otro de los enfoques a considerar dentro de este factor es la falta de especialización en el área. De acuerdo a la ASHRAE (2019), los proyectos de rehabilitación energética deben contar con un equipo especializado que permita incorporar la eficiencia sin comprometer la historicidad del inmueble. Sin embargo, el Informe Nacional de Monitoreo de la Eficiencia Energética en México (2018), establece que existen exiguas capacitaciones generales a nivel nacional, que en conjunto con los altos costos y el financiamiento de alto riesgo (Polzin, 2017), se restringe la especialización enfocada únicamente en la rehabilitación energética de los inmuebles patrimoniales.

En el caso del Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca, debido a la connotación vernácula que poseen los edificios, al ser construidos antes de los sistemas de enfriamiento artificial, se descarta la inclusión o difusión de dichas tecnologías. Esto limita la sistematización energética y aumenta el precio de diversos tipos de materiales.

Factores administrativos

La esfera administrativa es considerada como una de las principales barreras que inhiben la gestión energética en el patrimonio edificado. Esto se debe a su relación con las políticas públicas, reglamentación y burocracia, los cuales varían de acuerdo al contexto establecido y al interés de la sociedad en su implementación (Best & Burke, 2018). Un ejemplo de lo anterior, son los países considerados pioneros en la rehabilitación energética, como España, Italia, Reino Unido, entre otros.

Además, encontramos propuestas con alcance internacional, como las certificaciones LEED o la EDGE; o las mismas declaraciones del ICOMOS. Sin embargo, aún existen gobiernos donde no se actualizan sus normativas y sus planes de desarrollo no son directos ni cuantificables.

En México, la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas (1972), fue considerada innovadora para su época, pero sus exiguas actualizaciones han evitado la inclusión de recomendaciones posteriores a su publicación, como la carta de Washington (1987) o el Manual Metodológico de la UNESCO (2014). Igualmente, las normativas relacionadas con la edificación sustentable no enfatizan su aplicación en el patrimonio edificado, como la NOM-008-ENER-2001 o la NMX-AA-164-SCFI-2013, siendo aplicadas a partir de una petición a las unidades de verificación de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, evitando el cumplimiento obligatorio que conlleva una NOM.

En consecuencia, se muestra que a nivel nacional las políticas públicas y administrativas no están ligadas a los esporádicos avances que tienen las ciudades, incluidas las patrimoniales, en materia de sostenibilidad (Sobrinó *et al.*, 2018). Muestra de ello es lo que ocurre en el Plan Parcial de Conservación del Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca de Juárez (2003), donde la eficiencia energética no es considerada un requisito obligatorio en las intervenciones arquitectónicas, siendo reflejado en su Plan de Desarrollo Municipal (2019).

Factores sociales

La ciudad es caracterizada y definida por una realidad social, la cual se ve influenciada por el desarrollo descontrolado de la urbanización (Arias, 2014). Al estar relacionados directamente con las condiciones que conlleva ser una ciudad patrimonial, los factores sociales son de gran relevancia para comprender las barreras que frenan los ODS de las mismas en los centros históricos, como lo muestra nuestro caso de estudio.

Con la llegada de la globalización el patrimonio edificado fue explotado para comercializar su cultura mediante la compra-venta de productos en serie; esta situación se conjuntó con problemáticas relacionadas al turismo insostenible, la gentrificación, la marginación, entre otros. Dicho proceso, también conocido como urbidio, inhibe el derecho a la ciudad y promueve la destrucción de la memoria e identidad colectiva (Arias, 2014).

Las ciudades patrimoniales están en constante cambio, ya que “tienen la tendencia a convertirse en un aparador para los extranjeros y que los habitantes

se vuelvan extraños en la misma” (Larrañaga Méndez, 2010). Al estar relacionado con las débiles políticas conservacionistas y la falta de interés de una sociedad capitalista, los entornos históricos son el claro ejemplo del pensamiento pragmático y de la infravaloración cultural basada en la postura del interaccionismo simbólico.

Aunque una gestión adecuada del turismo puede convertirse en una de las principales fuentes de ingreso de un entorno urbano, para un país en desarrollo como México, es complicado anteponer la cultura a los beneficios económicos que conlleva su fetichismo mercantil.

Al considerar el patrimonio como facilitador económico del entorno, es complejo admitir la cabida inmediata de los sistemas de gestión energética en las necesidades sociales del entorno, ya que, si el valor cultural, intrínseco en el área de la conservación de inmuebles, queda en segundo plano, se condiciona la aplicación y difusión de trabajos multidisciplinarios que involucren tecnologías de eficiencia energética.

Lamentablemente, el Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca no dista de esta realidad. Desde mediados del siglo XX se promociona al entorno como la cuna de la riqueza cultural del estado, provocando una dependencia económica-social que influyó en la imagen física del patrimonio arquitectónico (Lira Vásquez, 2014), convirtiéndose los factores sociales en uno de los principales inhibidores de la creación de ciudades sustentables y resilientes (Organización de las Naciones Unidas, 2017).

Factores patrimoniales o arquitectónicos

Para finalizar, múltiples autores concuerdan que los factores arquitectónicos son una de las principales barreras que inhiben la inclusión de tecnologías de eficiencia energética, sobre todo las relacionadas con la morfología del inmueble histórico, como las energías renovables.

Existen metodologías que las han mimetizado en diferentes casos de estudio, respetando la historicidad y abogando por el principio de reversibilidad. Pero no todos los entornos cuentan con dicha infraestructura, dificultando la adaptación de las tecnologías en el patrimonio edificado.

En el Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca, dicho factor no ha influido en demasía. Gracias a su clima templado, la construcción de los inmuebles se basó en los procedimientos constructivos de la arquitectura vernácula y los preexistentes de la región de Andalucía, España. De acuerdo a Bustamante (1991), las viviendas se caracterizan por tener masividad en los elementos constructivos, tales como los muros de adobe y ladrillo, o las techumbres planas con terrados. Además, cuentan con patios interiores rodeados de corredores que forman microclimas, proporcionando confort térmico para los antiguos habitantes. Sin embargo, si recordamos la sección de la base filosófica, las modificaciones realizadas a los inmuebles históricos fueron consideradas útiles, pero no siempre adecuadas en materia de conservación arquitectónica o de gestión energética.

Su adaptación al entorno urbano y la alteración de su uso original, ocasionó que fueran considerados edificios de bajo rendimiento (Cabeza *et al.*, 2018). A pesar de las adaptaciones, se piensa que la connotación térmica permanece hasta la fecha, creyendo innecesario la incorporación de técnicas de eficiencia energética. En nuestro caso de estudio, la contemporaneidad trajo consigo cambios importantes en la distribución espacial y un aumento en los sistemas de refrigeración industrializados.

Lo anterior, denota la falta de especialización en el área y muestra el paradigma de una sociedad que limita la cuantificación de los indicadores energéticos y la preservación patrimonial.

Resultados y discusiones

Evaluación de los factores

Nuestro grupo muestral consta de profesionales que han realizado trabajos de intervención, restauración, rescate o conservación del patrimonio edificado en nuestro caso de estudio. Gracias a reuniones personales, donde se realizó una encuesta y se compartieron posturas sobre el tema, se determinó que el 87% de los participantes conoce el término de eficiencia energética, empero, solo el 40% pudo mencionar documentos que promovieron en el patrimonio edificado.

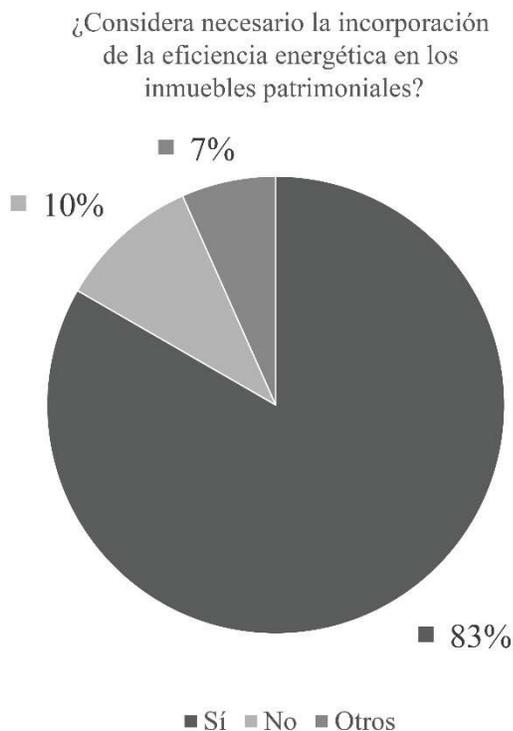


Figura 3. Postura de los encuestados sobre la gestión energética en inmuebles patrimoniales.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de la pregunta: ¿Considera necesaria la incorporación de la eficiencia energética en los inmuebles patrimoniales? El 83% de nuestros participantes consideró necesaria la incorporación de medidas de eficiencia energética en el patrimonio edificado, mientras que 7% no aclaró si considerarlo necesario o argumentó la necesidad de incorporar la eficiencia en inmuebles diseñados con dicha connotación (Figura 3).

Sin embargo, al preguntarles: ¿Considera que se incorpora la sustentabilidad en el trabajo de restauración, conservación, preservación o mantenimiento del patrimonio edificado en el Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca? El 47% concluyó que el término no se incorpora en nuestro caso de estudio, a diferencia del 36% que difirió de lo anterior y de un 17% que consideró que la sustentabilidad cuenta con diferentes enfoques como para existir una dicotomía en la respuesta (Figura 4).

En concordancia con la metodología mencionada, se realizó una escala de Likert para evaluar las barreras que inhiben la incorporación de las estrategias de eficiencia energética, así como su nivel de influencia en el Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca. En la

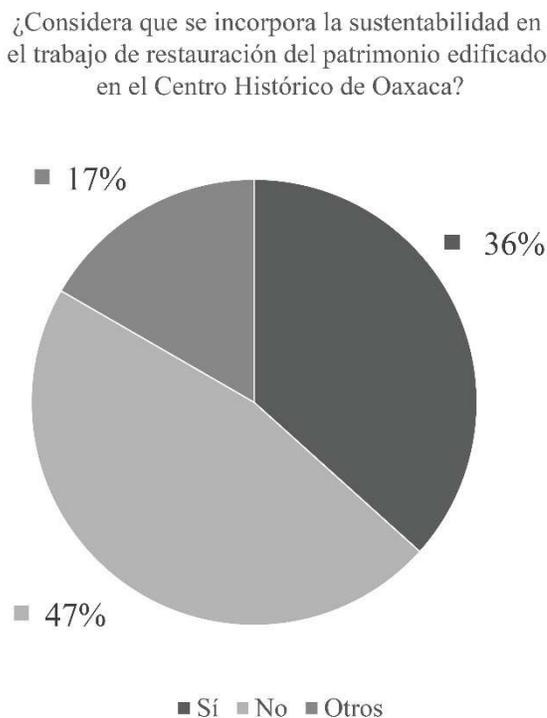


Figura 4. Postura de los encuestados sobre la incorporación de la sustentabilidad en los trabajos de restauración del Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5 se muestra la media y el lugar obtenido para cada barrera, estimándose un alfa de Cronbach de 0.763, estando dentro de los límites aceptables (Oviedo & Campo-Arias, 2005).

Dentro del análisis se identificó que todos los factores se encuentran interrelacionados, ya que su existencia permite el desarrollo de otras barreras que frenan la gestión energética en el entorno de estudio.

El grupo muestral consideró que los factores administrativos y económicos eran las barreras principales con una media de 3.67 y 3.50, respectivamente. Al respecto, la mayoría de los participantes congeniaron en que es necesario una actualización del Plan Parcial de Conservación del Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca de Juárez y de la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas, en materia de sustentabilidad. Además, enfatizaron la falta de apoyo económico y el desinterés por parte de las instituciones pertinentes en el tema. En tercer lugar, el aspecto tecnológico, con una media de 3.30, representa la falta de capacitación y difusión sobre los beneficios de la eficiencia energética.

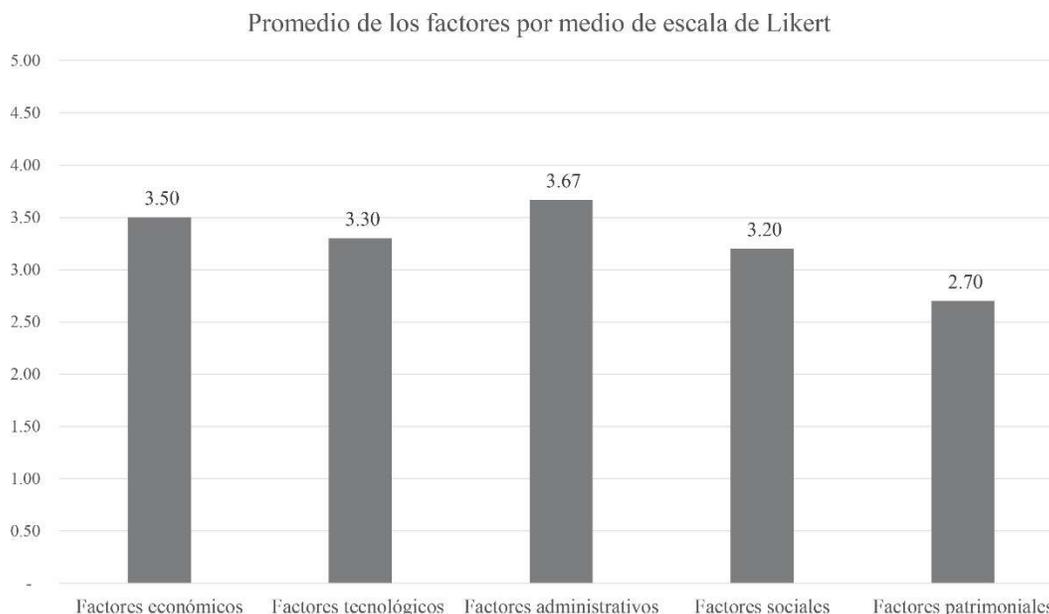


Figura 5. Media de los factores que frenan la incorporación de estrategias de eficiencia energética en el Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca. Fuente: Elaboración propia.

Los factores sociales y patrimoniales, contaron con una media de 3.20 y 2.70, respectivamente. Esto enfatiza lo dicho en el apartado de factores patrimoniales: la tipología de la vivienda no inhibe a gran escala la incorporación de estrategias de gestión energética; de acuerdo a los participantes, esto se ve influenciado por la normativa obsoleta y por los procesos administrativos, impidiendo la propuesta y el análisis de trabajos integrales.

Consecuencias y posibles soluciones

Si bien, la mayoría de los participantes ven factible la aplicación de estrategias de gestión energética en el entorno establecido, solo el 28% de los encuestados declaró haberlas incluido en algún proyecto de intervención arquitectónica, de los cuales solo el 56%, aproximadamente cinco participantes, aceptaron haber cuantificado algún indicador de eficiencia energética para conocer los alcances del mismo. Mientras que el 6% expresó que no había podido incorporarla integralmente o se inclinaba a considerar la restauración como una actividad con altos índices de contaminación (Figuras 6 y 7).

Una de las principales consecuencias de la falta de estrategias de eficiencia energética, es la contaminación ambiental y el cambio climático, lo que potencia los daños ocasionados por los agentes de deterioro en

el patrimonio edificado, sobre todo en aquellos con un precario estado de conservación o en condición de intemperismo. Además, promueve la falta de confort higrotérmico y un aumento en el consumo energético de los mismos.

¿Ha incorporado la eficiencia energética en sus proyectos de restauración, conservación, rescate, etc., del patrimonio edificado?

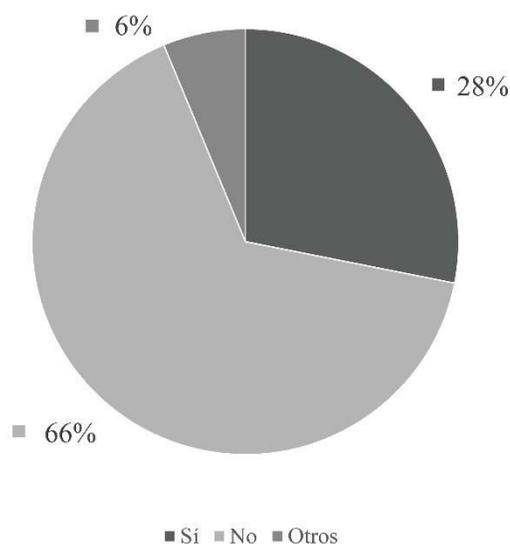


Figura 6. Porcentaje de participantes que han incorporado estrategias de gestión energética en sus proyectos. Fuente: Elaboración propia.

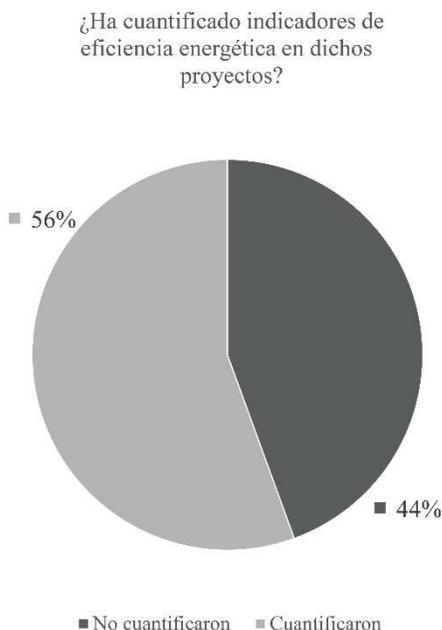


Figura 7. Porcentaje de participantes que han cuantificado indicadores e incorporado estrategias de eficiencia energética. Fuente: Elaboración propia.

Ante esto, se preguntó a los participantes: ¿Qué medidas se pueden adoptar para incorporar estrategias de eficiencia energética en los inmuebles patrimoniales? El 37% de los participantes consideró que la capacitación de los profesionales que inciden en el patrimonio es una de las medidas para incorporar estrategias de eficiencia energética. Por otro lado, el 30% enfatizó en la difusión de los beneficios que conlleva la aplicación de enfoque, lo cual está relacionado con los escasos análisis realizados por parte de los participantes.

En menor medida, el 17% abogó por una actualización de las normativas pertinentes, el 13% se inclinó por apoyo de las dependencias, y solo el 3% mencionó que depende del rubro a gestionar (Figura 8).

Conclusiones

Desde la Cumbre de Río, en 1992, alcanzar los principios del desarrollo sostenible ha sido la meta década tras década, pero en la actualidad se ha aplazado la resolución de las problemáticas hasta el 2050, provocando un aumento en el uso de la energía y los contaminantes antropogénicos.

Los centros históricos, al representar la memoria colectiva de una centralidad urbana, son fundamentales para las sociedades contemporáneas, por lo que es

indispensable que respondan a las necesidades climáticas del entorno. Sin embargo, dicha connotación engloba problemáticas que frenan su papel como facilitador del desarrollo sostenible en las ciudades, como las barreras que inhiben la eficiencia energética en el patrimonio edificado, las cuales no han sido abordadas dentro de los planes de desarrollo.

El Centro Histórico de la Ciudad de Oaxaca no es ajeno a esta realidad, y en la presente investigación de carácter cualitativo, se analizaron los factores de inhibición económicos, tecnológicos, administrativos, sociales y patrimoniales, mediante una encuesta básica dirigida a los profesionales del área.

Siendo un enfoque preexistente, se realizó un análisis descriptivo de la actual problemática del entorno de estudio, donde a partir de un modelo capitalista, se antepuso el valor mercantil a la esfera cultural y ambiental, se disminuyó la difusión de tecnologías de eficiencia energética y se abogó por una normativa ambigua que favorece las actividades comerciales a nivel global. Esto obstaculiza trabajos interdisciplinarios en distintos ámbitos, como la conservación integral del patrimonio edificado y la incorporación de tecnologías para su rehabilitación.

Considerando las limitantes metodológicas de la investigación y por medio de la escala de Likert, se ordenaron los factores de acuerdo a la percepción del

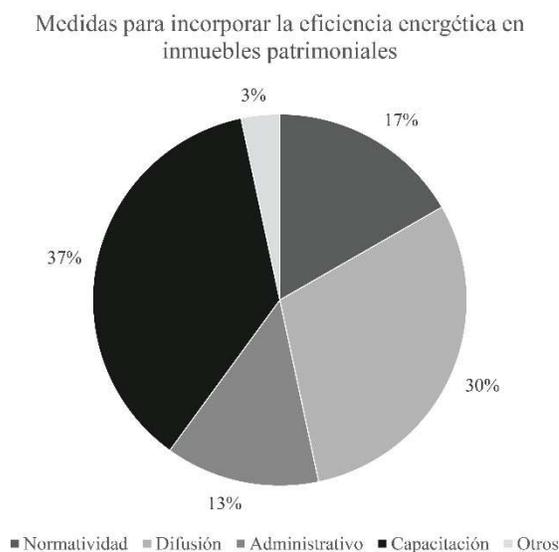


Figura 8. Porcentaje de participantes que han incorporado medidas de eficiencia energética en inmuebles patrimoniales. Fuente: Elaboración propia.

grupo muestral, donde los factores económicos y administrativos se consideraron las principales barreras para la difusión de dicho enfoque en la ciudad patrimonial, seguidos por los tecnológicos, sociales y patrimoniales, respectivamente; lo cual contó con una medición de fiabilidad aceptable en los valores del alfa de Cronbach.

Desde el punto de vista teórico, se analizaron los factores de inhibición de la eficiencia energética en nuestro caso de estudio, así como su relación entre ellos, donde se determinaron los más importantes a partir de una encuesta. Se observó el punto de vista de los profesionales en el área de conservación y su abordaje del concepto en obras propias, además se enfatizó la importancia de la sustentabilidad del patrimonio y las consecuencias de su evasión.

Entre de ellas podemos destacar un aumento en los daños ocasionados por los agentes de deterioro, sobre todo los relacionados con el cambio climático y los contaminantes atmosféricos, que en conjunción con una mala praxis en la restauración, puede comprometer la historicidad del inmueble ya que “todo enfoque que mire solo al pasado correrá el riesgo de convertir el patrimonio en una entidad rígida y congelada” (UNESCO, 2014).

Desde el punto de vista práctico, esta investigación permite plantear respuesta para incorporar la gestión energética; los participantes concordaron que la capacitación y difusión de los beneficios permiten abogar por la misma, esto con base en su experiencia profesional en la intervención del patrimonio, lo que representa una oportunidad para abordar los entornos históricos no solo desde las perspectivas económica o social, sino también ambiental, tal y como lo establece los ODS.

En este sentido, se realiza una aportación disciplinar en un entorno donde la eficiencia energética ha sido irrisoriamente estudiada y no se contempla dentro de sus planes de conservación. Se proporciona un marco de referencia para investigaciones posteriores en otros entornos históricos del país, donde se pueden determinar con un mayor grupo muestral, diferentes tipos de soluciones y alcances encaminados a los diferentes tipos de gestión energética aplicables, como la lumínica o la eléctrica.

Finalmente, la búsqueda de la sustentabilidad del patrimonio debe ser pretendida por todas las socieda-

des, ya que la inclusión de nuevas tecnologías y el reconocimiento de sus barreras, nos permite gestionar las deficiencias de una sociedad que apunta a la resiliencia, a la sostenibilidad y a la conservación de su patrimonio edificado.

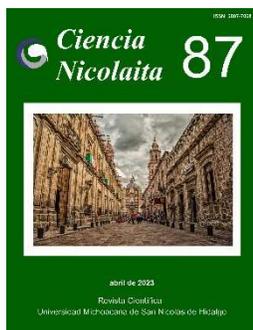
Agradecimientos

Se agradece a todos los participantes de la encuesta y a la Coordinación de la Maestría en Ciencias de la Construcción, con PNPC-CONACYT, de la Facultad de Arquitectura “5 de Mayo” perteneciente a la Universidad Autónoma “Benito Juárez” de Oaxaca.

Referencias

- Arias, M., 2014, Patrimonio, ciudad y cultura: derechos urbanos en peligro: *Canto Rodado: Revista Especializada en Patrimonio*, (9), 27-50.
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5014903.pdf>
- ASHRAE, 2019, ASHRAE Guideline 34-2019- Energy Guidelines for Historical Buildings: *Atlanta, ASHRAE*.
- Barragán-Escandón, E., Zalamea-León, E., Terrados-Cepeda, J. and Parra-González, A., 2019, Las energías renovables a escala urbana. Aspectos determinantes y selección tecnológica: *Bitácora Urbano-Territorial*, 29(02), 39-48. doi:10.15446/bitacora.v29n2.65720
- Best, R. and Burke, P., 2018, Adoption of solar and wind energy: The roles of carbon pricing and aggregate policy support: *Energy Policy*, 118, 404-417. doi:10.1016/j.enpol.2018.03.050
- Bustamante Vasconcelos, A., 1991, La Casa Oaxaqueña, Oaxaca y su Defensa: *Cuadernos de Arquitectura Virreinal*, 10, 17-19.
<https://juanbartigas.files.wordpress.com/2012/05/3-la-casa-oaxaquec3b1aoaxaca-y-su-defensa.pdf>
- Cabeza, L., de Gracia, A. and Pisello, A., 2018, Integration of renewable technologies in historical and heritage buildings: A review: *Energy and Buildings*, 177, 96-111. doi:10.1016/j.enbuild.2018.07.058
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2018, Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de México: *México, Naciones Unidas*.
- Del Burgo, J., Monteiro Ramos, N., Poças Martins, J. and Navarro Astor, E., 2018, Factors That Affect the Implementation of Renewable Energy Technologies and Energy Efficiency Measures in Existing University Buildings: *Madrid, XXII Congreso Internacional de*

- Dirección e Ingeniería de Proyectos*, 1-13.
http://dSPACE.aepro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/1653/AT05-018_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Doukas, D. and Bruce, T., 2017, Energy Audit and Renewable Integration for Historic Buildings: The Case of Craiglockhart Primary School: *Procedia environmental sciences*, 38, 77-85.
doi:10.1016/j.proenv.2017.03.081
- Eleftheriadis, I. and Anagnostopoulou, E., 2015, Identifying barriers in the diffusion of renewable energy sources: *Energy Policy*, 80, 153-164.
doi:10.1016/j.enpol.2015.01.039
- Forbes, 2020, México genera del total 31% de energía renovable: Sener: *Forbes*.
<https://www.forbes.com.mx/economia-mexico-energia-renovable-sener/>
- Grupo Asesor Técnico del ODS7, 2021, México: *Tracking SDG 7 The Energy Progress Report*.
<https://trackingsdg7.esmap.org/country/mexico>
- Guest, G., Bunce, A. and Johnson, L., 2006, How many interviews are enough? An experiment with data saturation and variability: *Field methods*, 18, 59-82.
doi:10.1177/1525822X05279903
- Jones, A., 2015, Perceived barriers and policy solutions in clean energy infrastructure investment: *Journal of Cleaner Production*, 104, 297-304.
doi:10.1016/j.jclepro.2015.05.072
- Larrañaga Méndez, A., 2010, Transformación de los espacios públicos de la ciudad patrimonial: el zócalo de la ciudad de Oaxaca: *6to. Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual*, Mexicali, 5, 6 y 7 octubre de 2010, 1-15. doi:10.5821/ctv.7663
- Lira Vásquez, C., 2014, El discurso patrimonial: Una coartada para frenar el desarrollo de la ciudad de Oaxaca: *Urbano*, 17(29), 72-87.
<https://www.redalyc.org/pdf/198/19836173010.pdf>
- Malik, K., Rahman, S., Khondaker, A., Abubakar, I., Aina, Y. and Hasan, M., 2019, Renewable energy utilization to promote sustainability in GCC countries: policies, drivers, and barriers: *Environmental Science and Pollution Research*, 26(20), 20798-20814.
doi:10.1007/s11356-019-05337-1
- Martínez-Molina, A., Tort-Ausina, I., Cho, S. and Vivancos, J.L., 2016, Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 70-85.
doi:10.1016/j.rser.2016.03.018
- Melé, P., 2006, La producción del patrimonio urbano: *México, Ciesas*.
- Organización de las Naciones Unidas, 2016, Energía asequible y no contaminante: por qué es importante: 7 *Energía asequible y no contaminante*.
https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/7_Spanish_Why_it_Matters.pdf
- Organización de las Naciones Unidas, 2017, Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles: *Objetivos de Desarrollo Sostenible*.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- Ospina Rave, B., Sandoval, J., Aristizábal Botero, C. and Ramírez Gómez, M., 2005, La escala de Likert en la valoración de los conocimientos y las actitudes de los profesionales de enfermería en el cuidado de la salud. Antioquia, 2003: *Investigación y Educación en Enfermería*, 14(1), 14-29.
- Oviedo, H. and Campo-Arias, A., 2005, Aproximación al uso del coeficiente alfa de Cronbach: *Revista Colombiana de Psiquiatría*, 34(4), 572-580.
- Polzin, F., 2017, Mobilizing private finance for low-carbon innovation—A systematic review of barriers and solutions: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 525-535. doi:10.1016/j.rser.2017.04.007
- Ritzer, G., 1993, Teoría Sociológica Contemporánea: *Madrid, España, McGRAW-HILL*.
- Sobrino, J., Garrocho, C., Graizbord, B., Brambila, C. and Guillermo Aguilar, A., 2018, Ciudades sostenibles en México: una propuesta conceptual y operativa: *México, Consejo Nacional de Población*.
<https://www.gob.mx/conapo/documentos/ciudades-sostenibles-en-mexico-una-propuesta-conceptual-y-operativa>
- UNESCO, 2014, Indicadores UNESCO de Cultura para el Desarrollo: Manual Metodológico: *Francia, Organización de las Naciones Unidas para la Educación*.
https://es.unesco.org/creativity/sites/creativity/files/iucd_manual_metodologico_1.pdf
- UNESCO, 2019, Cultura para el Desarrollo Sostenible: *UNESCO*. <https://es.unesco.org/themes/cultura-desarrollo-sostenible>



Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Desarrollo de un panel con caucho reciclado para mejorar la absorción acústica

Development of a panel with recycled rubber to improve acoustic absorption)

María de Jesús Olvera-Martínez,^{*} Teresa López-Lara, Juan Bosco Hernández-Zaragoza y Jaime Moisés Horta-Rangel

Para citar este artículo: Olvera-Martínez María de Jesús, López-Lara Teresa, Hernández-Zaragoza Juan Bosco y Horta-Rangel Jaime Moisés, 2023. Desarrollo de un panel con caucho reciclado para mejorar la absorción acústica. Ciencia Nicolaita no. 87, 43-60. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.631>



Historial del artículo:

Recibido: 21 de abril de 2022
Aceptado: 8 de octubre de 2022
Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: arq.mj.olvera@gmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Desarrollo de un panel con caucho reciclado para mejorar la absorción acústica

Development of a panel with recycled rubber to improve acoustic absorption

María de Jesús Olvera-Martínez,* Teresa López-Lara, Juan Bosco Hernández-Zaragoza y Jaime Moisés Horta-Rangel

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, División de Investigación y Posgrado

Resumen

Tradicionalmente, en el área de la construcción existen elementos y materiales prefabricados, los cuales cuentan con propiedades acústicas específicas que se utilizan ya sea para aislar o acondicionar un espacio. Este artículo presenta el rendimiento acústico de dos paneles: el primero se fabricó a partir de polímeros provenientes del reciclado de llantas que son migas de caucho de tamaños de entre 1 a 3 mm, mezclados con un agente aglutinante, ambos componentes se dosificaron y mezclaron completamente en una relación de 70% caucho y 30% resina; para el diseño se utilizó cartón de embalaje como base, con 28 perforaciones equidistantes donde se vació y confinó la mezcla de caucho-resina que fue el núcleo o material fonoabsorbente. El segundo panel acústico se fabricó con cartón de embalaje de similares dimensiones con la diferencia que este utiliza en su núcleo un material fonoabsorbente tradicional que es la esponja o espuma acústica, ambos paneles se colocaron en una caja-acústica; posteriormente, se midieron sus propiedades acústicas mediante un sonómetro. Los resultados de las pruebas indicaron que las propiedades de absorción mejoraron un 17.5% con el panel de caucho en comparación al panel de esponja acústica, representando aproximadamente 10 decibeles (dB) más de absorción.

Palabras clave: panel, acústico, reciclaje, caucho, absorción



Abstract

Traditionally in the construction area there are prefabricated elements and materials which have specific acoustic properties, which are used either to isolate or condition a space. This article presents the acoustic performance of two panels, the first one was made from polymers coming from the recycling of tires that are rubber crumbs of sizes between 1 to 3 mm, mixed with a binding agent, both components were dosed and mixed completely in a ratio of 70% rubber and 30% resin; For the design, packaging cardboard was used as a base with 28 equidistant perforations, where the rubber-resin mixture that was the core or sound-absorbing material was emptied and confined. The second acoustic panel was made with packaging cardboard of similar dimensions with the difference that it uses a traditional sound-absorbing material at its core, which is sponge or acoustic foam. Both panels were placed in an acoustic box; subsequently, its acoustic properties were measured using a sound level meter. Test results indicated that the absorption properties were improved by 17.5% with the rubber panel compared to the acoustic foam panel, representing approximately 10 decibels (dB) more absorption.

Keywords: panel, acoustic, recycling, rubber, absorption

Introducción

En la actualidad, existen dos problemáticas que van en aumento tanto en las sociedades en desarrollo como en las desarrolladas, estas son la gestión de residuos y la contaminación acústica (Maderuelo-Sanz *et al.*, 2012). Estados Unidos y Japón fueron los primeros dos países en abordar los peligros ambientales de las llantas de desecho y en establecer leyes al respecto (Irevna, 2016). Varios estudios demuestran que los neumáticos al final de su vida útil, principalmente se convierten en desperdicio, creando así un problema de contaminación ambiental cada vez más grave. Sin embargo, la investigación y explotación comercial asociados con el reciclaje, han contribuido a impulsar la innovación y la actividad de investigación hasta el punto en que existe una gran variedad de rutas potenciales para el reciclaje, principalmente en países desarrollados (Forrest, 2014).

De acuerdo con datos del International Rubber Study Group (IRSG, 2014), en todo el mundo se produjeron alrededor de 26 millones de toneladas de caucho en 2015; en ese año se estimó que la demanda mundial de caucho aumentó un 0.7% respecto del año anterior y que entre 2016 y hasta llegar al 2024, se pronostica que este consumo aumentará un 3.1% anualmente en promedio (Peláez *et al.*, 2017).

Herrera-Sosa *et al.* (2015) señalan que aproximadamente un 60% de los neumáticos de desecho se recicla en países como Alemania, Francia y Austria; por

otra parte, en México, debido a que no se cuenta con sistemas de control, de los aproximadamente 30 millones de llantas desechadas cada año, el 91% se arrojan en ríos, carreteras y en espacios abiertos. En la Figura 1 se muestra la disposición de llantas de desecho en México.

En consecuencia, esto representa hoy en día uno de los principales problemas asociados a la gestión y tratamiento de desechos sólidos, debido al impacto negativo directo que pueden tener sobre la salud humana y el medio ambiente, ya que contaminan el suelo, el agua y el aire (Peláez *et al.*, 2017).

Otra problemática que se suma a las ya citadas, es que según informes de la US Environmental Protection Agency (EPA, 1997), se demostró que la quema de llantas libera sustancias de máxima peligrosidad para el ser humano, tales como monóxido de carbono, furanos, tolueno, benceno y óxido de plomo.

Un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011) muestra que la polución provocada por el problema del ruido y contaminación acústica ambiental, ocupa el segundo lugar, superado únicamente por la contaminación atmosférica.

Por otro lado, la OMS y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), son los principales organismos multilaterales que han generado mayor información y que han desarrollado sus propios métodos de evaluación sobre los efectos del

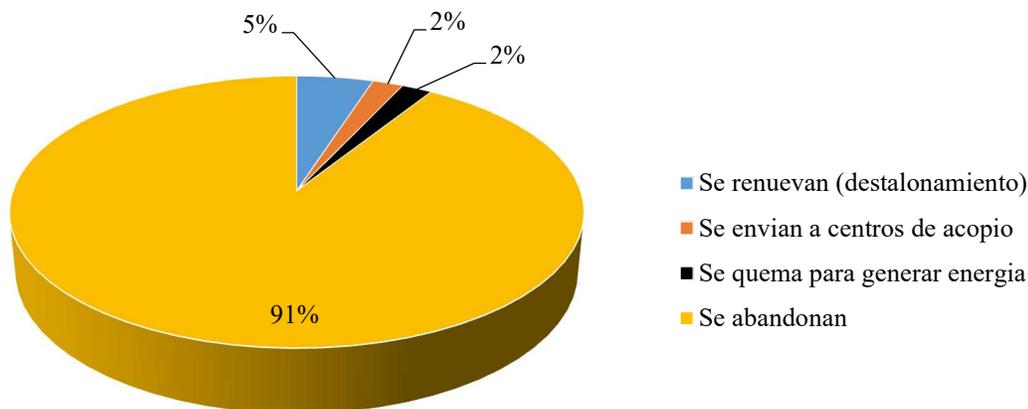


Figura 1. Disposición de llantas de desecho en México, adaptado del Instituto de Investigaciones en Materiales-Universidad Nacional Autónoma de México (Herrera-Sosa *et al.*, 2015).

ruido en la salud humana (Ecología y Desarrollo [ECODES], 2005).

En 1986, la OCDE sugirió que entre 55-60 dB el ruido causa molestia, entre 60-65 dB la molestia aumenta considerablemente, y más de 65 dB debe evitarse, pues ocasiona perturbaciones en el comportamiento y afectaciones psicológicas. Por su parte, la OMS sugiere un límite fijo de 55 dB, publicado en 1999 en “Guidelines for Community Noise” (Berglund *et al.*, 1999).

En consecuencia, el desarrollo de materiales a partir de ciertos tipos de residuos como materiales absorbentes acústicos o laminados anti-impacto, pueden ayudar en la solución de dos de los principales proble-

mas ambientales en la actualidad: el ruido y la contaminación ambiental (Maderuelo-Sanz, 2014). La Figura 2 muestra las principales fuentes de ruido generadas en las ciudades, un problema a resolver en la sociedad moderna.

En respuesta a estas dos problemáticas crecientes, en la construcción se han empleado diferentes soluciones constructivas para minimizar los niveles de ruido en la construcción; en algunos otros estudios, se incluyen en sus componentes materiales que, debido a sus propiedades acústicas, garantizan una disminución de los niveles de ruido, siendo uno de estos materiales el caucho reciclado (European Tyre & Rubber Manufacturers Association [ETRMA], 2010). Además, estudios revelan que el uso de las migas de caucho en

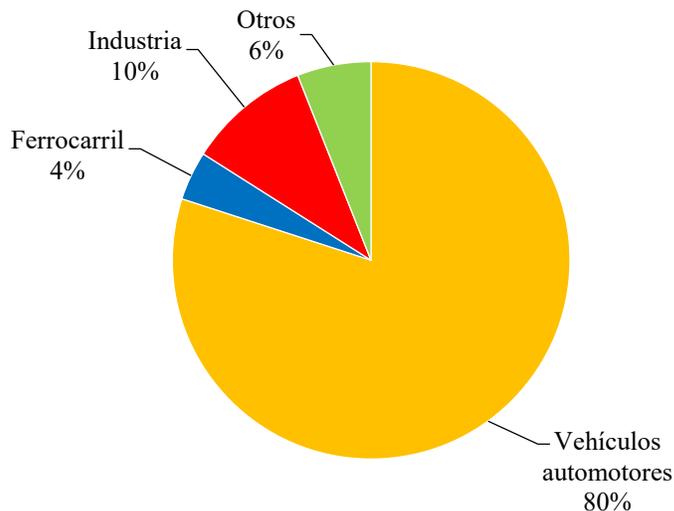


Figura 2. Fuentes generadoras de ruido (Alfie-Cohen & Salinas-Castillo, 2017; Ruza, 1988).

condiciones ambientales normales, a pesar de su composición, no induce ningún peligro en la salud humana ni en el medio ambiente (Instituto de Biomecánica de Valencia [IVB], s. f.; Servicios Deportivos Integrales Canarios [SERDICAN], 2016; Ibérica, 2016).

Algunos autores han concluido que se pueden usar materiales compuestos que contienen partículas de caucho reciclado para aplicaciones donde se busque absorción acústica (Pelaez-Arroyove *et al.*, 2017). Otros estudios demuestran que las migajas de goma, especialmente clasificadas y preparadas, pueden ser un buen material acústico (Pfretzschner & Rodríguez, 1999). Swift *et al.* (1999), encontraron en su estudio “Acoustic absorption in re-cycled rubber granulate”, que estos materiales pueden absorber el sonido de manera efectiva si el tamaño del agregado y el contenido del aglutinante se pueden seleccionar y su grosor ajustar al rango de frecuencia de interés. Segura-Alcazar *et al.* (2014), realizaron un estudio para evaluar la absorción acústica de nuevos paneles multicapa para su aplicación en campos como barreras acústicas. Los resultados mostraron que los paneles multicapa hechos de granulometría 2,2-4 mm, presentan una absorción acústica más alta en el rango de frecuencia estudiado (400-3500 Hz); para estos paneles utilizaron el proceso de fabricación conocido como sinterizado de piezas sólidas moldeadas.

Ashori *et al.* (2015), muestran que la tendencia general con el uso y aumento en el contenido de caucho reciclado, mejora las propiedades físicas como la absorción acústica en paneles compuestos. Por su parte, Xu *et al.* (2018), fabricaron un material acústico utilizando aserrín de caucho reciclado y tableros de fibra con polietileno de alta densidad (High-density polyethylene, por sus siglas en inglés HDPE) fresco como aglutinante, se experimentó con polímeros naturales o sintéticos reciclados, generalmente residuos de caucho, la mezcla se prensó en moldes que eran en paneles compuestos a 185 °C durante 20 minutos, bajo una presión de 1 MPa. El trabajo resume que en estos componentes se pueden encontrar nuevos usos en la producción de materiales acústicos por sus propiedades de impedancia.

El empleo de materiales obtenidos de la valorización de residuos para su uso como materiales acústicos en la construcción, ha sido una línea de investigación ampliamente desarrollada por diferentes grupos

de trabajo —a escala mundial— durante las últimas siete décadas (ETRMA, 2010).

En este contexto, el presente trabajo tiene por objetivo caracterizar el desempeño acústico de un panel fabricado a partir de migas de caucho reciclado de 1 a 3 mm mezclado con una resina utilizada como aglutinante, simplificando el proceso de elaboración al no utilizar técnicas de sinterizado o prensado a altas temperaturas. Para cumplir con dicho objetivo, se describe el proceso experimental y se documenta el rendimiento de la absorción acústica del panel fabricado con caucho, al tiempo que se compara contra un panel de similares características, solo modificando el material acústico por uno tradicional como es la esponja acústica.

Materiales y métodos

Materiales

La principal materia prima utilizada fueron partículas de caucho que procedían de desechos triturados con tamaños de 1 a 3 mm. Se utilizó una resina vinílica L-33 obtenida en el mercado local como aglutinante, que es un acetato de polivinilo de sólidos medios utilizada en la construcción para elaborar tirolés y pastas texturizantes. Para la base del panel se utilizó cartón ondulado de canal simple utilizado en la industria del embalaje. Los paneles se analizan en una caja acústica elaborada con el mismo material base de los paneles, es decir, con cartón de embalaje de corrugado sencillo. La caja acústica es de tipo más básico.

Los paneles acústicos son esencialmente un marco, ya sea de madera u otro material con un núcleo de componente absorbente formando una especie de sándwich de los cuales existen una gran variedad de diseños y formas en el mercado, lisos o perforados; no obstante, lo que realmente los hace un panel acústico son el núcleo con el que están rellenos, que ha de ser un material con propiedades fonoabsorbentes (Mabasa, 2020). Para este trabajo se realizaron dos prototipos de paneles, tal como se muestra en la Figura 3.

Los paneles acústicos se generan de dos formas diferentes: el primero que es el panel acústico elaborado principalmente de migas de caucho reciclado de 1 a 3 mm y resina L-33 como aglutinante en una relación 70 y 30%, la mezcla se confinó en una base de

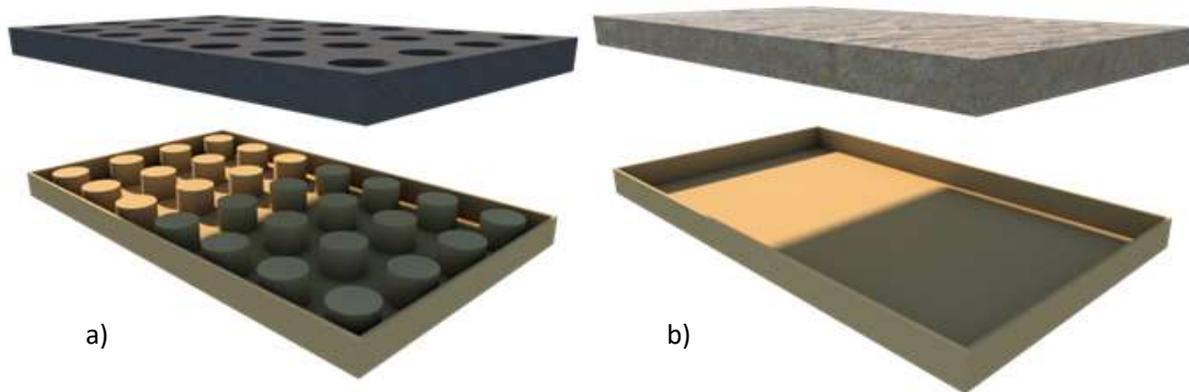


Figura 3. Prototipos de paneles acústicos de izquierda a derecha se muestra en el inciso a) el panel fabricado con migas de caucho reciclado como material absorbente y en el inciso b) el panel fabricado con esponja acústica.

cartón de embalaje reciclado con dimensiones de 610 mm por 360 mm por 35 mm de espesor, se colocaron 28 perforaciones moldeadas con cilindros de cartón igualmente reciclado de dos pulgadas de diámetro como se muestra en la Figura 3 inciso a. El segundo panel consta de dos piezas que son el marco de cartón de embalaje reciclado con las mismas dimensiones del primero, con la diferencia de que este consta de un núcleo de esponja acústica como material absorbente, como se muestra en la Figura 3 inciso b.

Mientras un panel utiliza un núcleo de esponja acústica, que es lo común en el mercado, el otro será un núcleo de migas de caucho reciclado con resina L-33 como aglutinante.

Procedimiento experimental: panel de caucho reciclado

En la Figura 4 se muestra el proceso de fabricación del prototipo de panel acústico con caucho reciclado

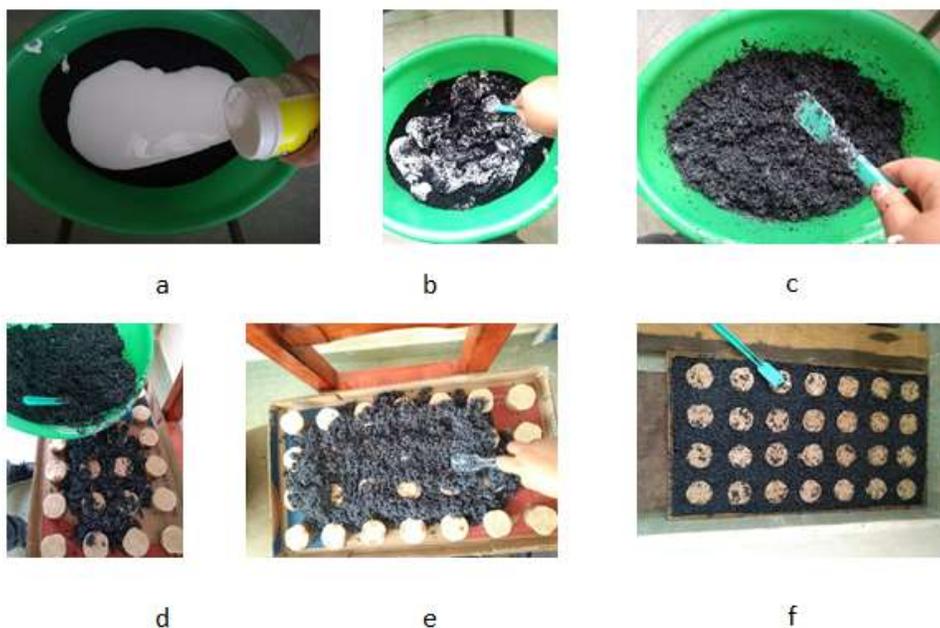


Figura 4. Proceso de fabricación del prototipo de panel acústico con caucho reciclado. Los incisos a, b y c corresponden al mezclado de la resina L-33 con las migas de caucho. Los incisos d y e, corresponden al vaciado de la mezcla caucho-resina en el molde de cartón de embalaje. El inciso f corresponde al secado a la intemperie.



Figura 5. Prototipo de panel con núcleo de esponja y prototipo de panel con núcleo de migas de caucho reciclado.

que consiste en el mezclado de migas de 1 a 3 mm con la resina L-33 en una proporción de 70 y 30%, formando una argamasa que se vació en el molde construido a base de cartón de embalaje donde quedó adherida y confinada la mezcla para su secado a la intemperie.

En el caso del panel de caucho se busca que la absorción sonora se produzca por los huecos que se generan entre las partículas del agregado, dando un grado de porosidad necesaria para la absorción (López-Recuero, 1999; Julia-Sanchis, 2008). Con los huecos o perforaciones de 2 pulgadas de diámetro, se busca aligerar el panel al no tener que rellenar toda la superficie con caucho, sino solo un 75% del volumen total. Sin embargo, cabe mencionar que estudios han demostrado que las perforaciones ofrecen una mayor resistencia acústica principalmente cuando estas son de tamaño sub-milimétrico de 0.5 a 1 milímetros, debido a que la fricción en las mismas se traduce en un aumento de la atenuación sonora a frecuencias bajas y medias (Carbajo *et al.*, 2012; Maa, 1998; Xu *et al.*, 2018).

Los dos paneles de diseños similares que se someterán a prueba para medir las propiedades fonoabsorbentes de cada material (núcleo), se muestran en la Figura 5. El panel que utiliza esponja cubre el 100% del volumen, mientras que el panel que utiliza caucho solo cubre el 75% del volumen total.

Caracterización acústica

Cuando una onda de sonido choca con una barrera que separa dos medios, por ejemplo, como una pared que está entre un medio de transmisión de sonido como el aire, ocurren tres fenómenos: absorción, reflexión y transmisión (Figura 6) (Sastrón, 2017).

Para medir el sonido transmitido a través de cada panel, se construyó una caja acústica (Figura 7) donde se colocó una fuente de ruido con el objetivo de que la onda de ruido generada, conocida como **sonido incidente**, recorra el interior de la caja y se focalice de manera unidireccional para así poder medir con el sonómetro colocado a una distancia constante de 60 centímetros, la cantidad de **sonido transmitido** al exterior medido en decibeles (dB).

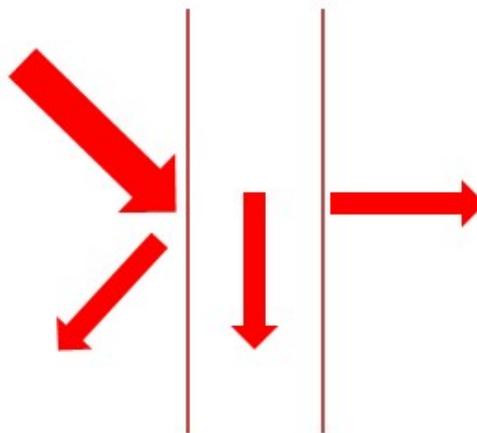


Figura 6. Fenómenos de absorción, reflexión y transmisión producidos al chocar una onda sonora contra un obstáculo

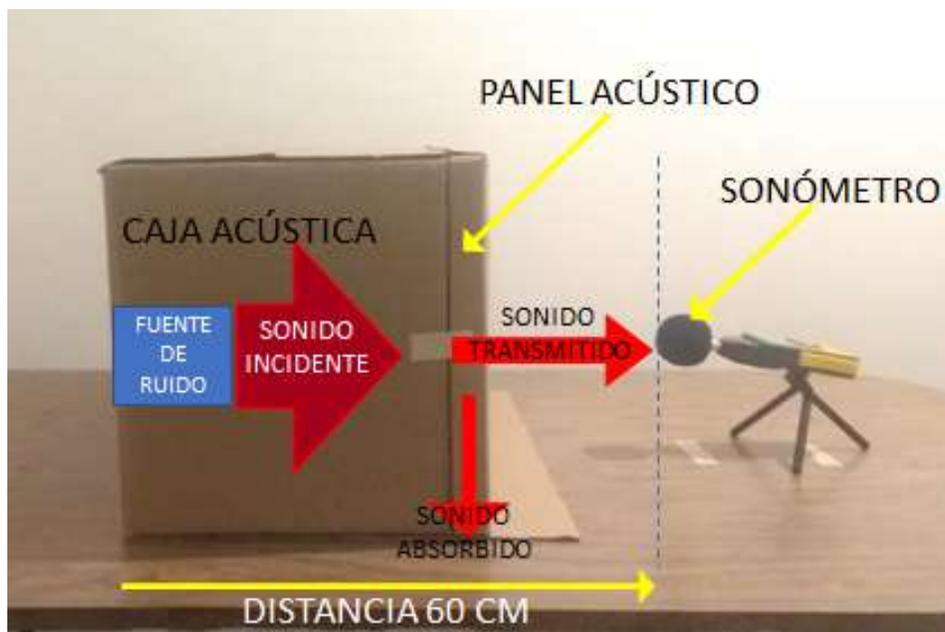


Figura 7. Caja acústica y colocación del panel, así como del sonómetro para la medición del sonido transmitido.

En la Figura 8 se muestran las especificaciones de la fuente de ruido y la pista que se reprodujo. La caracterización acústica de los paneles consistió en que lo único que se interpuso entre el sonido incidente que se generó en el interior de la caja acústica, fueron los paneles acústicos fabricados para este experimento.

En la Figura 9 se muestra el altavoz colocado al fondo de la caja acústica, la cual se selló con el panel correspondiente; seguidamente, se accionó la pista seleccionada para este experimento, y se procedió a tomar las lecturas indicadas en el sonómetro de la cantidad de sonido transmitido que se filtró a través de cada uno de los paneles. Se tomaron

dos tipos de registro: el primero en modo de ponderaciones cada dos segundos, y el segundo en modo tiempo real que es el primer y mayor sonido transmitido detectado por el sonómetro.

Características del recinto para las pruebas acústicas

El recinto utilizado para las pruebas acústicas, fue una habitación de 5.0 x 5.0 metros de lado y 2.7 metros de alto. En la Tabla 1 se muestran los niveles de ruido en este tipo de recintos, los cuales van de los 30 dB a los 50 dB clasificados como lugares poco ruidosos. Debido a la situación de emergencia sanitaria, se realizaron las pruebas en una habitación

Fuente de ruido	Especificaciones	Pista/detonación
	<p>ALTAVOZ Bluetooth KTS-1102-C Tamaño de la unidad de altavoz: 3 pulgadas. Potencia de salida: 5 w Respuesta de frecuencia 100 Hz-20K Hz. Relación Señal/Ruido: >85 dB.</p>	<p>Se reprodujo en el altavoz una pista que consistió en un efecto de sonido que provocó un globo al estallar/detonar, el cual se repitió tres veces con una duración de siete segundos. El sonido generado fue un ruido de impacto de 70 dB a 93 dB.</p>

Figura 8. Especificaciones técnicas de la fuente de ruido.



Figura 9. Colocación de la fuente de ruido y de ambos paneles en la caja acústica.

que cumpliera con características tales que no interfirieran con la toma de muestras.

De igual manera, en la Tabla 1 se muestra la descripción de los niveles de ruido que generan algunas actividades, basado en la escala con filtro de ponderación A. Esta tabla sirve como referencia de niveles aproximados de ruido, esto debido a la naturaleza compleja del ruido, pues los sonidos son variables y temporales dependiendo el tiempo y el lugar, así como la dimensión subjetiva de quien define cuando un ruido resulta más o menos perjudicial (Alfie-Cohen & Salinas-Castillo, 2017).

La ponderación del sufijo A

Las dos curvas de ponderación normalizadas internacionalmente de uso común son la “A” y “C”, y

sus características se especifican en la norma IEC 60651.

La ponderación del sufijo (A) de dB(A), es porque para la medición se utiliza un filtro de ponderación para el oído humano (Morales-Alanis, 2012). Esta ponderación se ajusta, con mayor precisión que otras, a la capacidad subjetiva del oído humano para percibir sonidos con independencia del nivel acústico existente. Es por esto que la ponderación (A) es la más utilizada para estudios y mediciones acústicas (López-Fachal, 2012). En la Figura 10 se muestra el sonómetro utilizado para la experimentación, el cual cuenta con la función A/C para elegir el tipo de ponderación con la que se requiere que opere, en este caso con la ponderación A.

Tabla 1
Niveles de ruido según la actividad con información de OSMAN (2010), *La Nación* (2012), Alfie-Cohen & Salinas-Castillo (2017).

ACTIVIDAD	Ruido en decibeles con ponderación A dB(A)	Percepción del ambiente
Pisadas	10	Ambiente silencioso
Cámaras de laboratorio	10	
Viento de los árboles	20	
Estudio de grabación	20	
Conversación en voz baja	30	Ambiente poco ruidoso
Dormitorio	30	
Biblioteca	40	
Oficina	50	
Despacho tranquilo	50	
Nivel propuesto por la OMS al aire libre, 55 dB(A)		
Conversación	60	



Especificaciones

Sonómetro STEREN®
 Modelo: HER-403
 Rango de medición: 30-130 dB
 Ponderación: A
 Sonómetro clase 2: Para la toma de medidas generales en trabajos de campo.

Figura 10. Decibelímetro o sonómetro HER-403 digital para la lectura de la intensidad del sonido.

Acústica arquitectónica y normativa

La acústica arquitectónica es considerada hasta ahora una ciencia relativamente nueva; es una parte de la ciencia física que estudia la generación, la propagación y la transmisión del sonido en todos los espacios cerrados o abiertos donde realiza sus actividades el ser humano (Saad-Eljure, 1996).

En México, existen regulaciones como la Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994, la cual establece los límites permitidos de ruido para fuentes fijas y el método de medición por el cual se determina su nivel emitido hacia el ambiente. Adicionalmente, la Norma Oficial Mexicana NOM-080-ECOL-1994, establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido proveniente del escape de vehículos automotores, motocicletas y triciclos motorizados en circulación y su método de medición.

Asimismo, la Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994, fija estos límites de niveles de ruido permitido en relación al horario durante el

que se lleva a cabo una actividad. Como se muestra en la Tabla 2, el ruido debería disminuir al acercarse las horas de descanso, con base en esto, se fijaron tres distintos horarios para la toma de muestras: matutino, vespertino y nocturno, ya que los elementos que se implementan como sistemas de aislamiento y acondicionamiento acústico, tienen como objetivo principal ayudar a bloquear estos niveles de ruido, con el propósito de mantener los niveles más cercanos al confort acústico recomendados por las normativas.

Actualmente, estos reglamentos solo son recomendaciones técnicas y/o exigencias de leyes que fueron establecidas por entidades federales de protección ambiental y su cumplimiento ha sido delegado a los gobiernos estatales y municipales (Alfie-Cohen & Salinas-Castillo, 2017).

Las normativas no regulan específicamente la construcción y diseño de un panel acústico, puesto que gran parte de ellos son marcos de madera u

Tabla 2
 Límites máximos permisibles de ruido de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994.

ZONA	HORARIO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE dB (A)
Residencial (exteriores)	6:00 a 22:00	55
	22:00 a 6:00	50
Industriales y comerciales	6:00 a 22:00	68
	22:00 a 6:00	65
Escuelas (áreas exteriores de juego)	Durante el juego	55

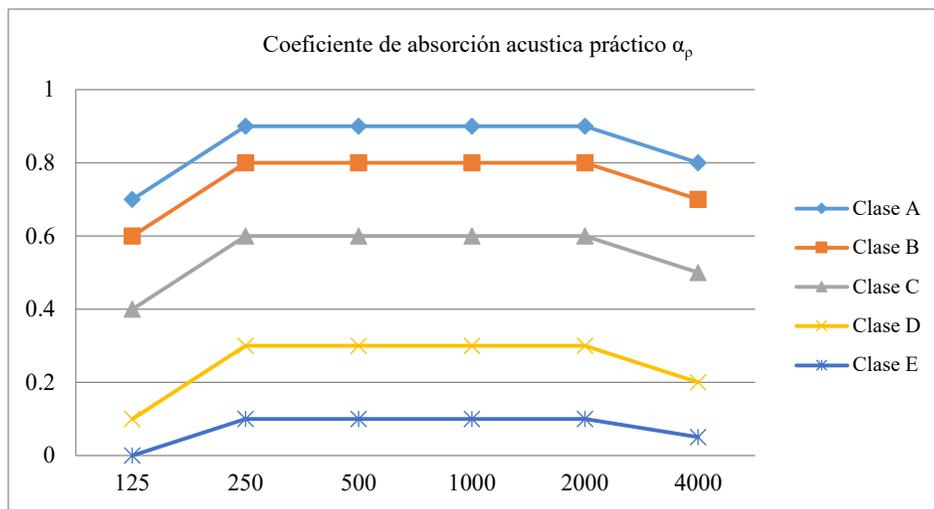


Figura 11. Gráfica con la clasificación de materiales absorbentes acústicos según UNE-EN ISO 11654:1998.

otros materiales con un núcleo de componentes absorbentes, con diversos diseños geométricos o perforados. La función de absorbente se la da, principalmente, el material con el que es fabricado, así como su geometría, para tener un ejemplo, unos paneles acústicos simples bien podrían ser colchones, cojines y esponjas en general.

Dentro de la normativa para los materiales absorbentes y su clasificación, está la norma UNE-EN ISO 11654:1998 que clasifica los productos en materiales absorbentes de sonido de acuerdo con los valores especiales del coeficiente de absorción de sonido, tal como se muestra en la Figura 11, donde se establece una clasificación de estos materiales según las clases A, B, C, D y E, siendo A los que obtienen mejores resultados como se indica en la Tabla 2 (López-Fachal, 2012).

La efectividad del material se mide mediante el coeficiente de absorción, expresado con el símbolo α , con valores dentro de una escala de 0 a 1 como se muestra en la Figura 11. Donde 1 significa el 100% de absorción de la energía sonora incidente y 0 el 0% de la energía incidente.

El procedimiento para medir la absorción acústica de un material se hace mediante el tubo de impedancia acústica que se basa en la norma ISO 10534-2, la cual trata sobre la determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia.

Según Rodríguez-Montejano (2003), el coeficiente de absorción de las migas de caucho se encuentra en una clasificación de entre E hasta A, según la clasificación de la Tabla 3, en donde afirma que este material granular pueden absorber el sonido de manera efectiva en función del tamaño del agregado (caucho granular), el contenido del aglutinante, así como la selección del grosor para el rango de frecuencia de interés.

Resultados y discusión

Los siguientes gráficos muestran los resultados obtenidos de la medición de sonido transmitido que atravesó por los paneles al exterior de la caja acústica y que se probaron en tres distintos horarios.

Tabla 3
Clasificación de materiales absorbentes acústicos según UNE-EN ISO 11654:1998.

Clase de absorción acústica	Coeficiente de absorción acústica práctico α_p
A	0,90; 0,95; 1,00
B	0,80; 0,85
C	0,60; 0,65; 0,70; 0,75
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55
E	0,25; 0,20; 0,15
Sin clasificar	0,1; 0,05; 0,00

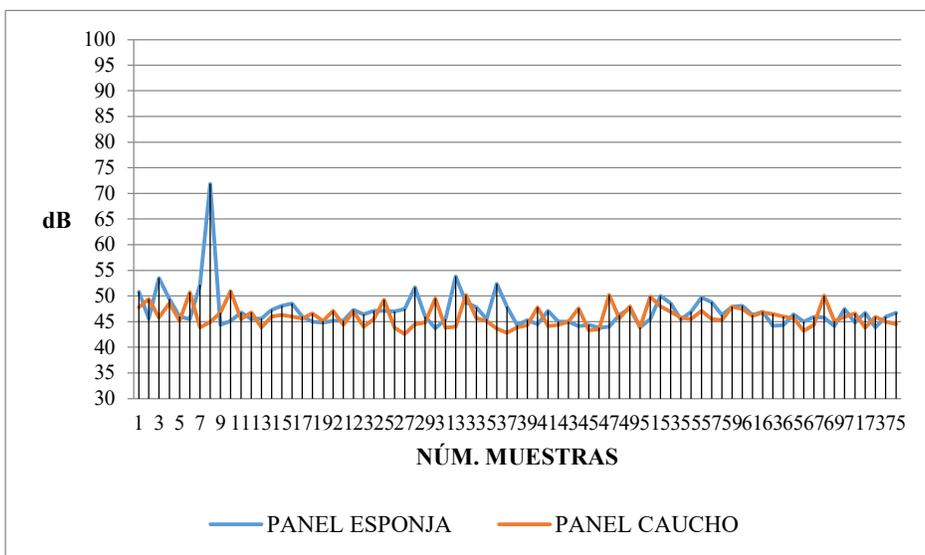


Figura 12. Gráfica de lecturas de sonido transmitido y registrado en el sonómetro en modo de lectura; relación de muestras dos veces por segundo en horario matutino.

El ruido estudiado fue un golpe de impacto generado por la fuente de ruido que oscilaba entre los 70 y 93 dB con una duración de siete segundos a una distancia de 60 centímetros alejado del sonómetro. La configuración del sonómetro fue en ponderación (A) que, como ya se mencionó, es la más útil para una medición de ruido general, haciendo que el sonómetro responda igual que el oído humano ante cualquier sonido con un rango de frecuencia de 30-130 dB.

En la Figura 12 se muestra la gráfica de las primeras 75 muestras tomadas en horario matutino; el sonido registrado osciló entre 40 y 55 dB para ambos paneles.

Se puede ver que los resultados obtenidos para cada uno de ellos son muy similares; sin embargo, con el panel de esponja se registran algunos picos ligeramente altos.

En la Figura 13 se muestra la gráfica, igualmente de las segundas 75 muestras tomadas en horario matutino; no obstante, la diferencia radica en el modo de lectura que se utilizó, ya que fue el denominado tiempo real, esto es que el sonómetro obtuvo el valor máximo de un sonido. Los registros oscilaron entre 80 y 93 dB y se observó que la diferencia entre cada panel

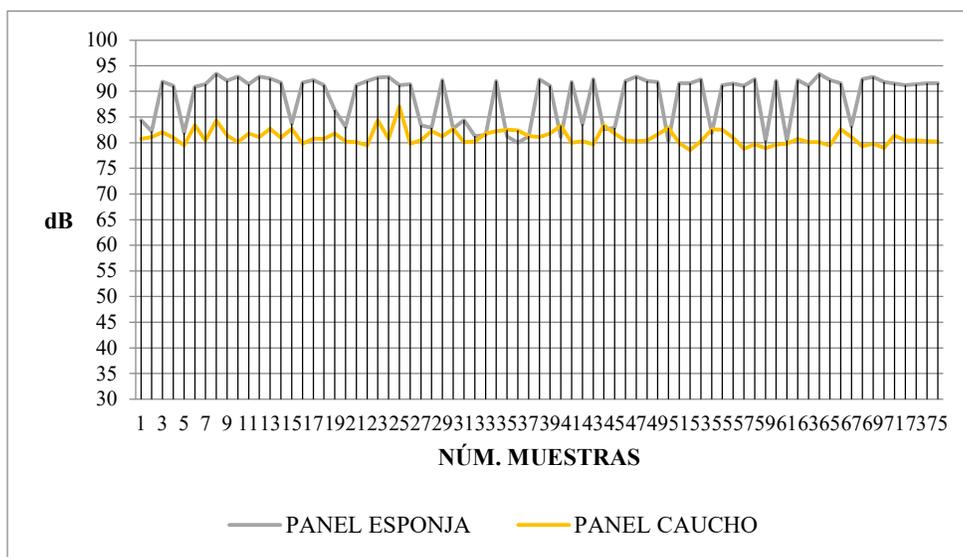


Figura 13. Gráfica de lecturas de sonido transmitido y registrado en el sonómetro en modo de lectura en tiempo real en horario matutino.

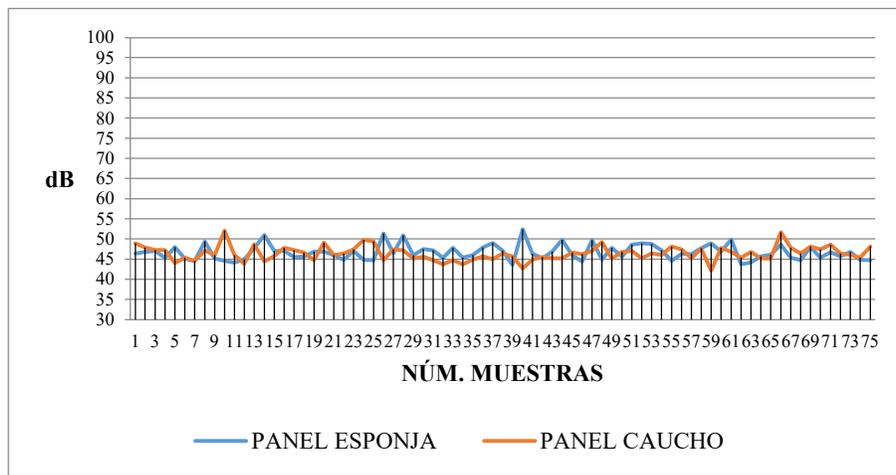


Figura 14. Gráfica de lecturas de sonido transmitido y registrado en el sonómetro en modo de lectura relación de muestras; dos veces por segundo en horario vespertino.

fue más notoria: el panel de caucho muestra una tendencia más baja y constante entre 80 y 83 dB sin tantos picos, mientras que el panel de esponja sigue una tendencia más irregular con picos entre 83 y 93 dB.

En la Figura 14 se muestra la gráfica de las primeras 75 muestras tomadas en horario vespertino, el sonido registrado osciló entre 45 y 50 dB para ambos paneles.

En la Figura 15 se observa la gráfica de las segundas 75 muestras tomadas en horario vespertino en el modo de lectura tiempo real, es decir, se obtuvo el valor máximo de un sonido; la diferencia entre las muestras de cada panel, como se observa, fueron que el panel de caucho muestra una tendencia levemente más baja y constante al inicio entre los 80 y 83 dB, aumentando eventualmente con algunos picos de entre los

80 y 93 dB. En el panel de esponja se observó desde el inicio y hasta el final, una tendencia irregular de entre los 83 y 93 dB.

En la Figura 16 se muestra la gráfica de las 75 muestras tomadas en horario nocturno; el sonido registrado osciló entre 45 y 50 dB en modo de lectura relación de muestras dos veces por segundo; se registraron resultados para cada panel muy similares y también se observaron algunos picos cercanos a los 55 dB con el panel de esponja.

En la Figura 17 se muestra la gráfica de las segundas 75 muestras tomadas en horario nocturno en el modo de lectura en tiempo real. Se observó que ambos paneles mantuvieron una tendencia inicial de entre los 80 y 83 dB. El panel de esponja incrementó esta

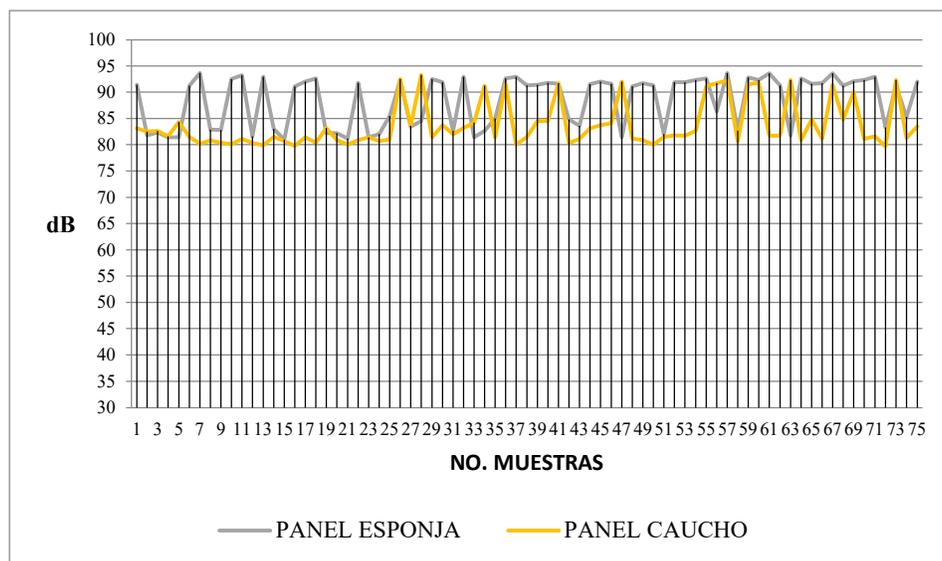


Figura 15. Gráfica de lecturas de sonido transmitido y registrado en el sonómetro en modo de lectura en tiempo real en horario vespertino.

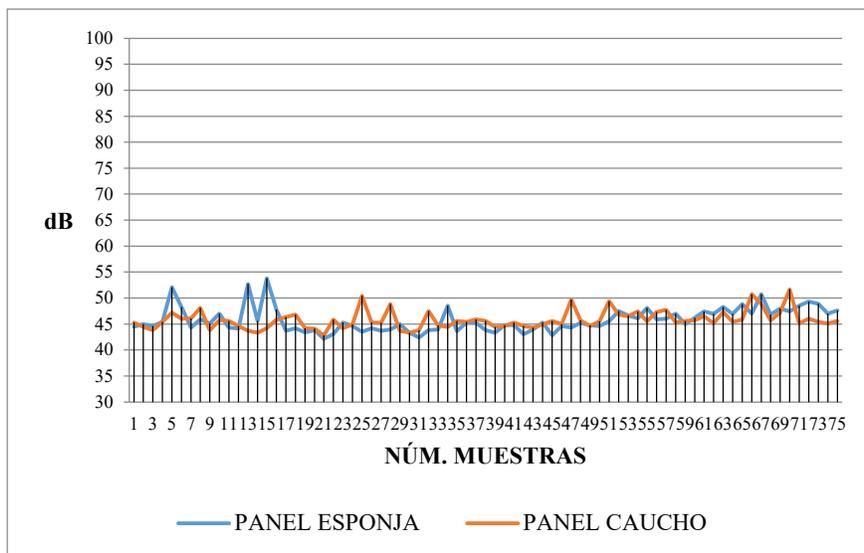


Figura 16. Gráfica de lecturas de sonido transmitido y registrado en el sonómetro en modo de lectura relación de muestras dos veces por segundo en horario nocturno.

tendencia superando los 90 dB y manteniéndose casi constante, por su parte, el panel de caucho mostró una tendencia de 80 dB con picos entre 90 y 93 dB.

El mecanismo de absorción acústica de un material se basa en la resistencia que ofrece al flujo de aire, reduciendo la amplitud de la onda sonora, las superficies porosas tienen la capacidad de absorber parcialmente las ondas sonoras para después disipar dicha energía en dosis de calor.

La esponja acústica, de acuerdo a sus características porosas, se encuentra ubicada generalmente entre B y A, según la Tabla 3, es decir, tiene una alta capacidad de absorber casi todas las ondas sonoras.

Las migas de caucho, en cambio, como se ha citado, se encuentra en un rango de E hasta A; sin embargo, esta clasificación depende y está en función del tamaño del agregado, del aglutinante y del grosor del panel o capa de material. En el caso específico de este trabajo, el diseño de mezcla con el que se experimentó —que fue un agregado de migas de caucho reciclado con tamaños de 1 a 3 mm y una resina como aglutinante en una relación de 70 y 30% con un grosor de 35 mm—, obtuvo resultados superiores a los de la esponja acústica, con esta disposición específica de diseño de mezcla y dimensiones como se describe en las gráficas de las figuras 12, 13, 14, 15, 16 y 17, respectivamente.

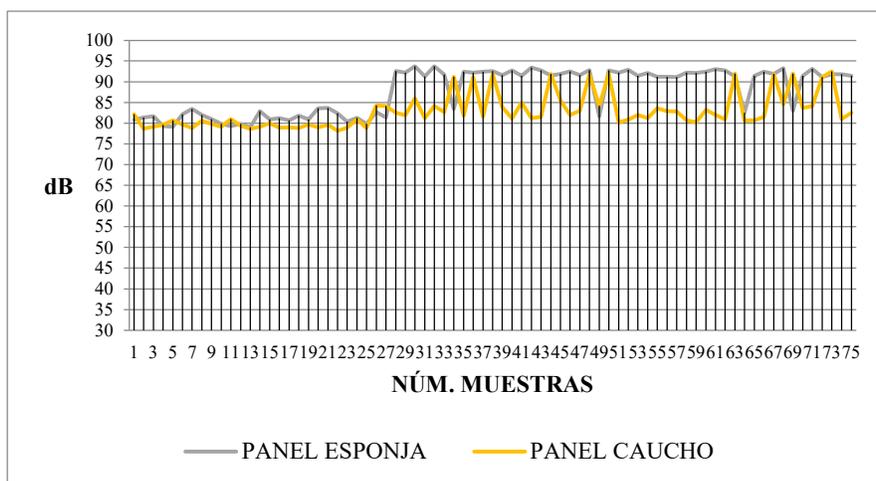


Figura 17. Gráfica de lecturas de sonido transmitido y registrado en el sonómetro en modo de lectura en tiempo real en horario nocturno.



Tabla 5

Medidas de tendencia central para los paneles en modo de lectura relación de muestras dos veces por segundo.

Medidas de tendencia central para el panel de esponja		
Media	46.36	dB
Mediana	46.00	dB
Moda	47.00	dB
Medidas de tendencia central para el panel de caucho		
Media	46.07	dB
Mediana	45.70	dB
Moda	45.60	dB

Se registraron 225 mediciones en modo de lectura relación de muestras dos veces por segundo, realizadas por el sonómetro. Las medidas de tendencia central que se calcularon se muestran en la Tabla 4, resultando una Media de 46.07 dB para el panel de caucho contra 46.36 dB respecto del panel de esponja, lo que significa una diferencia de 0.29 dB. Una Mediana para el panel de caucho de 45.70 dB, es decir, la mitad de las muestras están por debajo de este rango, mientras que con el panel de esponja se obtuvo 46.00 dB, indicando que la mitad de las muestras recolectadas estuvieron por debajo de ese mismo rango. Finalmente, la medida con mayor frecuencia o Moda, fue de 45.60 dB para el

panel de caucho y 47.00 dB para el panel de esponja.

Fueron tomadas otras 225 en el modo de lectura tiempo real que realiza el sonómetro como se muestra en la Tabla 5, resultando una Media de 82.55 dB para el panel de caucho y de 88.32 dB para el panel de esponja, teniendo una diferencia de 5.768 dB. Por otra parte, se obtuvo una Mediana de 81.40 dB para el panel de caucho siendo la mitad de estas muestras por debajo de este rango, mientras que para el panel de esponja se obtuvo 91.40 dB, resultando una diferencia de 10 dB en comparación al panel de caucho. Por último, la medida con mayor frecuencia o Moda fue de 80.70 dB para el panel de caucho y 91.40 dB para el panel de esponja.

Tabla 4

Medidas de tendencia central para los paneles en modo de lectura en tiempo real.

Medidas de tendencia central para el panel de esponja		
Media	88.32	dB
Mediana	91.40	dB
Moda	91.40	dB
Medidas de tendencia central para el panel de caucho		
Media	82.55	dB
Mediana	81.40	dB
Moda	80.70	dB

Con el análisis de las medidas de tendencia central se puede decir que el panel de caucho reciclado obtuvo un mejor desempeño al bloquear alrededor 10 dB más que el panel fabricado con esponja, indicando con esto que su absorción fue superior.

Conclusiones

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con el panel de caucho reciclado diseñado con perforaciones de 2 pulgadas, a partir de los datos de sonido registrados en el sonómetro en el modo de lectura de dos ponderaciones por segundo, arrojó resultados similares, e incluso menores con respecto al panel de esponja tradicional, lo que quiere decir que, a pesar de ser un material rígido en comparación a la esponja, no se volvió un elemento reflexivo, conservando así propiedades de poca o nula reflexión que tiene los materiales blandos y porosos como es la esponja, evitando que un sonido se vuelva molesto o perjudicial.

Con respecto a los datos obtenidos en la prueba en modo de lectura en tiempo real, se puede concluir que el panel de caucho tuvo una transmisión de sonido menor que el panel de esponja, ya que de acuerdo a los registros de lectura con el panel de caucho, se logró bloquear 10 dB más que con el panel de esponja, esto quiere decir que aumentó su absorción alrededor de 17.5%.

Con los 28 huecos o perforaciones equidistantes de 2 pulgadas de diámetro, se logró aligerar el panel de caucho al no tener que rellenar toda la superficie con el material, cubriendo solo un 75% del volumen total.

Se puede concluir también que las partículas del agregado seco, en este caso migas de caucho reciclado con tamaños de 1 a 3 mm, al unirse con el aglutinante líquido formaron una argamasa que al secarse adquirió un grado de porosidad necesaria para servir como material absorbente, mostrando así que este panel y su diseño de mezcla caucho-resina, puede ser una alternativa fonoabsorbente.

Referencias

Alfie-Cohen, M. and Salinas-Castillo, O., 2017, Ruido en la ciudad. Contaminación auditiva y ciudad caminable: *Estudios demográficos y urbanos*, 32(1), 65-96. ISSN 0186-7210 (print) ISSN 2448-6515 (web).

<https://www.scielo.org.mx/pdf/educm/v32n1/2448-6515-educm-32-01-00065.pdf>

Ashori, A., Ghofrani, M., Rezvani, M. H. and Khojasteh Khosro, S., 2015, Utilization of waste tire rubber in hybrid plywood composite panel: *Polymers for Advanced Technologies*, 26(8), 1034-1040.

<https://doi.org/10.1002/pat.3528>

Berglund, B., Lindvall, T., Schwela, D.H. and Organización Mundial de la Salud, 1999, "Guidelines for Community Noise". <file:///C:/Users/Angel/Downloads/a68672.pdf>

Carbajo, J., Cardenas, W., Torres, J., Ramis, J. and Molina, D., 2012, Una alternativa para el estudio acústico de paneles perforados: *VIII Congreso Ibero-americano de acústica, Sea-Acustica*, Évora, Portugal. <http://ftp.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/101.pdf>

Diario Oficial de la Federación, 1994, "Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994".

https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4706988&fecha=22/06/1994#gsc.tab=0

Diario Oficial de la Federación, 2004, "Norma Oficial Mexicana NOM-080-ECOL-1994".

https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4866669&fecha=13/01/1995#gsc.tab=0

ECODES, 2005, "Niveles de exposición al ruido". <https://archivo.ecodes.org/web/noticias/niveles-de-exposicion-al-ruido>, [consultado el 19 de agosto de 2022]

EPA. United States Environmental Protection Agency, 1997, "Exposure Factors Handbook (Final Report)".

https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NCEA&dirEntryId=12464, [consultado el 25 de marzo de 2021].

European Tyre & Rubber Manufacturers' Association, 2010, "End of life tyres. A valuable resource with growing potential". https://www.signus.es/wp-content/uploads/2017/06/Etrma_elt_management_brochure_final_2010.pdf, [consultado el 10 de agosto de 2022].

European Tyre & Rubber Manufacturers' Association, 2014, "Statics Booklet". Bruselas.

Forrest, M., 2014, Recycling and Re-use of Waste Rubber: *Shrewsbury, Reino Unido, Smithers Rapra Technology*, pp. 135-233. ISBN: 978-184735-682-6.

Herrera-Sosa, E.S., Martínez-Barrera, G., Barrera-Díaz, C. and Cruz-Zaragoza, E., 2015, "Materiales reciclados de llantas automotrices y la radiación gamma en el mejoramiento del concreto", en G. Martínez-Barrera, J.B. Hernández-Zaragoza, T. López-Lara and C. Menchaca-Campos (eds.). *Materiales sustentables y reciclados en*

- la construcción*, Barcelona, España, OmniaScience, pp. 73-93. <http://dx.doi.org/10.3926/oms.245>
- Ibérica, M., 2016, El césped artificial de Mondo cumple con el reglamento europeo para sustancias químicas: *Mondo Ibérica - News*. <https://news.mondoiberica.com/es/el-cesped-artificial-de-mondo-cumple-con-el-reglamento-europeo-para-sustancias-quimicas/>
- Instituto de Biomecánica de Valencia, s. f., “Study of the Incidence of Recycled Rubber from Tyres in Environment and Human Health”. http://www.iss-sportsurfacescience.org/downloads/documents/muw7lmt0wh_ibv.pdf, [consultado el 12 de agosto de 2022].
- International Rubber Study Group, 2014, “Latest World Rubber Industry Outlook now available from IRSG”. <http://www.rubberstudy.com/news-article.aspx?id=5081&b=earlier-news.aspx>, [consultado el 28 de noviembre de 2020].
- Irevna, 2016, “Tire Recycling Industry: A Global View”. <https://docplayer.net/20869018-Tire-recycling-industry-a-global-view.html>, [consultado el 9 de Agosto de 2022].
- Julia-Sanchis, E., 2008, Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica: PhD thesis, *Universidad Politécnica de Valencia*, 36 pp.
- López-Fachal, P., 2012, Comparación de los criterios de calidad acústica con los estándares de confort admitidos por las sociedades de clasificación en mediciones de ruidos a bordo de buques. Exposición laboral, confort acústico y control del ruido: PhD thesis, *Universidad de Coruña*, pp. 72-80.
- López-Recuero, M., 1999, Acústica arquitectónica aplicada: *Ediciones Paraninfo*. ISBN: 9788428325714.
- Maa, D.Y., 1998, Potential of microperforated panel absorber: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(5), 2861-2866. <https://doi.org/10.1121/1.423870>
- Mabasa, 2020, “Panel acústico fonoabsorbente en módulos”. <https://mabasa.com.mx/barreras-acusticas-cons-truccion/> [consultado el 1 de abril de 2022].
- Maderuelo-Sanz, R., 2014, Investigaciones sobre la aplicabilidad en edificación de materiales acústicos procedentes de la valorización de residuos: PhD thesis, *Universidad de Extremadura, Departamento de Física Aplicada*.
- Maderuelo-Sanz, R., Nadal-Gisbert, A.V., Crespo-Amorós, J.E. and Parres-García, F., 2012, A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires (ELTs): *Applied Acoustics*, 73(4), 402-408. ISSN 0003-682X. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.12.001>
- Morales-Alanis, J., 2012, Acústica en espacios y en los volúmenes arquitectónicos: *Trillas*. ISBN 978-607-17-1275-2.
- Observatorio de Salud y Medio Ambiente de Andalucía, 2010, “Ruido y salud. Guías profesionales”. <https://www.osman.es/project/ruido-y-salud-2/>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2012, “Pedestrian safety, urban space and health”. <https://www.oecd.org/publications/pedestrian-safety-urban-space-and-health-9789282103654-en.htm>
- Peláez-Arroyave, G.J., Velásquez-Restrepo, S.M. and Giraldo Vásquez, D.H., 2017, Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura: *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 27-50. <https://doi.org/10.18359/rcin.2143>
- Pfretzschner, J. and Rodríguez, R., 1999, Acoustic properties of rubber crumbs: *Polymer Testing*, 18(2), 81-92. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(98\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(98)00009-9)
- “Prueban que el ruido alto afecta la memoria”, *La Nación*, Buenos Aires, 11 de julio de 2012. <http://www.lanacion.com.ar/1489554-prueban-que-el-ruido-altoafecta-la-memoria> [consultado el 17 de agosto de 2022].
- Rodríguez-Montejano, R.M., 2003, Propiedades acústicas del caucho granular: PhD thesis, *Universidad Politécnica de Madrid*.
- Ruza, F., 1988, El ruido del tráfico: evaluación y corrección de su impacto: *Simposio sobre Impacto Ambiental de Carreteras, España, PIARC*.
- Saad-Eljure, E., 1996, Acústica Arquitectónica: MSc thesis, *Universidad Nacional Autónoma de México*. <http://132.248.9.195/ppt1997/0242675/0242675.pdf> [consultado el 9 agosto de 2022].
- Salinas-Castillo, O., 2015, Mucho ruido y pocas soluciones. Los corredores peatonales en el Centro Histórico de la Ciudad de México y su impacto en la contaminación auditiva y políticas de ciudad caminable: MSc thesis, *Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco*.
- Sastrón, J., 2017, “Coeficiente de absorción acústica ¿Existe con valores superiores a 1?”. <https://www.produccionelsofotano.com/coeficiente-de-absorcion-acustica/> [consultado el 5 de marzo de 2022].

Segura-Alcaraz, J., Crespo Amoros, J.E., Julia Sanchis, E., Nadal Gisbert, A. and Gadea Borrell, J.M., 2014, Estimación de la absorción acústica de paneles fabricados con neumáticos reciclados: *Dyna*, 89(3), 106-111.

<https://doi.org/10.6036/5796>

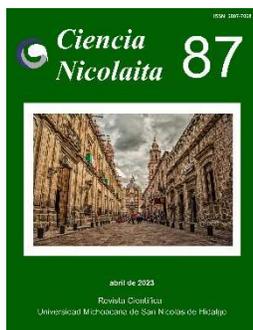
Servicios Deportivos Integrales Canarios, 2016, "El césped artificial de Mondo cumple con el reglamento europeo para sustancias químicas". <https://serdican.es/el-cesped-artificial-de-mondo-cumple-con-el-reglamento-europeo-para-sustancias-quimicas/>

Swift, M., Bris, P. and Horoshenko, K., 1999, Acoustic absorption in re-cycled rubber granulate: *Applied Acoustics*, 57(3), 203-212. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(98\)00061-9](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(98)00061-9)

World Health Organization, 2011, Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe: *Ginebra, World Health Organization*. ISBN: 978 92 890 0229 5.

https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf

Xu, X., Wang, H., Sun., Y., Han, J. and Huang, R., 2018, Sound absorbing properties of perforated composite panels of recycled rubber, fiberboard sawdust, and high density polyethylene: *Journal of Cleaner Production*, 187, 215-221. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.174>



Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Implementación de la Realidad Virtual en los modelos BIM para la sostenibilidad

Implementation of Virtual Reality in BIM models for sustainability

Miguel Cervantes-García* y David Joaquín Delgado-Hernández

Para citar este artículo: Cervantes-García Miguel y Delgado-Hernández David Joaquín, 2023. Implementación de la Realidad Virtual en los modelos BIM para la sostenibilidad. Ciencia Nicolaita no. 87, 61-78. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.632>



Historial del artículo:

Recibido: 22 de abril de 2022

Aceptado: 10 de septiembre de 2022

Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: miguelceg@hotmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Implementación de la Realidad Virtual en los modelos BIM para la sostenibilidad

Implementation of Virtual Reality in BIM models for sustainability

Miguel Cervantes-García* y David Joaquín Delgado-Hernández

Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Arquitectura y Diseño

Resumen

El uso de la Realidad Virtual (VR) tiene sus raíces en las ciencias de la comunicación visual, por lo que su aplicación en proyectos arquitectónicos la distingue de muchas otras herramientas. En este artículo se determinan las dimensiones de la metodología BIM (*Building Information Modeling*) que permite implementar la VR mostrando los posibles beneficios. La metodología a seguir comienza presentando la clasificación general de los sistemas tridimensionales, las características de la VR, sus ventajas de integración con la metodología BIM y sus desafíos como herramienta dentro de una arquitectura sostenible. Finalmente, se plantean las conclusiones.

Palabras clave: realidad virtual, realidad extendida, modelado de información de construcción - BIM, BIM verde, sostenibilidad

Abstract

The use of Virtual Reality (VR) originated in the visual communication sciences, and its application in architectural projects distinguishes it from many other tools. In this article, the dimensions of the BIM (*Building Information Modeling*) methodology that allow the implementation of VR are determined, showing the possible benefits. The research methodology begins by presenting the general classification of three-dimensional systems, the characteristics of VR, its integration advantages with the BIM approaches and its challenges as a tool within the sustainable architecture arena. Finally, the conclusions are presented.

Keywords: virtual reality, extended reality, building information modeling - BIM, green BIM, sustainability

Introducción

Las definiciones de lo que implica la disciplina del diseño son, en sí mismas, amplias. En el campo de la arquitectura abarca desde la parte conceptual, es decir, la modelización de procesos democráticos y participativos en la planificación del objeto arquitectónico (Björgvinsson, Ehn, & Hillgren, 2010), hasta su materialización misma (Shen, Ong, & Nee, 2010). En arquitectura, la VR es utilizada para planificar y diseñar realidades tridimensionales controladas para ser visualizadas con un propósito específico, por ejemplo, mejorar visualmente la presentación de un proyecto o detectar errores de construcción que pueden representar un mayor gasto de recursos. Así, conviene definir los “tipos” de realidad.

Definiendo los “tipos” de realidad

La VR es una de las categorías que existen para clasificar la forma en que se presentan los objetos y espacios virtuales en tres dimensiones en relación con la realidad. A su vez, la VR está inmersa en una categoría general más amplia conocida como Realidad Extendida (*Extended Reality - XR*), cuyo esquema (Figura 1) y definición se presenta en seguida.

a) Realidad Extendida y Realidad Mixta

A grandes rasgos, la XR se presenta como una categoría general, de visión integradora, de las tecnologías y sistemas referentes a los espacios y objetos tridimensionales que, como su nombre lo indica, puedan “extenderse” o enriquecerse mediante cualquier otro sistema o tipo de tecnología. La XR integra como subcategoría a la VR y a la Realidad Mixta (*Mixed Reality - MR*), que a su vez tiene como subcategorías a la

Realidad Aumentada (*Augmented Reality - AR*) y a la Virtualidad Aumentada (*Augmented Virtuality - AV*), ambos tipos de “realidades” se caracterizan por permitirle al usuario tener un sentido de presencia, es decir, cierta noción o vinculación con el entorno real.

Para entender mejor los conceptos, en la Figura 2 se muestra un ejemplo. Las montañas representan el entorno real (*RE*) y los árboles los objetos reales. Los prismas simbolizan un objeto virtual cualquiera y los tres planos el espacio virtual. La combinación del prisma con las montañas, corresponde con la *AR*. La superposición de los tres planos con los árboles representa la *AV* y, finalmente, el prisma con los tres planos simboliza la *VR*.

Steve Mann (2018) menciona que la XR está relacionada con una serie de conceptos y postulados que utilizan la letra “X” para representar una variable posicionada dentro del continuo de virtualidad, concepto propuesto por Paul Milgram y Fumio Kishino (1994), el cual es un eje horizontal que va de izquierda a derecha y que tiene como extremos el entorno “real” y el entorno “virtual”. El mismo autor también aclara que existe cierta confusión en la manera en que se emplea el término XR, ya que se utiliza de forma equivalente al de Realidad-X (*X-Reality*) y Realidad Cruzada (*Cross-Reality*), generando tres clasificaciones distintas. Por lo que no es raro que la XR sea entendida como sinónimo de la MR, la XR como una subcategoría de la MR y la XR como categoría general (Figura 3).

En cuanto a la MR, tanto Paul Milgram y Fumio Kishino (1994), como Åsa Fast-Berglund, Liang Gong y Dan Li (2018), la entienden como un entorno en donde lo real y lo virtual se mezclan; en donde lo vir-

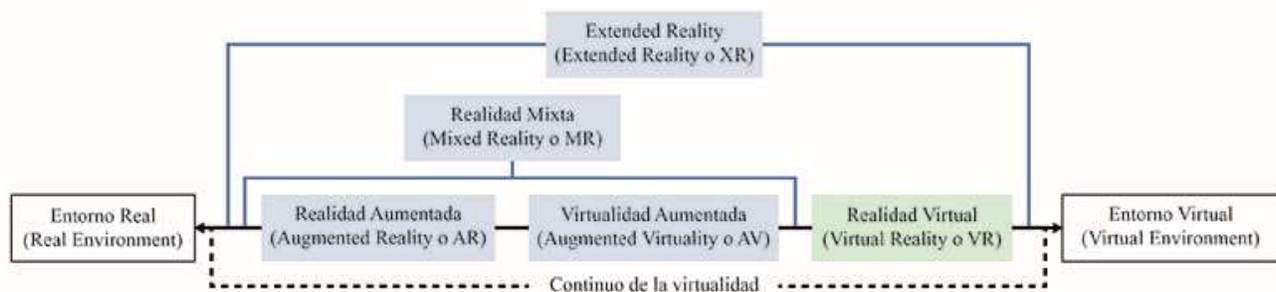


Figura 1. Clasificación general de los distintos tipos de realidad. Adaptación de testing and validating Extended Reality (XR) technologies in manufacturing (p. 2) por Åsa Fast-Berglund, Liang Gong y Dan Li (2018).

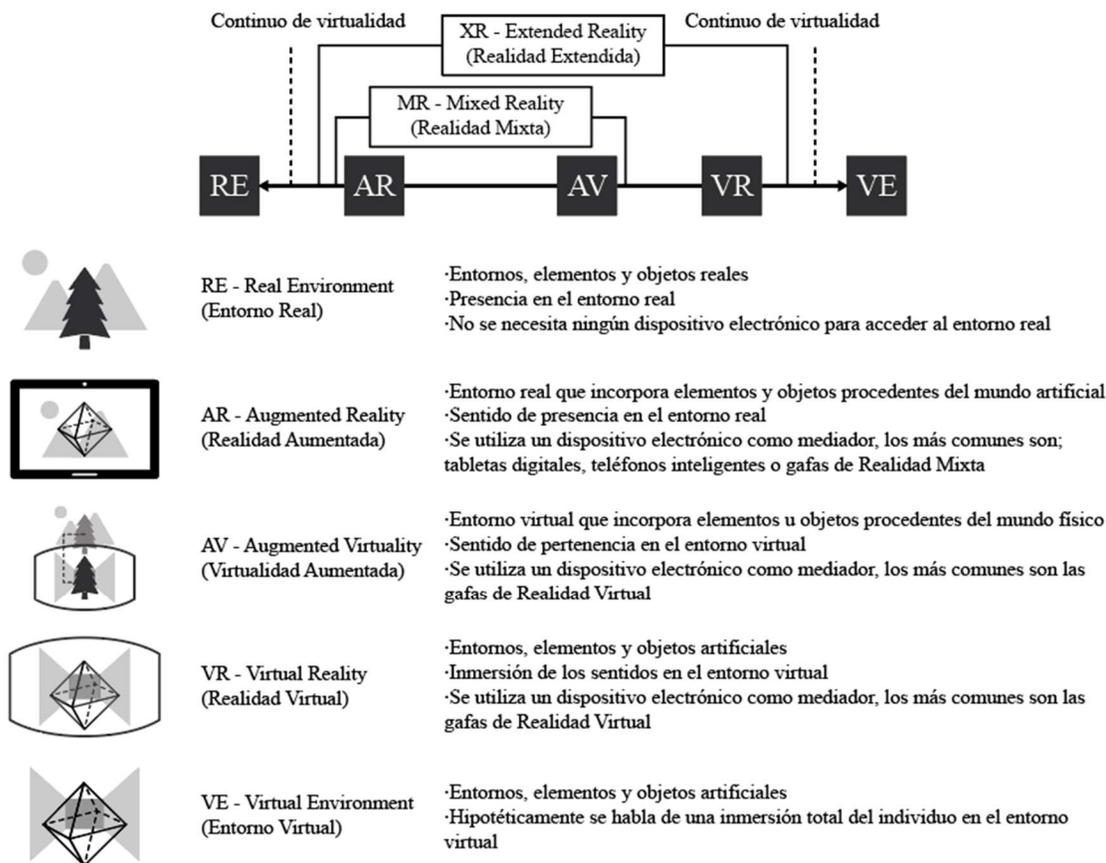


Figura 2. Características de los distintos tipos de realidad (Elaboración propia).

tual aumenta lo real y lo real aumenta lo virtual, dándole cierto grado de presencia al usuario respecto al mundo real. Cabe señalar que según la definición de MR, y como se puede ver en la Figura 3, la primera acepción que se presenta de izquierda a derecha, es la que mejor plantea la clasificación general de los distintos tipos de realidad, ya que la VR al presentar una virtualidad total por definición, no puede estar integrada dentro de la MR. Para esclarecer esta situación, se presentan a continuación algunas definiciones clásicas de la VR.

b) Realidad Virtual

La idea de VR fue concebida en la ciencia ficción. Su primer registro fue en 1935 cuando Stanley G. Weinbaum publicó un relato breve para la revista *Wonder Stories* denominado "Las gafas de Pigmalión", donde se describe un sistema de grabaciones holográficas y experiencias ficticias. En su relato, Weinbaum manifiesta un anhelo que ha acompañado al ser humano desde sus orígenes: el anhelo de trascender, no

solo de superar las limitaciones impuestas y circunscritas por el espacio y el tiempo, sino de exceder las limitaciones de los sentidos aumentándolos a través de los medios electrónicos.

El concepto VR tiene su origen en la década de los sesenta. Fue introducido en los escritos *ciberpunk* que se popularizaron y permitieron que varios conceptos, relacionados con la virtualidad, se utilizaran de manera cotidiana; entornos virtuales, mundos virtuales, espacio virtual y realidad artificial. Jaron Lanier integró dichos conceptos en un solo término: VR, que definió como una tecnología informática que es utilizada para recrear la relación de una persona con el mundo físico, en un nuevo plano (Lanier, 1988). Utilizó dicho término para referirse a los "trabajos informáticos" que en esa época se realizaban en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, en la Universidad de Carolina del Norte y en los centros de investigación militares de EUA. Aunque sería el propio Lanier, años más tarde, quien reconocería en una entrevista otorgada a Lynn Hershman, que quizá el concepto de VR no haya

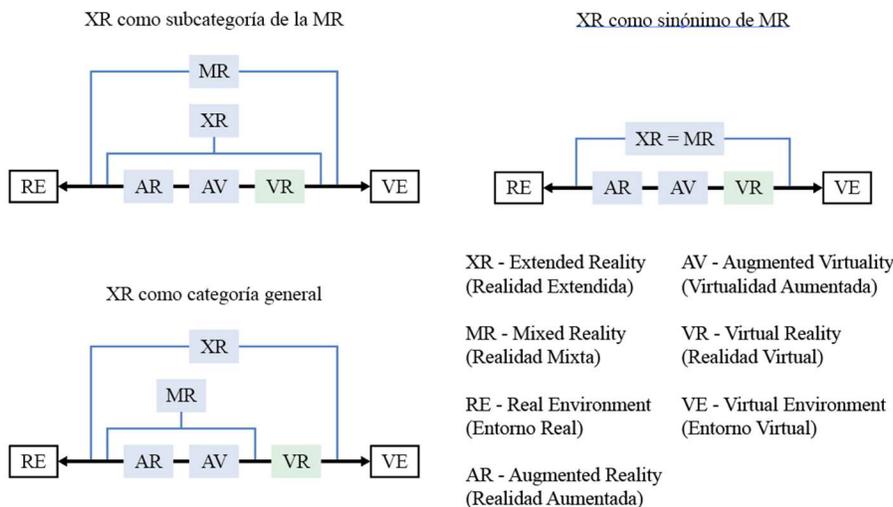


Figura 3. Acepciones de la clasificación general de los distintos tipos de realidad (Elaboración propia).

sido el más adecuado para definir dichas tecnologías. Pero que en su momento, fue el intento de reflejar la pasión que sentían las personas por la tecnología y el deseo de cambiar profundamente las condiciones de la existencia física humana (Leeson, 1998). El concepto *VR* propuesto por Lanier (1988) ha sido abordado y redefinido desde muchas ópticas y disciplinas. Dentro del enfoque de la comunicación se presenta como una definición muy citada, la que sostienen Frank Biocca y Mark R. Levy (1995):

La Realidad Virtual es la vanguardia de la evolución general de las interfaces de comunicación actuales como la televisión, las computadoras y el teléfono hacia el surgimiento de un metamedio. La Realidad Virtual, forma de este metamedio emergente, es como un traje de buceo con el que uno puede sumergirse y explorar el océano electrónico [...] la Realidad Virtual no es la tecnología; es el destino. El objetivo final del diseño de la interfaz de Realidad Virtual es nada menos que la inmersión total de los canales sensomotores humanos en una vívida experiencia generada por computadora. En el sistema ideal, el cuerpo está envuelto en comunicación y late con información. Los medios siempre han sido entornos, tanto la radio como la televisión dominan las salas en las que se encuentran utilizadas y las mentes que los utilizan. Pero el entorno de realidad virtual envuelve los sentidos. El optimista diría que la Realidad Virtual abraza los sentidos; el pesimista diría que los secuestra.

Una definición más reciente y concreta dentro de la misma disciplina, es la que proponen Steve Mann, Tomas A. Furness, Yu Yuan, Jay Iorio, y Zixin Wang (2018), quienes mencionan que “La Realidad Virtual es una simulación, de experiencia realista, generada por computadora. Normalmente, la Realidad Virtual bloquea el mundo real y lo reemplaza por un mundo virtual”.

En materia de ingeniería y sistemas computacionales, Leif P. Berg y Judy M. Vance (2017) plantean la siguiente definición:

Un conjunto de tecnologías que permiten a las personas experimentar de forma inmersiva un mundo más allá de la realidad [...] Las tecnologías de visualización [de Realidad Virtual] vienen en una variedad de modalidades y tamaños, cada uno con el objetivo de entregar información a nuestros sentidos, en particular la vista, el oído y el tacto. Mientras que el olfato y el gusto han recibido comprensiblemente menos atención [...] En esencia, la Realidad Virtual es una experiencia humana [...] La tecnología [de Realidad Virtual] está diseñada expresamente para aprovechar el sistema de procesamiento de información humana, para imitar cómo interpretamos el mundo que nos rodea [...] [la Realidad Virtual] suplanta la información de la realidad con la del mundo virtual [...] son nuestras mentes las que ponen las piezas juntas para formar la experiencia.

En materia de arquitectura, De Freitas y Ruschel (2013), quienes revisaron y agruparon doscientos artículos sobre VR y AR aplicada a la arquitectura en áreas de investigación y etapas de desarrollo tecnológico, adoptan la definición de Burdea y Coiffet (2003), la cual señala que es “Una tecnología que agrega las dimensiones de inmersión e interactividad a modelos tridimensionales generados por computadora que permiten una «exploración» que no es posible con las formas tradicionales de representación”.

Como se observa, es difícil categorizar y definir la VR; no obstante, existen ciertas coincidencias que permiten describirla como un metamedio con el que las personas pueden experimentar sensorialmente un fenómeno. Lo hacen a través de dispositivos electrónicos diseñados expresamente para aprovechar el sistema de procesamiento de información humana y su propósito es imitar la manera en la que se interpreta el mundo. Se trata de un tipo de “realidad perceptiva” en donde lo más importante es la experiencia que dicho metamedio genera en las personas. Así, es importante resaltar las características de la VR.

Características de la Realidad Virtual (VR)

Burdea y Coiffet (2003) argumentan que la VR puede determinarse por su función, para lo cual proponen las tres “i”: inmersión, interacción e imaginación. Plantean que un sistema de VR es una interfaz que implica simulación en tiempo real e interacciones mediante múltiples canales sensoriales, tales como la vista, el oído, el tacto, el olfato y el gusto. Por lo tanto, la VR implica los conceptos de interactividad e inmersión, pero también conlleva mucho de la imaginación del operador (Burdea & Coiffet, 1993). De esta forma, se detallan estos conceptos.

- **Inmersión.** Es la sensación de presencia en lo real o lo virtual. En esta última, la sensación de presencia se logra estimulando los sentidos humanos mediante dispositivos electrónicos.
- **Interacción.** Es la influencia recíproca entre dos entes. En la VR, hace referencia a la interacción persona-ordenador, entre los usuarios y los sistemas informáticos.

- **Imaginación.** En la VR puede verse como el pensamiento que permite utilizar los componentes de un sistema informático para ejecutar un objetivo particular.

A su vez, los sistemas de VR se pueden clasificar en tres categorías según el grado de inmersión y el tipo de interfaz que utilizan. Dichos sistemas se dividen en no inmersivos, semi-inmersivos e inmersivos (Bamodu & Ye, 2013), como se describe a continuación y se muestra en la Figura 4.

- **Sistemas de VR no inmersivos.** También llamados sistemas de VR de escritorio, permiten a los usuarios interactuar con entornos 3D a través de dispositivos de menor costo, facilidad de uso y facilidad de instalación, como computadoras de escritorio, tabletas y teléfonos inteligentes. Autores como Bolter y Grusin (1996), mencionan que este tipo de sistemas le permiten al usuario tener una presencia real y un grado de control del mundo mucho mayor que otro tipo de sistemas.
- **Sistemas de VR semi-inmersivos.** También llamados sistemas híbridos, proporcionan un alto nivel de inmersión, pero mantienen la simplicidad de la VR de escritorio, permitiéndole a los usuarios tener cierto grado de control sobre los objetos físicos del mundo real. Un ejemplo de este tipo de sistema es el CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*), ambiente en el que el usuario está rodeado de pantallas que proyectan el mundo virtual.
- **Sistemas de VR inmersivos.** Presentan el grado de inmersión más alto, lo que permite al usuario tener la sensación de estar en el entorno virtual. También son los sistemas que utilizan los dispositivos más caros del mercado, así como el mayor número de periféricos para lograr la inmersión total del usuario. Los dispositivos más utilizados en este tipo de sistemas son gafas, cascos, guantes, caminadoras y trajes de VR.

Como se aprecia en la Figura 4, los sistemas de VR logran que los usuarios vivan experiencias distintas de acuerdo al tipo de sistema empleado. Y aunque todo parece benéfico, también hay algunas desventajas que deben señalarse.



Figura 4. Sistemas de Realidad Virtual según su grado de inmersión (Elaboración propia).

Ventajas y desventajas de la VR

En su revisión, Schnabel, Wang y Kvan (2010), explican que los entornos virtuales son utilizados en diseño porque han permitido expresar y explorar la imaginación con mayor facilidad. Mientras que Burdea y Coiffet (2003), mencionan que las dimensiones de inmersión e interactividad de la VR, permiten enriquecer mucho más las formas de representación que como se haría con las herramientas tradicionales. En ese sentido, es evidente que las tecnologías de VR presentan ventajas e inconvenientes tecnológicos que aún no se han podido resolver. Se enlistan a continuación ambas partes.

a) Ventajas

- **Actualización e imagen.** Estar actualizado en cuanto al uso de las tecnologías, como es el caso de la VR, permite resolver, realizar y presentar proyectos de una forma enriquecida tanto técnica como estéticamente.
- **Experiencia multisensorial.** Vinculado al punto anterior, la VR estimula diferentes sentidos (vista, oído e incluso tacto) despertando una sensibilidad diferente de quien la experimenta. Cabe señalar que la VR permite controlar y manipular el entorno y los objetos de una manera que en la realidad no sería posible (experiencia individual controlada).
- **Comprensión de espacios y contenidos.** La VR permite generar espacios controlados en los que el arquitecto y diseñador pueden moverse con total libertad, permitiéndoles probar diseños hipotéticos. Con relación a esto, el informe de Mavridou, Hoelscher y Kalff (2009), permite ver con mayor claridad cómo las propiedades geométricas y topológicas del espacio, afectan el flujo y movimiento de las personas. Lo anterior, tanto en interiores (como puede ser una casa o un edificio) como en exteriores (por ejemplo, las ciudades), teniendo implicaciones en las decisiones de diseño. Otros estudios de caso como los que realizaron Fast-Berglund, Gong, y Li (2018), demuestran que la VR mejora no solo la presentación, sino también la comprensión de contenidos por parte de los usuarios.
- **Anticipación y detección de anomalías.** Esto se traduce en una mejor planeación de diseño, reduciendo y eliminando riesgos. Por tanto, facilita el ahorro y aprovechamiento de los recursos humanos, materiales y financieros.
- **Elimina los límites espacio-temporales.** Al respecto, Royo (2004) presenta algunas características espacio-temporales que se pueden encontrar en la VR y que suponen una ventaja respecto a las herramientas de diseño tradicional. Lo multicrónico, que hace referencia a la capacidad de poder reutilizar recursos de proyectos generados y almacenados en el pasado. La reversibilidad, que es la facilidad con la que se pueden “volver pasos hacia atrás”, ya sea corrigiendo un modelo o encausando de otra forma un proyecto. La globalidad, hace referencia a que en el espacio virtual no existe la territorialidad, sino más bien una serie de redes interconectadas (gracias a internet) que permite a las personas trabajar en conjunto y presentar sus proyectos (metaversos) a cualquier hora y desde cualquier punto geográfico del planeta.

- **Colaboración.** La VR puede ser utilizada para mejorar el trabajo entre las personas que participan en el desarrollo de un proyecto. En cuanto a esto, Dorta, Lesage y Pérez (2011), explican que los metaversos pueden compensar la ausencia de un espacio de ideación, ya sea de manera local o remota. En este sentido, cabe mencionar que los metaversos son entornos virtuales tridimensionales en donde las personas pueden interactuar sin tener las limitaciones físicas propias del entorno real.

b) Desventajas

- **Aparición de náuseas, mareos y fatiga en los usuarios como respuesta fisiológica a estímulos inusuales.** Los espacios y objetos presentados en la VR pueden tener atributos a los que no estamos acostumbrados en el entorno real, causando malestar en el usuario. Por este motivo, los manuales de gafas de VR recomiendan un tiempo de uso gradual; además, las aplicaciones tienen distintos tipos de intensidad para usuarios principiantes, medios y expertos.
- **Problemas técnicos asociados a los dispositivos empleados.** La VR, al igual que muchas otras tecnologías, se ve condicionada por los dispositivos eléctricos necesarios para su funcionamiento.
- Existe la posibilidad de que se tengan problemas de ergonomía y comodidad en el uso de los dispositivos de VR a causa de la necesidad de espacio, tanto para el movimiento del usuario como para la detección de los sensores.
- **Potenciales problemas de visualización.** El usuario puede presentar duplicación de las imágenes producida por dos fenómenos que también se pueden dar en la VR. Asimismo, es posible que también se vean afectados por el emborronamiento de imágenes (desenfoque de movimiento) y por la estroboscopia (percepción de múltiples copias de una imagen al mismo tiempo). Otro problema de visualización es el llamado “efecto de puerta de pantalla”, que ocurre en algunos dispositivos de VR, en donde parece que el mundo virtual se ve a través de una malla.
- **Reducción del campo de visión.** Para acceder a la VR se necesita un mediador, generalmente un dispositivo electrónico, que limita el campo de visión.
- **Costos.** La VR requiere una inversión inicial que depende en gran medida del grado de inmersión. La forma más básica de iniciar una experiencia VR es por medio de dispositivos móviles como teléfonos inteligentes y tabletas, mientras que tener una experiencia semi-inmersiva, requiere hacer uso de dispositivos más costosos como computadoras y gafas de VR. Finalmente, tener una experiencia inmersiva total requiere hacer uso de dispositivos periféricos especializados de última generación como guantes, caminadoras y trajes de VR. No obstante, como menciona Sidani (2021), la VR ha mostrado desarrollos alentadores a medida que los precios de las tecnologías se vuelven cada vez más accesibles para el consumidor general y aumenta la potencia computacional.

Como se ha podido apreciar, las definiciones de VR son variadas. Más aún, aunque tiene aspectos positivos, también hay otros puntos por mejorar. Teniendo ahora la visión de las dos caras de la moneda, en la siguiente sección se propone el uso de la VR en la práctica de la arquitectura sostenible.

La RV y la metodología BIM como prácticas de una arquitectura sostenible

La arquitectura evoluciona continuamente de la mano de la innovación y la digitalización de procesos. En la última década, los desarrollos del software de diseño asistido por computadora (CAD) y del Modelado de Información de Construcción (*Building Information Modeling - BIM*), han permitido generar y gestionar los datos para poner en marcha las diferentes etapas del ciclo de vida de los proyectos de construcción. Concretamente, en lo que se refiere al concepto de BIM, Penttilä (2006) lo define como “un conjunto de políticas, procesos y tecnologías interrelacionados que generan un enfoque sistemático a la gestión de la información crítica para el diseño y proyecto de edificios”.



Mientras que el Comité de Proyecto Estándar del Modelo de Información de Construcción Nacional de EUA (NIBS, 2022) plantea lo siguiente: “BIM es un recurso de conocimiento compartido para obtener información sobre una instalación, formando una base confiable para las decisiones durante su ciclo de vida, definido desde la primera concepción hasta la demolición”.

Más aún, Ding, Zhou y Akinci (2014) mencionan:

BIM se puede describir como un proceso que expande datos en un modelo 3D de información nD, que permite dinámica y virtualmente realizar un análisis de programación, costos, estabilidad, sustentabilidad, mantenibilidad, simulación de evacuación y seguridad, solo por nombrar algunos [...] Este modelo nD proporciona una base de datos que le permite a las partes interesadas recuperar la información necesaria a través del mismo sistema, lo que les permite trabajar de manera coherente y eficiente durante el ciclo de vida completo del proyecto.

BIM supone una colaboración multiprofesional en la que varias áreas del conocimiento comparten los mismos conjuntos de datos; opera en una plataforma unificada para mejorar y agilizar el proceso de construcción; permite que la información multidisciplinaria se superponga dentro de un modelo 3D; asimismo, se puede vincular con la *VR* para añadir más capas de interactividad e inmersión a los proyectos de construcción. Dicha vinculación permite suponer que los análisis de desempeño ambiental se pueden realizar de una manera más precisa y eficiente. En la Figura 5 se presenta un ejemplo de render 3D visualizado a través de *VR*.

Para determinar la relación que existe entre los conceptos hasta ahora estudiados, es necesario realizar un análisis bibliométrico. El resultado esperado es un mapa en el que se muestran las interacciones entre ellos. Sidani (2021) llevó a cabo el ejercicio con 2 950 artículos, mediante las pautas de notificación preferida de elementos para revisiones sistemáticas y metaanálisis (PRISMA). El primer paso que siguió fue identificar ciertas palabras clave en los títulos de los artículos, tales como *VR*, *XR* y *Arquitectura*. Las bases de datos consultadas incluían: *Academic Search Complete*, *Web of Science*, *OCS PUS*, *INSPEC*, *Science Direct*, *Emerald*, *Taylor y Francis*, *Cambridge*, *Oxford*, *SAGE*, *SciELO*, *Springer Link*, *Wiley*, *ACM*, *ASME*, *ASCE*, *IEEE*, *PIO* y *SIAM*. Como resultado del análisis, se identificaron seis campos de acción en los que se puede relacionar la *VR* y la arquitectura. Estos son:

- **Colaboración:** centrado en el trabajo en equipo, principalmente en la mejora de la comunicación y la interacción entre los individuos.
- **Diseño de la construcción:** orientado en mejorar la etapa de diseño de un proyecto de construcción.
- **Gestión de construcción:** enfocado en mejorar la gestión de un proyecto de construcción a lo largo de las etapas de diseño y construcción.
- **Educación:** centrado en mejorar el conocimiento de cualquier entidad relacionada con la construcción (obreros, ingenieros, arquitectos, etc.) y/o estudiantes.
- **Seguridad en la construcción:** orientado en mejorar la seguridad del sitio de construcción mediante la concientización.



Figura 5. Render de modelo 3D para *VR* desarrollado con ayuda del software Enscape. Adaptado de Enscape: Virtual Reality, 2022 (<https://enscape3d.com/features/>)

- **Gestión de instalaciones:** enfocado en mejorar la gestión de una instalación en su etapa de operación.

En la investigación de Sidani (2021), el campo que más aparece es el que está relacionado con la colaboración, quizá porque uno de los principales objetivos de la VR es mejorar la interacción humano-humano entre usuarios ubicados de forma remota. Tanto el diseño como la gestión de la construcción, ocupan el segundo lugar con las mismas ocurrencias cada uno. En tercer lugar, queda el campo de educación seguido por el de seguridad, mientras que al final de la lista se encuentra el campo de gestión de instalaciones.

Planteados los campos de acción en los que se puede relacionar la VR y la arquitectura, se explican a continuación las dimensiones de la metodología BIM, para establecer las coincidencias entre ambas partes.

Dimensiones de la metodología BIM

La metodología BIM se ha ido perfeccionando gradualmente, pasando de modelos tridimensionales (3D) a modelos multidimensionales (nD). La primera dimensión (1D) y punto inicial es la idea o concepto del que parte un proyecto de construcción, e incluye la investigación previa para definir las condiciones iniciales, la etapa de diseño y las primeras estimaciones de superficie, volumetría y costos. En materia sustentable, Wong y Zhou (2015) proponen planificar esta etapa considerando los siguientes puntos:

- Evaluar la orientación para reducir los costos de energía.
- Analizar la masa de la construcción para optimizar la envolvente.
- Realizar análisis de iluminación natural.
- Investigar el potencial de captación de agua para reducir la necesidad de su uso.
- Modelar el rendimiento energético de los edificios para reducir las necesidades energéticas o analizar las opciones de energía renovable que puedan reducir los costos.
- Examinar la idoneidad de los materiales sostenibles.
- Diseñar el sitio y la gestión logística para minimizar los residuos y la huella de carbono.

En lo que se refiere a la dimensión 2D, se trata de la representación bidimensional del proyecto en un plano vectorial. Para ello se definen el software CAD, el software de modelado, los materiales, las cargas estructurales, las energéticas y se establecen las bases del plan de desarrollo sostenible. La investigación de Sidani (2021) reveló que *Autodesk Revit* es el software de modelado BIM más utilizado vinculado con la VR, mientras que *Unity* es el software de VR que se aplica con mayor frecuencia en los proyectos BIM. También destaca *Enscape* como software de VR y la capacidad de renderizado de *Unreal Engine* para simular la interacción de la luz con los materiales.

La tarea de lograr procesos de construcción más limpios y bajos en carbono, así como de lugares de trabajo más ecológicos, se ha convertido en una preocupación importante en el sector de la construcción. De esta manera, se ha planteado la necesidad de mecanismos más efectivos y de bajo costo para desarrollar las dimensiones durante todo el ciclo de vida del proyecto. Así, en la tercera dimensión, se trata de integrar en un modelo de 3D tanto los detalles de instalaciones, de eficiencia energética, de mantenimiento, de administración y de materiales, como los aspectos técnicos, estructurales, económicos, comerciales y fases de ejecución. El propósito es reducir los rediseños, el procesamiento, las revisiones y los cambios en el proyecto de construcción (Ding, Zhou, & Akinci, 2014).

Pero el modelado no termina aquí. La mayoría de los académicos y profesionales coinciden en que la dimensión 4D está relacionada con el tiempo y las dinámicas de ejecución del proyecto (Charef, Alaka, & Emmitt, 2018). El punto clave es mitigar los riesgos verificando los conflictos del flujo de trabajo, las tareas asignadas a cada dependencia y la optimización de la logística de construcción. Desde la perspectiva ambiental, la 4D en el estudio de Jupp (2017), incluye las siguientes etapas del proceso constructivo: planeación, programación y control. Adicionalmente, considera la gestión de la seguridad *in situ* y la gestión medioambiental. Guerra (2020) amplía aún más la 4D en materia de sustentabilidad para enfatizar el manejo de residuos de construcción, desde su recuperación, pasando por su reciclaje y llegando hasta su reutilización. Con estas ideas en mente, se explica la quinta dimensión (5D) referente a la sostenibilidad del proyecto, haciendo hincapié en un movimiento integral conocido como *green BIM*.

Green BIM y la quinta dimensión BIM

Ha sido tan grande la preocupación por minimizar el impacto ambiental de los proyectos arquitectónicos, que han surgido movimientos como el *green BIM*, el cual intenta implementar una visión sostenible en todas las etapas del ciclo de vida de un proyecto, principalmente en lo que se refiere a:

- Procesos de consumo de energía y de carbono.
- Extracción de materias primas.
- Fabricación de materiales de construcción.
- Montaje de materiales *in situ*.
- Ocupación o uso.
- Reparación y mantenimiento.
- Demolición.
- Deconstrucción.
- Eliminación o reutilización de los materiales.

Algunos expertos coinciden en incluir una visión *green* en la quinta dimensión *BIM* (Yung, Wang, Wang, & Jin, 2014). A pesar de que todavía se discute lo que implica realmente el “*BIM verde*” o *green BIM*, Wu e Issa (2015) señalan:

Green BIM es la sinergia de *BIM* y la construcción ecológica, que se utiliza para mejorar los resultados sostenibles de un proyecto arquitectónico durante todo el ciclo de vida, incluidas las etapas de operación (puesta en marcha y ocupación), reparación, mantenimiento y demolición, haciendo especial hincapié a la aplicación de la eficiencia energética durante dicho ciclo de vida.

Además, dejan entrever que el *green BIM* es un sistema sociotécnico de múltiples capas debido a que contiene un núcleo técnico y una parte social que combina la tecnología hecha por el hombre y las consecuencias sociales e institucionales de su implementación.

Es indudable que el concepto de sostenibilidad y muchos otros relacionados como el *green BIM*, han transformado la forma en que se realizan los proyectos arquitectónicos, implicando el uso cada vez más frecuente de *software* de diseño asistido por computadora (*CAD*) y de modelados de información de construcción (*BIM*) para lograr sus objetivos ecológicos.

Pero también, ha explorado nuevos *softwares* y tecnologías que no son frecuentemente utilizadas por la arquitectura (como es el caso de la *VR*).

Habiendo discutido el *green BIM* y la quinta dimensión *BIM*, en los siguientes párrafos se plantea cómo se relaciona la *VR* con la metodología *BIM* desde una perspectiva sostenible.

Relación entre el green BIM y la VR

Tanto el *green BIM* como la *VR* tienen como núcleo técnico el *software*. En el caso del *green BIM*, el *software* permite insertar datos e información adicional de sostenibilidad en el modelo 3D. Mientras que en el caso de la *VR*, el *software* contribuye a la visualización de dicho modelo mejorando la planeación del proyecto y la toma de decisiones. Otra característica que relaciona al *green BIM* con la *VR*, es que el primero integra la tecnología digital de vanguardia para aportar datos al modelado 3D. En ese sentido, la *VR* es considerada una tecnología de la industria 4.0 y 5.0 que se busca incorporar en los procesos de producción de diversos sectores de desarrollo humano.

Si bien la *VR* en su integración con el *green BIM* puede convertirse en una herramienta muy útil en la toma de decisiones de sostenibilidad de un proyecto de construcción, lo cierto es que la tasa de adopción de *green BIM* es aún muy baja. Más aún en su relación con la *VR*, por lo que el potencial de ambas herramientas combinadas todavía no se ha explorado ampliamente.

Con base en lo que hasta el momento se ha expuesto en este artículo, se pueden llegar a establecer cuáles son las áreas de oportunidad en los que la *VR* puede ser aplicada a los proyectos *green BIM*, para lo cual se toman como referencia los seis campos de acción propuestos por Sidani (2021), así como las ventajas de la *VR* y las dimensiones de la metodología *BIM* mencionadas en apartados anteriores. Así, se propone lo siguiente:

- **Colaboración.** Centrado en acompañar todas las dimensiones de un proyecto arquitectónico desarrollado con la metodología *BIM* (de 1D a nD). Dentro de las ventajas de la *VR* se expone que puede ayudar a mejorar el trabajo en equipo en lo que respecta a la comunicación, la interacción entre los profesionistas e individuos involucrados en el proyecto, pero, sobre

todo, a mejorar la toma de decisiones en las etapas de construcción. Al respecto, se puede mencionar que la *VR* en conexión con internet permite generar metaversos que pueden sustituir o compensar la ausencia de un espacio de trabajo, ya sea de manera local o remota (Dorta, Lesage, Pérez, & Bastien, 2011).

- **Diseño de la construcción.** Abarca las dimensiones 1D a 3D dentro de la metodología *BIM*. En esta etapa la *VR* permite generar espacios controlados en los que el arquitecto y diseñador pueden probar diseños hipotéticos y desarrollar sus proyectos con total libertad. Dentro de las ventajas de la *VR* se habla de reversibilidad, que es la facilidad con la que se pueden “volver pasos hacia atrás”, ya sea corrigiendo un modelo o encausando de otra forma un proyecto. En materia sustentable, esto se traduce en una mejor planeación y un ahorro de recursos a la hora de hacer las revisiones, los rediseños, el procesamiento y los cambios del proyecto. Un simple clic permite realizar modificaciones oportunas como el color de las paredes, el material de los suelos, o incluso los tipos de mobiliario sin tener que generar gasto alguno.
- **Gestión de la construcción.** Está relacionada con la dimensión 4D y 5D de la metodología *BIM* que se refiere al tiempo y las dinámicas de ejecución del proyecto arquitectónico. Al respecto, se puede decir que los entornos de *VR*, al no tener las limitaciones físicas propias de la realidad, ayudan a optimizar los procesos y tiempos de trabajo aumentando y mejorando la productividad. La investigación de Sidani (2021) concluyó que la *VR* desarrolla mecanismos de bajo costo para mejorar la gestión de un proyecto de construcción. Dentro de las ventajas de la *VR*, está su capacidad para anticipar y detectar anomalías en el desarrollo de los proyectos, lo que se traduce en una mejor planeación del diseño, la reducción y eliminación de riesgos, así como el ahorro y aprovechamiento de los recursos humanos, materiales y financieros. En un mundo cada vez más competitivo y respetuoso del medio ambiente, el proceso de diseño va encontrando en las

nuevas tecnologías una forma para ahorrar recursos y costos materiales.

- **Educación.** Es el campo enfocado a mejorar el conocimiento de cualquier individuo relacionado con la construcción (obreros, ingenieros, arquitectos, etc.) y/o estudiantes. Al respecto, Fast-Berglund, Gong y Li (2018) muestran que la *VR* mejora la comprensión de la información y los contenidos al presentarlos de una forma “enriquecida”, tanto técnica como estéticamente. Esto aplica para la capacitación y la presentación de un proyecto al cliente. Dentro de las ventajas de la *VR* se menciona la importancia de mantenerse actualizado, ya que esto implica tener herramientas nuevas para resolver, realizar y presentar proyectos.
- **Seguridad en la construcción.** Está relacionada con la tercera dimensión del modelo *BIM* en donde se planean los aspectos técnicos. La *VR* aplicada a los modelos *BIM* permite presentar proyectos que pueden ser recorridos por los arquitectos e ingenieros, aún sin estar construidos, lo que les permite anticiparse y detectar anomalías de construcción para realizar un mejor diseño que reduzca y elimine riesgos. En *green BIM*, arquitectos y planificadores se enfocan cada vez más en las formas de minimizar, tanto el consumo de energía de los edificios como las emisiones de carbono a través de un mejor diseño.
- **Gestión de instalaciones.** La *VR* mejora la gestión de una instalación en su etapa de operación, ya que permite ver con mayor claridad las propiedades geométricas y topológicas del espacio que afectan el flujo y movimiento de las personas, tanto en interiores (casa o edificio) como en exteriores (ciudades). En esta etapa, en materia sostenible, se destaca la importancia de reducir la ocurrencia de emergencias en las operaciones de la edificación, mejorando el desempeño de seguridad y reduciendo el desperdicio de recursos. También se hace hincapié en la importancia de reducir las operaciones de reparación y mantenimiento de una edificación.



En la Tabla 1 se resumen los puntos hasta ahora abordados. Como se observa, para cada campo de acción analizado, el *BIM* ofrece un punto de partida sólido. En lo que se refiere al *green BIM*, complementa de forma adecuada a la metodología *BIM*. Pero la *VR*

mejora significativamente la información y experiencia que este tipo de herramientas puede brindar a la arquitectura sostenible.

Tabla 1
Comparación de los campos de acción de BIM, green BIM y VR. (Elaboración propia).

Campo de Acción	BIM	Green BIM	VR
Colaboración	Contempla todas las dimensiones del proyecto (1D a nD)	Está relacionado con las prácticas ambientalmente sostenibles como la reducción de consumo de energía y la huella de carbono en el espacio de trabajo.	Mejora la comunicación, la interacción entre profesionales y la toma de decisiones. Sustituye o compensa la ausencia de un espacio de trabajo lo que permite generar un ahorro de recursos.
Diseño de la construcción	Se extiende de la 1D a la 3D en donde se plantean las condiciones iniciales del proyecto, el diseño y las estimaciones de superficie, volumetría y costos.	Es útil para los procesos de consumo de energía y de carbono, extracción de materias primas, fabricación de materiales de construcción, montaje de materiales <i>in situ</i> , ocupación o uso, reparación y mantenimiento, demolición, deconstrucción, eliminación o reutilización de los materiales.	Permite desarrollar diseños hipotéticos con total libertad. Mejora la planeación del proyecto gracias a su capacidad de reversibilidad para modificar y corregir fácilmente un modelo.
Gestión de la construcción	Está relacionado con las dimensiones 4D y 5D que incluyen el tiempo y las dinámicas de ejecución.	Principalmente considera la planeación, programación y control. Adicionalmente, toma en cuenta la gestión de la seguridad <i>in situ</i> y la gestión medioambiental, enfatizando el manejo de residuos de construcción, desde su recuperación pasando por su reciclaje y llegando hasta su reutilización.	Los espacios virtuales no tienen limitaciones físicas o geográficas, lo que permite optimizar los procesos y tiempos de trabajo, aumentando y mejorando la productividad. Mejora la planeación en la etapa de diseño y permite reducir y mitigar los riesgos en el proceso de construcción. También facilita el ahorro y el aprovechamiento de los recursos.
Educación	No es aplicable a una dimensión en particular.	Está asociado con los conocimientos que tienen los agentes participantes (obreros, ingenieros, arquitectos, etc.) relacionados con	Mejora la comprensión de la información y los contenidos en materia de capacita-

		la implementación de la sostenibilidad en un proyecto arquitectónico.	ción o de presentación de un proyecto al cliente.
Seguridad en la construcción	Contempla la 3D del modelo <i>BIM</i> en donde se planean los aspectos técnicos del proyecto.	Se centra en minimizar tanto el consumo de energía de los edificios, como las emisiones de carbono a través de un mejor diseño.	Permite presentar proyectos que pueden ser recorridos aún sin estar construidos para anticiparse y detectar anomalías de construcción, reduciendo y mitigando riesgos.
Gestión de instalaciones	Relacionado con la 5D, 6D y 7D que no se incluyen porque no están consensuadas de manera general.	Reduce la ocurrencia de emergencias en las operaciones de la edificación. Mejora el desempeño de seguridad. Disminuye el desperdicio de recursos. También hace hincapié en la importancia de minimizar las operaciones de reparación y mantenimiento de una edificación.	Facilita la visualización de las propiedades geométricas y topológicas del espacio que afectan el flujo y movimiento de las personas, tanto en interiores como en exteriores, lo que permite reducir las reparaciones y el mantenimiento de una edificación.

Antes de presentar un caso de estudio sobre los conceptos analizados, se debe mencionar que las tendencias de la *VR* indican que próximamente se hablará de la 6D y 7D. Mientras esa discusión científica se lleva a cabo, se describe a continuación la aplicación práctica de la *VR* conocida hasta ahora en China.

Caso de estudio

Para ilustrar los conceptos hasta aquí presentados, enseguida se describe un ejemplo de aplicación en la práctica desarrollado por el despacho de arquitectura *Zaha Hadid Architects (ZHA)*. Se trata de un complejo cívico conocido como *Unicorn Island* desarrollado en la Nueva Área de Tianfu, al sur de la ciudad de

Chengdu, China. El plan maestro de 67 hectáreas de uso mixto, dará servicio a 70 000 residentes y trabajadores. Así, se convertirá en una importante fábrica de chips de computadora para el mundo, además de otras herramientas de hardware y computación móvil. En la Figura 6 se muestra el modelo 3D del proyecto.

El diseño del complejo se presenta como una prueba del potencial que tiene la *VR* como herramienta para el diseño, pues las posibilidades tecnológicas que ofrece permitieron a los arquitectos colaborar en tiempo real para incorporar al diseño sistemas de conservación y gestión de agua natural, parques que incluyen espacios cívicos verdes con zonas de cultivo para proporcionar a sus habitantes alimentos cosechados *in situ*, así como una mayor conectividad



Figura 6. Render No. 1 del modelo 3D del proyecto Unicorn Island. Imagen extraída de la página oficial del sitio web de Zaha Hadid Architects, 2022 (<https://www.zaha-hadid.com/architecture/unicorn-island-masterplan>).



Figura 7. Render No. 2 del modelo 3D del proyecto Unicorn Island. Imagen extraída de la página oficial del sitio web de Zaha Hadid Architects, 2022 (<https://www.zaha-hadid.com/architecture/unicorn-island-masterplan>).

para crear entornos de vida y de trabajo que mejoran el bienestar de las personas. Además, la configuración radial del complejo en VR permitió tener una mejor comprensión del entorno y en consecuencia lograr una mejor planeación en los recorridos peatonales y ciclistas. También optimizar los espacios a la hora de construir. En el caso de *Unicorn Island*, los edificios se agrupan en torno a una plaza central y una estación de metro. En la Figura 7 se muestra otra perspectiva del proyecto donde se aprecia la interacción entre el agua, la vegetación y los edificios.

ZHA es un despacho que impulsa el uso de las tecnologías inmersivas para desarrollar soluciones de diseño especializadas. Con ayuda de su estudio *Group Virtual Reality Zaha Hadid (ZH VR Group)* ha podido dar forma a la tecnología de VR inmersiva, incluido el modelado 3D en tiempo real con enfoque en su aplicación como herramienta de diseño sustentable, además de aprovechar el potencial de la VR y el valor intrínseco de sus medios para desarrollar formas novedosas de diseño, así como experiencias y presentaciones para proyectos de construcción.

El complejo *Unicorn Island*, como muchos otros proyectos, deja claro que la VR es un ingrediente vital tanto en la colaboración como en el diseño y la gestión de la construcción. La participación de distintos profesionales de manera simultánea y en tiempo real, permite llegar a resultados satisfactorios tanto para el cliente como para el constructor. Es así como muchos de los conceptos teóricos se pueden desarrollar en la práctica cotidiana de la ingeniería, de la arquitectura y de la construcción.

Otros despachos de arquitectura famosos, al igual que ZHA, han trabajado con los principales desarrolladores de hardware y software para habilitar las aplicaciones de la tecnología de VR emergente en la arquitectura. Ejemplos de ello son *Foster + Partners*, *Bjarke Ingels Group (BIG)* y *HOK*, entre otros. En la Figura 8 se aprecia cómo algunos usuarios pueden observar virtualmente un edificio *in situ* que todavía no ha sido construido. Se espera que este sea el común denominador de los proyectos arquitectónicos más importantes a lo largo y ancho del mundo.

Se puede adelantar que el futuro de la VR tiene un gran potencial. Las aplicaciones pueden ir desde el entretenimiento en un centro de diversiones, hasta la simulación de operaciones en los quirófanos de un hospital. Habiendo presentado estos ejemplos de aplicación, se procede ahora al establecimiento de las principales conclusiones de la investigación.

Conclusiones

La revisión de la literatura sugiere que no existe un consenso claro sobre cómo clasificar los medios relacionados con los objetos y espacios virtuales en tres dimensiones. Se proponen los conceptos de XR y MR como categorías generales; sin embargo, existe cierta confusión en la manera en que se utilizan, lo que ha generado acepciones distintas en cuanto a su nivel jerárquico. De igual manera, el concepto de VR no es general y es planteado desde diferentes ópticas y disciplinas, haciendo difícil la noción de lo que implica y sus posibles alcances en la arquitectura.



Figura 8. Vista en tiempo real de un proyecto arquitectónico in situ mediante gafas de VR, realizado por el despacho de arquitectura Foster + Partners. Imagen extraída del canal oficial de Unreal Engine en YouTube, 2022 (<https://www.youtube.com/watch?v=YohEKgaQWGI>).

Todos los “tipos” de realidad (*XR*, *MR*, *AR*, *AV*, *VR*) están relacionados con los objetos y espacios virtuales en tres dimensiones. No obstante, es importante aclarar que cumplen diferentes propósitos y funciones específicas, por lo que no es conveniente hablar de estos “tipos de realidad” de manera generalizada.

La *VR* permite la simulación y busca generar en el usuario una experiencia apegada a la realidad. Existen distintos sistemas de *VR* con diferente grado de inmersión (no inmersivos, semi-inmersivos e inmersivos); esencialmente, utilizan dispositivos tecnológicos específicos de acuerdo a los objetivos que se quieren alcanzar. De hecho, se puede decir que los modelos 3D, que se generan por medio de la metodología *BIM* y que gracias al uso de *software* especializado (como Autodesk Revit) pueden ser presentados en una pantalla “tradicional” de computadora, forman parte de los sistemas de *VR* no inmersivos. En todo caso, es cuestión del arquitecto investigar cómo llevar sus proyectos a distintos niveles de inmersión con el propósito de enriquecerlos.

BIM aún está lejos de ser una metodología totalmente colaborativa e integradora. Por lo tanto, es necesario generar nuevos enfoques de fácil acceso para capitalizar los diferentes perfiles y antecedentes académicos de los interesados en los proyectos de construcción.

La etapa del ciclo de vida en la que se tiene mejor idea de cómo integrar la *VR* en los modelos desarrollados mediante la metodología *BIM* es en la de diseño, ya que permite hacer una planeación temprana de la eficiencia de todo el ciclo de vida del proyecto.

La revisión de la literatura sugiere que la *VR* brinda sus máximos beneficios en las primeras dimensiones del *BIM* convencional por ser las que están mejor definidas. Caso contrario a lo que sucede en las etapas posteriores del ciclo de vida como el mantenimiento o la demolición. En ese sentido, se hace evidente que la *VR* implementada en los modelos *BIM* no está alcanzando todo su potencial. De esta forma, se espera que las investigaciones futuras puedan centrarse en el manejo de los datos proporcionados por *BIM* dentro de las interfaces para saber más específicamente cómo, dónde y cuándo integrar la *VR* en los proyectos arquitectónicos.

Actualmente, la relación de *BIM* y *VR* se centra casi exclusivamente en la visualización de los modelos 3D. Se especula que eso se debe a que no hay un *software* general que permita transmitir los cambios del modelo *BIM* a la *VR* en tiempo real. Por un lado, el *software BIM* proporciona una visualización precisa de la geometría del edificio, aspecto que no permite una visualización de *VR* nativa. Por otro lado, el *software* de *VR* permite visualizar un sistema inmersivo que no posee componentes para acceder a la base de datos e información paramétrica que genera el modelo *BIM*.

La tasa de adopción de la *VR* en los proyectos *BIM*, y más aún *green BIM*, es todavía muy baja. Aunado a esto, no existe una revisión sistemática de los principales esfuerzos y logros de investigación sobre las formas en que la *VR* puede mejorar la sostenibilidad ambiental de los proyectos arquitectónicos. Por ello, es necesario que tanto académicos como profesionales en el área exploren y reporten sus experiencias sobre el tema, ya que eso permitirá que esta interesante

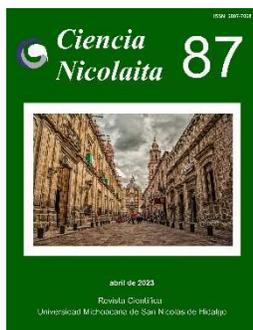


área del conocimiento siga creciendo, evolucione y se consolide como un estándar en la industria de la construcción.

Referencias

- Azuma, R.T., 1997, A survey of augmented reality: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 6(4), 355-385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. and B. MacIntyre, 2001, Recent advances in augmented reality: *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6), 34-47. DOI: 10.1109/38.963459
- Bamodu, O. and Ye, X., 2013, Virtual Reality and Virtual Reality System Components: *Advanced Materials Research*, 765-767, 1169-1172. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.765-767.1169>
- Berg, P. and Vance, J.M., 2017, Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey: *Virtual reality*, 21, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10055-016-0293-9>
- Biocca, F. and Levy, M.R., 1995, Communication in the age of virtual reality: *New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates*.
- Björngvinsson, E., Ehn, P. and Hillgren, P.A., 2010, Participatory design and democratizing innovation: *Proceedings of the 11th Biennial participatory design conference*, 41-50. <https://doi.org/10.1145/1900441.1900448>
- Bolter, J.D. and Grusin, R.A., 1996, Remediation: *Configurations*, 4(3), 311-358. <http://doi.org/10.1353/con.1996.0018>
- Burdea, G.C. and Coiffet, P., 2003, Virtual reality technology: *John Wiley & Sons*.
- Burdea, G. and Coiffet, P., 1993, La réalité virtuelle: *Hermès*.
- Burdea, G., Richard, P. and Coiffet, P., 2003, Multimodal virtual reality: Input-output devices, system integration, and human factors: *International Journal of Human-Computer Interaction*, 8, 5-24. <https://doi.org/10.1080/10447319609526138>
- Caudell, T.P. and Mizell, D.W., 1992, Augmented Reality: An Application of Heads-Up Display Technology to Manual Manufacturing Processes: *Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 659 -669). Boeing Computer Services, Research and Technology.
- Charef, R., Alaka, H. and Emmitt, S., 2018, Beyond the third dimension of BIM: A systematic review of literature and assessment of professional views: *Journal of Building Engineering*, 19, 242-257. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.04.028>
- Ding, L., Zhou, Y. and Akinci, B., 2014, Building Information Modeling (BIM) application framework: The process of expanding from 3D to computable nD: *Automation in construction*, 46, 83-93. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.04.009>
- Dorta, T., Lesage, A., Pérez, E. and Bastien, J.M., 2011, Signs of collaborative ideation and the hybrid ideation space: *In Design Creativity 2010*, 199-206. ISBN 978-0-85729-223-0
- Fast-Berglund, Å., Gong, L. and Li, D., 2018, Testing and validating Extended Reality (xR) technologies in manufacturing: *Procedia Manufacturing*, 25, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.054>
- Freitas, M.R. and Ruschel, R.C., 2013, ¿What is happening to virtual and augmented reality applied to architecture? DOI:10.52842/conf.caadria.2013.407
- Gubern, R., 2007, Del bisonte a la realidad virtual: *Barcelona, Gustavo Gili*.
- Guerra, B.C., Leite, F. and Faust, K.M., 2020, 4D-BIM to enhance construction waste reuse and recycle planning: Case studies on concrete and drywall waste streams: *Waste Management*, 116(1), 79-90. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.07.035
- Jupp, J., 2017, 4D BIM for environmental planning and management: *Procedia engineering*, 180, 190-201. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.178>
- Kerckhove, D. d. (2018). La piel de la cultura, investigando la nueva realidad electrónica: *Barcelona, Gedisa Editorial*.
- Kwok, J., Wongy, W. and Zhou, J., 2015, Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review: *Automation in construction*, 57, 156-165. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.06.003>
- Lanier, J., 1988, "A vintage Virtual Reality interview". <http://www.jaronlanier.com/vrint.html>
- Leeson, L.H., 1998, La irrealidad y el deseo: entrevista con Jaron Lanier, "inventor" de la Realidad Virtual: *El paseante*, (27), 78-81. ISSN 1130-0388
- Mann, S., Furness, T.A., Yuan, Y., Iorio, J. and Wang, Z., 2018, All Reality: Virtual, Augmented, Mixed (X), Mediated (X,Y), and Multimmediated Reality: *arXiv e-prints*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.08386>

- Mavridou, M., Hoelscher, C. and Kalff, C., 2009, The impact of different building height configurations on navigation and wayfinding: *Proceedings of the 7th international space syntax symposium*, 72, 1-11.
- Milgram, P. and Kishino, F., 1994, A taxonomy of Mixed Reality visual displays: *IEICE Transactions on Information and Systems*, E77-D(12), 1321-1329. ISSN impreso: 0916-8532
- Penttilä, H., 2006, Describing the changes in architectural information technology to understand design complexity and free-form architectural expression: *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 11, 395-408.
https://www.itcon.org/papers/2006_29.content.02253.pdf
- Royo, J., 2004, Diseño Digital: *Barcelona, España, Paidós*.
- Schnabel, M.A., Wang, X. and Hartmut Seichter, T.K., 2008, "Touching the untouchables: Virtual, augmented-and reality". file:///C:/Users/Angel/Downloads/2008-TouchingTheUntouchablesVirtual-Augmented-AndReality.pdf
- Schnabel, M.A., Wang, X. and Hartmut Seichter, T.K., 2010, Touching the untouchables: Virtual-, augmented-and reality: *Design Creativity*, 199-206.
https://www.researchgate.net/publication/30874792_Touching_The_Untouchables_Virtual-Augmented-And_Reality
- Shen, Y., Ong, S.K. and Nee, A.Y., 2010, Augmented reality for collaborative product design and development: *Design studies*, 31(2), 118-145.
<https://doi.org/10.1016/j.destud.2009.11.001>
- Sidani, A., Dinis, F.M., Sanhudo, L., Duarte, J., Santos Baptista, J., Pocas Martins, J. and Soeiro, A., 2021, Recent Tools and Techniques of BIM-Based Virtual Reality: A systematic review: *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(2), 449-462. DOI: 10.1007/s11831-019-09386-0
- Sutherland, I., 1965, The Proceedings of the Congress of the International Federation of Information Processing (IFIP): *London, Macmillan and Co*.
- Wong, J.K. and Zhou, J., 2015, Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: *Automation in construction*, 57, 156-165.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.06.003>
- Wu, W. and Issa, R.R., 2015, BIM execution planning in green building projects: *Journal of Management in Engineering*, 31(1). DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000314
- Yung, P., Wang, J., Wang, X. and Jin, M., 2014, A BIM-enabled MEP coordination process for use in China: *Journal of Information Technology in Construction*, 19, 383-398. ISSN: 1874-4753



Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

El vidrio con película óxido conductor transparente y su uso en un espacio habitable

Glass with transparent conductive oxide film and its use in a living space

David Álvarez Rodríguez, Haydee Pérez Castro,* Jorge Flores González y Violeta Escobar Ruíz

Para citar este artículo: Álvarez Rodríguez David, Pérez Castro Haydee, Flores González Jorge y Escobar Ruíz Violeta, 2023. El vidrio con película óxido conductor transparente y su uso en un espacio habitable. Ciencia Nicolaita no. 87, 79-87. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.634>



Historial del artículo:

Recibido: 23 de abril de 2022
Aceptado: 12 de octubre de 2022
Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: dearqayd@gmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

El vidrio con película óxido conductor transparente y su uso en un espacio habitable

Glass with transparent conductive oxide film and its use in a living space

David Álvarez Rodríguez, Haydee Pérez Castro,* Jorge Flores González y Violeta Escobar Ruíz

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, México

Resumen

El presente artículo plantea la evaluación de dos películas de Óxido Conductor Transparente (TCO, por sus siglas en inglés), una a base de estaño y otra de indio, aplicada a los vidrios transparentes de uso común en las edificaciones. La valoración se llevó a cabo mediante modelos a escala: dos que albergaban a los vidrios con película y otro con vidrio transparente sin ningún tratamiento, este último como referente en la evaluación. Los vidrios fueron colocados a manera de ventanas de una habitación y estuvieron expuestos a la radiación solar directa. Se registró la temperatura al interior de los modelos y en el ambiente; aunque la diferencia no resultó significativa, se vislumbra la posibilidad de aplicación en sistemas pasivos que utilizan el sobrecalentamiento de espacios específicos.

Palabras clave: vidrio, película óxido conductor transparente, espacio habitable, indio y estaño

Abstract

This article proposes the evaluation of two Transparent Conductive Oxide (TCO) films applied to transparent glasses commonly used in buildings. One based on tin and the other on indium. The valuation was carried out using scale models, exposed to direct solar radiation, two that housed the glasses with film and another with transparent glass without any treatment, the latter as a reference in the valuation. The glasses were placed as windows in a room. Temperature data were recorded inside the models and in the environment. Although the temperature difference between the different cases was not significant, the possibility of application in passive systems that use the overheating of specific spaces is glimpsed.

Keywords: glass, transparent conductive oxide film, living space, indium and tin



Introducción

Las edificaciones han contado con una amplia gama de materiales aplicados a su envolvente, entiéndase esta como las partes que delimitan un espacio habitable del exterior, con la intención de salvaguardar a los usuarios de las condiciones climáticas como temperatura, lluvia, viento, humedad, etc. (Secretaría de Energía, *et al.*, 2001). Un elemento en particular son los vidrios de la edificación, cuya función es la de proporcionar iluminación natural. Sin embargo, el impacto de la radiación solar directa sobre ellos, provoca condiciones térmicas de calentamiento o sobrecalentamiento en las habitaciones (Restituyo Pérez, 2015), situación que puede ser benéfica o no a los usuarios. Este suceso ha provocado que se hagan adaptaciones a este material para favorecer o contrarrestar dichos efectos.

El estado de Tabasco presenta un clima cálido húmedo, con una temperatura media anual de 27.1 °C, una temperatura máxima promedio de 31.9 °C (Servicio Meteorológico Nacional, s. f.) y una humedad relativa promedio anual de 76% (Climate-data.org, s. f.). Tales condiciones provocan que en la época más cálida del año se presenten problemas de confort térmico en los habitantes. Por otro lado, en las viviendas se emplean vidrios sin tratamiento, lo que afecta la climatización y el confort térmico al interior de las edificaciones. Los efectos colaterales de las altas temperaturas al interior de los espacios generan:

- Requerimientos de altos consumos de energía eléctrica para satisfacer las necesidades de enfriamiento en las localidades de Tabasco, entre las 10:00 y 20:00 horas (Angulo-Córdova, Muñoz-Orozco & Barradas-Miranda, 2004).
- Baja productividad de los usuarios del espacio, cuando la necesidad de enfriamiento no es satisfecha en niveles óptimos (Molina & Veas, 2012).
- Gastos por mantenimiento y renovación de equipos de enfriamiento.

Las ventanas transparentes, que por su orientación quedan expuestas al sol, no proveen aislamiento hacia el interior y los usuarios experimentan una sensación de calor. Es por esta razón que se requieren vidrios

tratados con películas para disminuir el impacto del paso de la radiación solar.

Debido a lo anterior y con el afán de atender el problema del sobrecalentamiento en los espacios, se pretende explorar la aplicación de películas de Óxido Conductor Transparente (TCO) en la búsqueda de reducir los niveles de temperatura al interior de las viviendas. El estudio se enfoca en este tipo de edificación, ya que representa un área prioritaria para el desarrollo nacional (Ley de Vivienda, 2017).

Las películas con las cuales se experimentaron en el presente trabajo, han sido proporcionadas por el Cuerpo Académico “Síntesis y Caracterización de Nuevos Materiales” UJAT-CA-187, quien las tuvo como objeto de estudio en un proyecto anterior. Se trató de un proceso de innovación para la elaboración y aplicación de películas *in situ*, a base de óxido de estaño (SnO₂) en una de ellas y en otra con óxido de indio (ITO).

El vidrio con película TCO, hasta ahora, solo se ha utilizado en la industria de la electrónica, por ejemplo, en la producción de pantallas planas, celdas solares, ventanas inteligentes, hasta sensores para detección de algunos gases (Bedoya Calle, 2015). En el caso de las celdas solares, la aplicación de esta película mejora la producción de energía eléctrica, al optimizar el transporte de los electrones que son excitados al recibir la radiación emitida por el sol.

Convenientemente, las películas TCO presentan la propiedad de reflejar la radiación infrarroja emitida por el sol, además de tener cualidades de transparencia (Ramírez Ku & Cruz Escobedo, 2015). Esta investigación tiene por objetivo, mediante el análisis de gráficos, evaluar el comportamiento de la temperatura al interior de espacios habitables referente al empleo de películas TCO en los vidrios para amortizar las fluctuaciones de temperatura. Estudios como este permiten obtener información valiosa para optimizar el desempeño térmico de materiales transparentes utilizados en las edificaciones ubicadas en climas cálidos.

Materiales y métodos

El método de análisis se basó en el desarrollo de modelos experimentales. El estudio se llevó a cabo en la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de



Figura 1. Vidrios con películas TCO.

la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, ubicada en la ciudad de Cunduacán, Tabasco. La primera etapa consistió en la revisión bibliográfica acerca de los componentes y condicionantes de los materiales transparentes en los edificios. Se indagó sobre las aplicaciones que han tenido y los efectos de la radiación solar sobre ellos, dando una perspectiva para el diseño del experimento. En la segunda etapa se plantearon los modelos físicos a escala para realizar la simulación de un espacio habitable, fundamentado en que, desde 1975, se han usado cajas pequeñas para hacer pruebas comparativas y validar simulaciones (Moore, 1982).

Se definieron los modelos a escala 1:25 de un espacio real con dimensiones de 3.0 x 3.0 x 2.5 m, referentes a una recámara conforme a los requerimientos de habitabilidad y funcionamiento indicados en el *Reglamento de Construcción del Estado de Tabasco* (2008). La escala seleccionada respondió a que los vidrios suministrados solo podían fabricarse de manera *in situ* con medidas limitadas de 0.026 x 0.076 m y a la complejidad de aplicación de la película al tratarse de un proceso innovador para la Universidad. Cada uno de los modelos se diseñó con forma de prisma rectangular e incluye placas de poliestireno expandido con el fin de evitar la ganancia térmica a través del material que sirve de soporte a los vidrios y así generar una cámara aislada térmicamente, reduciendo al mínimo las variables a considerar en la evaluación. Se diseñaron tres modelos, los cuales permitieron visualizar una comparativa gráfica entre los valores obtenidos para cada tipo de vidrio (Figura 1).

El modelo 1 con vidrio natural, el cual fungió como elemento de referencia, el modelo 2 con película de óxido de indio (ITO) y el modelo 3 con óxido de estaño (SnO₂) (Figura 2).

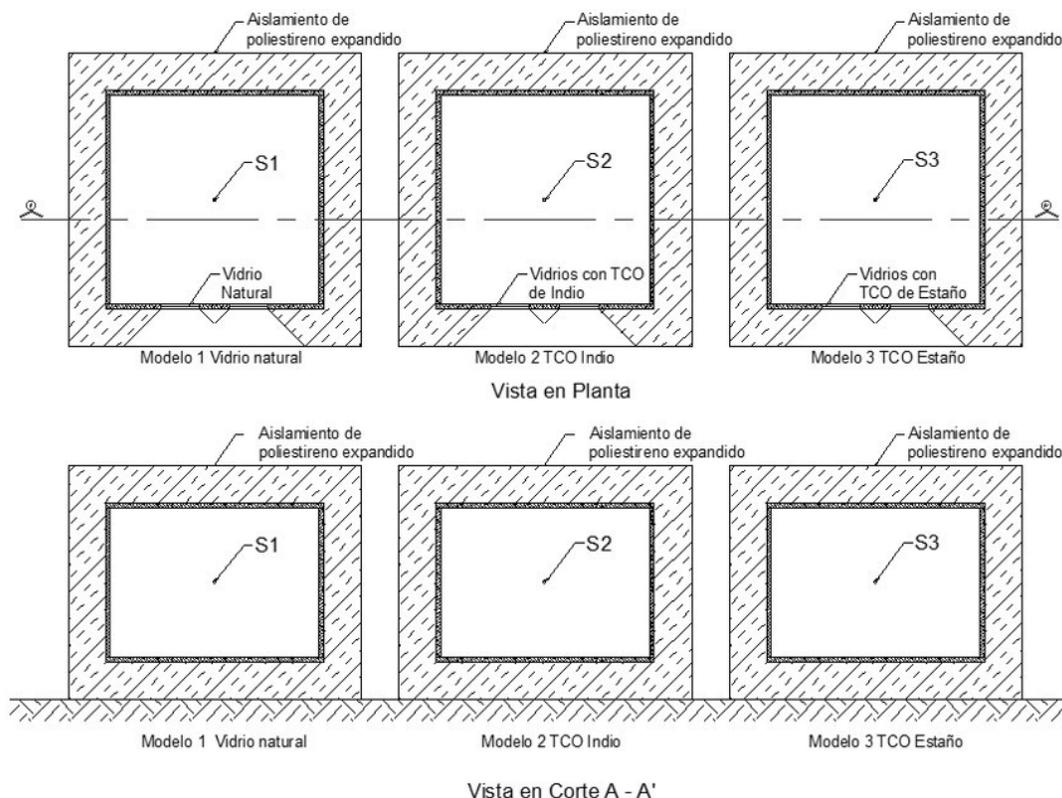


Figura 2. Planta y alzado de modelos con ubicación de sensores.



Figura 3. Etapas de construcción de los tres modelos.

Se construyeron con los mismos materiales con el fin de comparar sus comportamientos. Los materiales empleados en la construcción de los modelos fueron básicamente madera, vidrio y placas de poliestireno expandido (Figura 3). Se inicia con el corte de la madera, se colocan los vidrios en la cara correspondiente y, posteriormente, se ensamblan para formar la caja, finalmente, se forra con las piezas de poliestireno.

La evaluación de los modelos implicó la instalación de sensores Datalogger U12 (Figuras 2 y 4) con canal externo para el registro de datos de temperatura, unidad de medida en °C.



Figura 4. Datalogger U12 con canal externo.

Los registros de temperatura se efectuaron en los tres modelos al mismo tiempo, cada 15 minutos. Los sensores fueron ubicados al interior de cada uno de los modelos y otro en el exterior para tener como referente la temperatura ambiente.

Debido a que los vidrios solo tenían la película por una de las caras, se plantearon dos momentos en el proceso experimental: uno exponiendo la película hacia el interior y otro hacia el exterior.

A fin de evitar obstrucciones a la radiación directa, se seleccionó la losa de azotea del edificio del laboratorio ubicado dentro del campus de la universidad para ubicar el experimento. Se estableció que los meses para realizar la experimentación serían mayo y junio, por ser los que presentan los valores máximos de temperatura, según datos estadísticos. Con el fin de evitar que el calor almacenado en la losa afectara los valores de registro, los modelos se situaron sobre una placa de poliestireno, la cual funcionó como material aislante entre el concreto y los modelos.

Resultados

Para la presentación de resultados, solo se muestran los más representativos. Del primer momento, es decir, en el que la película está expuesta al interior, los resultados se encuentran representados en la Figura 5, donde se puede apreciar el comportamiento de la temperatura y visualizar la comparativa entre los modelos. Las temperaturas de los tres son semejantes, se observan líneas uniformes. La temperatura registrada al exterior de los modelos fue inferior. Por otro lado, los valores presentados por el modelo que albergó la película de estaño, se mantuvieron por debajo de la temperatura del vidrio con TCO de indio y el natural.

Los mismos datos fueron analizados en la Tabla 1, en donde se observa que la temperatura máxima en el interior del modelo con vidrio natural fue de 45.62 °C y la mínima de 41.76 °C; en el caso del modelo con película de indio, la máxima fue de 45.75 °C y la mínima de 41.44 °C; mientras que la máxima en el de película de estaño alcanzó 44.87 °C y la mínima resultó en 40.54 °C. En referencia a lo anterior, el modelo con TCO de estaño estuvo casi 1 °C por debajo de la temperatura del modelo con TCO de indio y del modelo con vidrio natural.

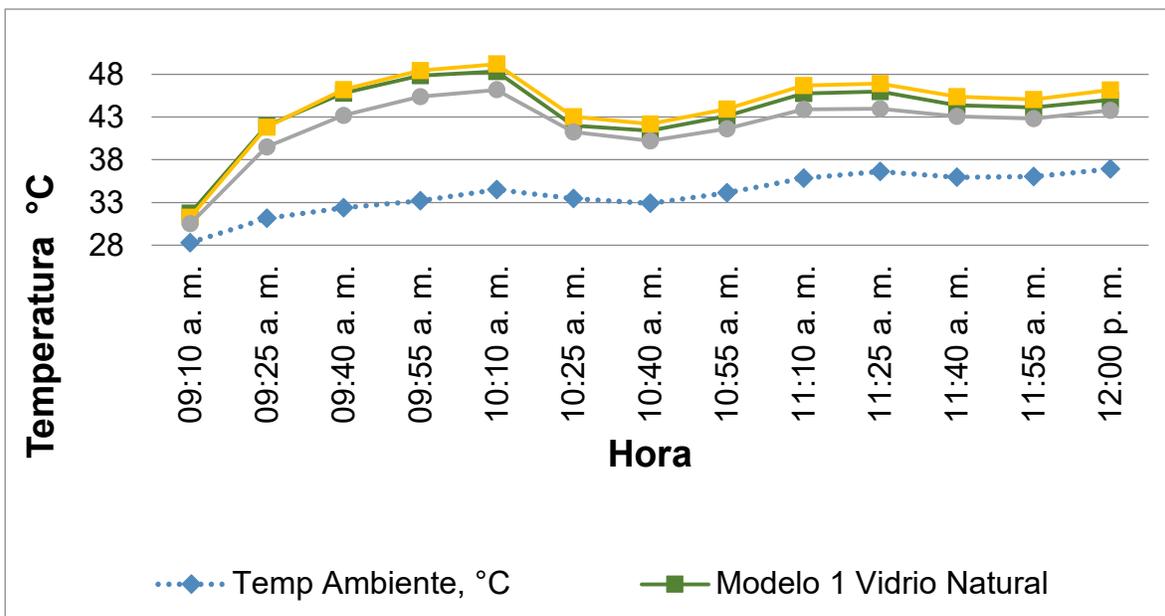


Figura 5. Registro de temperatura en los modelos con película al interior.

Los resultados del segundo momento, en el que la película está expuesta al exterior, arrojaron datos similares a la Figura 5, en el cual la temperatura exterior se mantuvo por debajo de las lecturas al interior de los modelos. A pesar de esto, en la Figura 6 se observa que la película de estaño continúa por debajo las temperaturas de la película de indio y el vidrio natural registradas; sin embargo, en esta ocasión se aprecia que la temperatura del modelo con TCO de indio, superó al vidrio natural y al TCO de estaño.

En la Tabla 2 se muestra que la temperatura máxima en el interior del modelo con vidrio natural fue

de 48.33 °C y la mínima de 31.74 °C; en el modelo con película de indio la máxima fue de 49.20 °C y la mínima de 31.25 °C; y en el de estaño la máxima alcanzó 46.19 °C y la mínima 30.52 °C. En esta ocasión, el TCO de estaño obtuvo una diferencia de 2 °C por debajo del vidrio natural y una diferencia de 3 °C por debajo del TCO de indio.

Los primeros resultados indican comportamientos similares entre el vidrio natural y la película de indio, con oscilaciones internas del espacio de hasta 12 °C entre el interior y la temperatura ambiente (Figuras 5

Tabla 1
Comparativa de modelos con película al interior.

Hora	Temperatura Ambiente (°C)	Modelo 1 Vidrio Natural (°C)	Modelo 2 TCO Indio (°C)	Modelo 3 TCO Estaño (°C)
09:10:00 a. m.	31.32	41.76	41.44	40.54
09:25:00 a. m.	32.40	43.01	42.68	41.73
09:40:00 a. m.	33.52	44.25	44.04	43.13
09:55:00 a. m.	34.92	44.96	45.09	44.22
10:10:00 a. m.	35.82	45.62	45.75	44.87
10:25:00 a. m.	35.17	44.25	44.22	43.79
10:40:00 a. m.	35.97	43.89	44.38	43.76
10:55:00 a. m.	37.25	44.87	45.27	44.87
11:10:00 a. m.	37.16	43.79	44.38	43.98
11:25:00 a. m.	38.32	44.41	44.93	44.62
11:40:00 a. m.	39.04	44.16	44.87	44.62
11:55:00 a. m.	39.33	43.95	44.81	44.62
12:10:00 p. m.	39.42	44.01	45.12	45.09

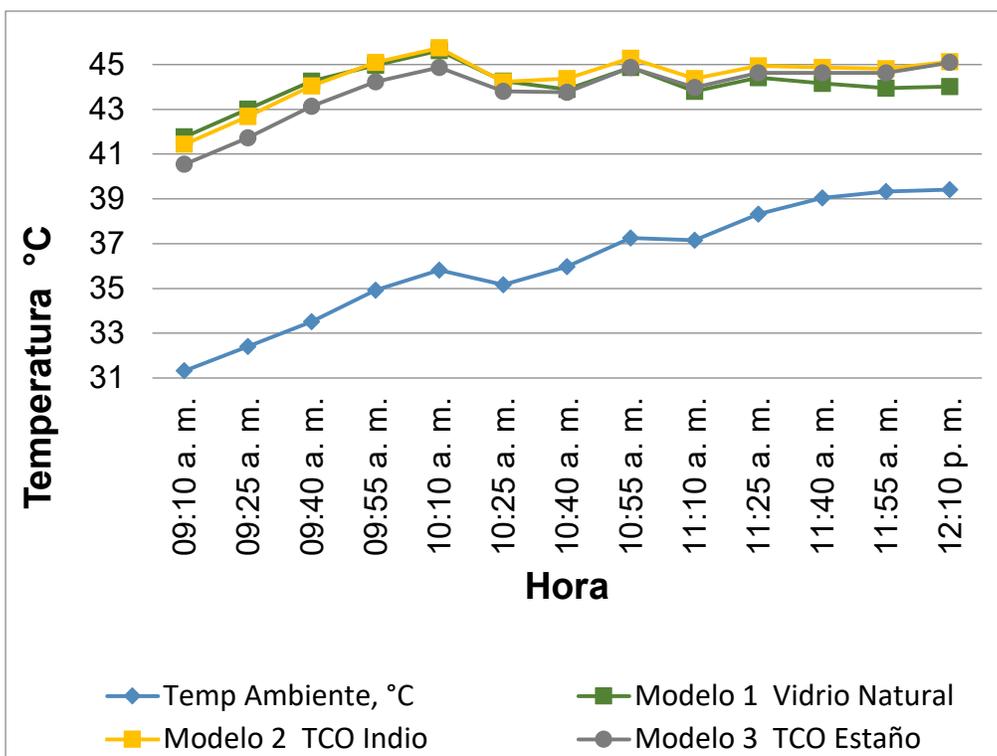


Figura 6. Registro de temperatura en los modelos con película al exterior.

Tabla 2
Comparativa de modelos con película al exterior.

Hora	Temperatura Ambiente (°C)	Modelo 1 Vidrio Natural (°C)	Modelo 2 TCO Indio (°C)	Modelo 3 TCO Estaño (°C)
09:10:00 a. m.	28.30	31.74	31.25	30.52
09:25:00 a. m.	31.16	41.97	41.82	39.51
09:40:00 a. m.	32.38	45.78	46.19	43.19
09:55:00 a. m.	33.19	47.84	48.43	45.37
10:10:00 a. m.	34.51	48.33	49.20	46.19
10:25:00 a. m.	33.47	42.00	43.04	41.23
10:40:00 a. m.	32.92	41.41	42.17	40.20
10:55:00 a. m.	34.12	43.13	43.92	41.61
11:10:00 a. m.	35.86	45.75	46.70	43.89
11:25:00 a. m.	36.64	46.00	46.89	43.98
11:40:00 a. m.	35.96	44.38	45.37	43.07
11:55:00 a. m.	36.04	44.13	45.06	42.83
12:00:00 p. m.	36.92	45.03	46.16	43.79

y 6). Se presentó el hecho de que, en la película de indio al exterior, después de transcurrido cierto tiempo, la temperatura presentó los más altos valores.

A partir de un análisis estadístico descriptivo de los datos en el software libre “R”, se obtuvo la información correspondiente a temperaturas mínimas, máximas, medias, medianas, primer y tercer cuartil (Tablas 3 y 4).

En la Tabla 4 se observa que la media de los modelos 1, 2 y 3 con película de TCO al exterior, se ubica entre 41.96 °C y 44.33 °C, mientras que en la Tabla 3, estos mismos modelos, pero con película al interior, oscilan entre 43.84 °C y 44.39 °C.

En los diagramas de caja (Figura 7) se puede apreciar que, tanto para el modelo de película interior

Tabla 3
Película interior.

Temperatura Ambiente (°C)	Modelo 1 Vidrio Natural	Modelo 2 TCO Indio	Modelo 3 TCO Estaño
Min.: 31.32	Min.: 41.77	Min.: 41.44	Min.: 40.54
1st Qu.: 34.92	1st Qu.: 43.89	1st Qu.: 44.23	1st Qu.: 43.77
Median : 35.97	Median : 44.16	Median : 44.81	Median : 44.23
Mean : 36.13	Mean : 44.08	Mean : 44.39	Mean : 43.84
3rd Qu.: 38.32	3rd Qu.: 44.41	3rd Qu.: 45.09	3rd Qu.: 44.63
Max. : 39.42	Max. : 45.62	Max. : 45.75	Max. : 45.09
<i>Min.: Mínimo</i> <i>Median: Mediana</i> <i>Mean: Media</i> <i>Max.: Máximo</i>		<i>1st Qu.: Primer cuartil</i> <i>3rd Qu.: Tercer cuartil</i>	

Tabla 4
Película exterior.

Temperatura Ambiente (°C)	Modelo 1 Vidrio Natural	Modelo 2 TCO Indio	Modelo 3 TCO Estaño
Min.: 28.30	Min.: 31.74	Min.: 31.25	Min.: 30.52
1st Qu.: 32.92	1st Qu.: 42.00	1st Qu.: 43.04	1st Qu.: 41.24
Median : 34.12	Median : 44.38	Median : 45.37	Median : 43.07
Mean : 33.96	Mean : 43.66	Mean : 44.33	Mean : 41.96
3rd Qu.: 35.96	3rd Qu.: 45.78	3rd Qu.: 46.70	3rd Qu.: 43.89
Max. : 36.92	Max. : 48.34	Max. : 49.21	Max. : 46.19
<i>Min.: Mínimo</i> <i>Median: Mediana</i> <i>Mean: Media</i> <i>Max.: Máximo</i>		<i>1st Qu.: Primer cuartil</i> <i>3rd Qu.: Tercer cuartil</i>	

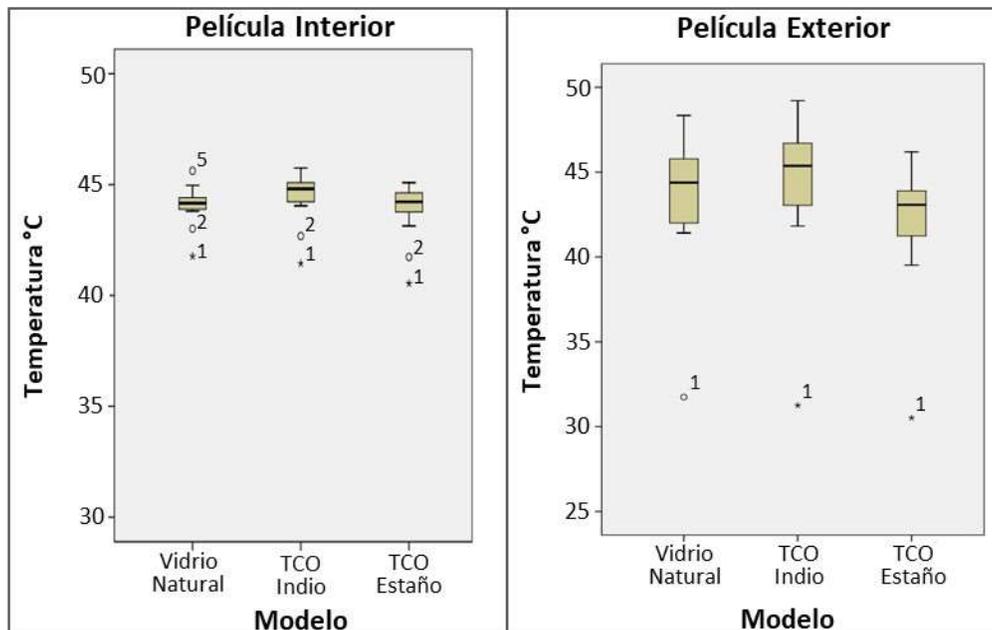


Figura 7. Comparativo de diagramas de caja.



como exterior, presentan un comportamiento semejante. Al evaluar las temperaturas que alcanzan en las distintas situaciones, se observa que los registros menores se presentan en el estaño, en el caso del vidrio natural los valores son intermedios, mientras que los registros más elevados se indican en el indio.

También se pudieron observar diferencias entre los registros de las películas al interior y al exterior, en los primeros los valores se concentran, mientras que en los segundos se distribuyen con una mayor amplitud.

Conclusiones

El vidrio con película de estaño con capa al exterior presenta los mejores comportamientos al paso de la radiación solar si se compara con el de indio. No obstante, esta diferencia solo llegó a alcanzar una disimilitud máxima de 3.02 °C, en el punto de los registros máximos alcanzados en los modelos. Datos que sobrepasan por mucho una temperatura de comodidad para el interior de un espacio.

En el caso de comparar el vidrio con película de estaño con capa al exterior con un vidrio natural, la diferencia disminuye y solo alcanza una disimilitud de 2.15 °C., lo que representa la misma observación del caso anterior.

En este estudio se observó que los vidrios con película exterior de indio presentan registros de temperatura mayores y, aunque este no era el ideal buscado, es posible que la aplicación de esta película mejore la captación de energía en sistemas pasivos, como la Chimenea Solar y el Muro Trombe, ya que ambos requieren calentar ciertas zonas del sistema para funcionar por convección.

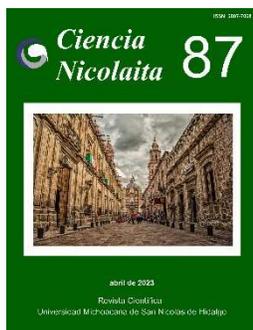
Referencias

Angulo-Córdova, Q., Muñoz-Orozco, A. & Barradas-Miranda, V.L., 2004, Estudio del bioclima humano en dieciséis localidades del estado de Tabasco mediante el índice de confort temperatura efectiva: *Universidad y Ciencia*, 20(40), 69-80. <https://era.ujat.mx/index.php/rera/article/view/250/206>

Ayuntamiento Constitucional de Centro Villahermosa, 2008, Reglamento de Construcción del Municipio del Centro, estado de Tabasco, Capítulo II, Artículo 96: Mé-

xico, Ayuntamiento Constitucional de Centro Villahermosa. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Estatal/TA-BASCO/Municipios/Centro/3REG.pdf>

- Bedoya Calle, A.H., 2015, Fabricación y caracterización de películas delgadas de óxidos transparentes con aplicaciones ópticas: Tesis Doctoral, *Universidad Autónoma de Nuevo León*, 106 pp. <http://epri-nts.uanl.mx/10992/1/1080215490.pdf>
- Climate-data.org, s. f., "Clima Data. Clima Villahermosa (México)". <https://es.climate-data.org/america-del-norte/mexico/tabasco/villahermosa-3372/#climate-table>
- Diario Oficial de la Federación, 2019, "Ley de Vivienda. Art. 1. (Última reforma, 14 de mayo de 2019)". https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LViv_140519.pdf
- Molina, C. & Veas, L., 2012, Evaluación del confort térmico en recintos de 10 edificios públicos de Chile en invierno: *Revista de la Construcción*, 11(2), 27-38. <https://www.scielo.cl/pdf/rconst/v11n2/art04.pdf>
- Moore, Fuller, 1982, Passive Solar Test Modules: *Passive Solar Journal*, 1(2), 91-108.
- Ramírez Ku, V. & Cruz Escobedo, C.D., 2015, Evaluación de las propiedades térmicas de vidrios corning recubiertos con películas de tipo TCO compuestas de óxido de estaño dopadas de iones de indio ITO: Tesis de Licenciatura, *Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*.
- Restituyo Pérez, R., 2015, Sistema de elementos de protección solar para la vivienda colectiva de interés social en el clima cálido-húmedo de Santo Domingo: Tesis de Maestría, *Universidad Politécnica de Catalunya*.
- Secretaría de Energía, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía & Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos, 2001, "NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales". https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181648/NOM_008_ENER_2001.pdf
- Servicio Meteorológico Nacional, s. f., "Normales Climatológicas por Estado". <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=tab>



Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Determinación de la rugosidad de discontinuidades en roca a través del método de fotogrametría

Determination of the roughness discontinuities of rock through photogrammetry method

José E. Arreygue Rocha,^{1*} Marsella G. Rodríguez Servín² y Carlos Chávez Negrete¹

Para citar este artículo: Arreygue Rocha José E., Rodríguez Servín Marsella G. y Chávez Negrete Carlos, 2023. Determinación de la rugosidad de discontinuidades en roca a través del método de fotogrametría. Ciencia Nicolaita no. 87, 88-98. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.657>



Historial del artículo:

Recibido: 26 de mayo de 2022
Aceptado: 8 de octubre de 2022
Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: eleazar.arreygue@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Determinación de la rugosidad de discontinuidades en roca a través del método de fotogrametría

Determination of the roughness discontinuities of rock through photogrammetry method

José E. Arreygue Rocha,^{1*} Marsella G. Rodríguez Servín² y Carlos Chávez Negrete¹

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Maestría en Infraestructura del Transporte en la rama de las Vías Terrestres

Resumen

Los cortes carreteros y los túneles son obras civiles que cuando se construyen en roca la revisión de su estabilidad resulta compleja, por lo que se deben realizar estudios a detalle. Estas obras están condicionadas por el comportamiento del macizo rocoso, donde intervienen las discontinuidades y su rugosidad, factores que determinan la resistencia al corte del macizo rocoso.

Para este trabajo se emplearon núcleos de roca que corresponden a un sondeo geotécnico de 100 m de profundidad de una zona del “Ramal Camelinas” de la ciudad de Morelia, Michoacán. En este se utilizó la técnica de la fotogrametría, la cual es novedosa y de bajo costo, lo que permitió conocer con precisión el área de contacto de la superficie que se utiliza para la determinación de los esfuerzos normales. Asimismo, se consideraron once especímenes, mientras que sus áreas de contacto calculadas están en el rango de 17.62 a 43.68 cm². El esfuerzo normal que se obtuvo está en los rangos de 1.77 a 9.56 kg/cm². También se valoró el coeficiente de rugosidad de las discontinuidades, obteniéndose una topografía a escala milimétrica de cada perfil.

Palabras clave: esfuerzo cortante, macizo rocoso, modelo 3D, perfil, rugosidad.

Abstract

Cutting slopes and tunnels are examples of civil engineering structures whose stability assessment is complex when built-in rock, so in-depth studies must be undertaken. These structures are conditioned by the behavior of the rock mass, where discontinuities and their roughness play a critical role in determining the shear strength.

For this study, rock cores corresponding to a 100 m deep geotechnical survey at a zone known as “Ramal Camelinas” in the city of Morelia were used. A novel and low-cost technique based on photogrammetry was implemented, which allows obtaining more accurate contact areas of the surface to be used in the determination of the normal efforts.

Eleven specimens were considered for this study with calculated contact areas ranging from 17.62 to 43.68 cm². Moreover, the normal stress obtained ranges from 1.77 to 9.56 kg/cm². Finally, the roughness coefficient of the discontinuities was also assessed, obtaining a millimeter-scale topography of each profile.

Keywords: shear stress, rock mass, 3D model, profile, roughness

Introducción

El esfuerzo cortante en discontinuidades es un parámetro importante para muchos proyectos de ingeniería de rocas, el cual requiere la determinación de parámetros fundamentales de fricción junto con la caracterización y cuantificación de factores geológicos (Hencher & Richards, 2014). El término discontinuidad se refiere a cualquier fractura mecánica en un macizo rocoso con una resistencia a la tensión insignificante; las discontinuidades pueden ser de origen geológico (fallas, estratificación, esquistosidad, foliaciones) o de origen antropogénico (fracturas inducidas por explosiones, inducidas por estrés o inducidas hidráulicamente) (Muralha *et al.*, 2014).

La determinación del esfuerzo cortante ha sido un tema debatido y estudiado en diversas investigaciones, proponiendo criterios empíricos, tales son los estudios de Barton (1973, 1976, 1977), Grasselli & Egger (2003) y Xia *et al.* (2014), quienes han llegado a proponer criterios mediante la caracterización de las discontinuidades y el ensayo de corte directo, que es uno de los métodos de mayor aceptación para la obtención de los parámetros de esfuerzo cortante.

En esta etapa de la investigación se realizó la caracterización de las discontinuidades en modelos de tercera dimensión (3D), considerando que existen técnicas modernas en las que con equipos de uso cotidiano se facilita la medición y caracterización de objetos en 3D. Dicha caracterización se realizó elaborando modelos en 3D de cada uno de los especímenes de roca, obteniendo coeficientes de rugosidad conjunta (JRC, por sus siglas en inglés), área de contacto y esfuerzos normales a los que van a estar sometidas cada una de las muestras de roca durante el proceso de ejecución de la prueba de corte directo. Para ello, en esta etapa se caracterizaron once muestras de discontinuidades naturales tomadas de un sondeo geotécnico con recuperación de núcleos de roca ignimbrita, tomadas de la

construcción de un túnel en la ciudad de Morelia, Michoacán.

Metodología aplicada

En este apartado se presenta la secuencia que se eligió para lograr el objetivo del presente trabajo, considerando los factores necesarios para definir las condiciones de las pruebas de laboratorio, así como el área de contacto de las discontinuidades y el coeficiente de rugosidad de las paredes de las discontinuidades, parámetros que tienen influencia en el esfuerzo cortante.

Densidad y absorción

La densidad se define como la masa por unidad de volumen. Partiendo de esta definición, se aplicó la norma ASTM C127-04, método de prueba estándar para la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y la absorción, así como la ASTM D4543-0e1. El procedimiento de estos ensayos tuvo como propósito determinar la densidad y la absorción para establecer sus parámetros básicos en la caracterización de los especímenes que depende fuertemente de su composición mineralógica y porosidad.

Discontinuidades en las superficies de núcleos

La identificación de las discontinuidades implicó la determinación del área de contacto y la rugosidad de las paredes de las discontinuidades. Dichas características permitieron definir el esfuerzo normal a la que estuvo sometida la muestra de roca en la naturaleza, así como relacionar la influencia de la rugosidad en el esfuerzo cortante.

El reconocimiento de las discontinuidades en núcleos de roca se hizo a través de la observación (tarea que requiere una clara visualización y conocimiento del comportamiento de la roca), considerando que se pueden presentar dos tipos de discontinuidades: natural e inducida (provocada por la rotación del barrenado al momento de la perforación), por lo que se



debe tener cuidado al momento de elegir las discontinuidades reales de aquellas que no lo son, ya que es muy fácil confundirse.

Área de contacto

En la actualidad, la obtención de modelos en 3D se emplean para analizar y cuantificar adecuadamente sólidos tridimensionales que pueden generarse mediante fotogrametría, la cual consiste en generar un modelo 3D a partir de una serie de fotografías en 2D. Sin embargo, tanto la ISRM (2014) como investigaciones de otros autores como Grasselli & Egger (2002) y Grasselli (2006), mencionan que la tecnología actual permite definir claramente parámetros como la rugosidad o el JRC de las paredes de la discontinuidad.

El área de contacto también puede obtenerse mediante métodos gráficos convencionales; sin embargo, al ser un método en 2D no se contempla la rugosidad de la superficie, dando generalmente valores menores de área de contacto. Otra forma de obtener el área de contacto es utilizando la ecuación citada en la norma ASTM D 5607 (Ecuación 1):

$$A = (\pi * D^2) / 4 \text{ Cos } \theta \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde D = diámetro de la muestra y θ = ángulo de la punta.

La ecuación no es de gran utilidad, ya que generalmente las discontinuidades se encuentran incompletas, pero el ángulo de la punta se mantiene constante, por lo que se sobreestima el área, además, tampoco se considera la rugosidad de la superficie.

Coefficiente de rugosidad

A continuación se describe la manera de obtener el grado de aspereza de las paredes de la discontinuidad o valor del JRC, aplicando la norma ASTM-D5607, donde se indica la forma de obtener el valor de la rugosidad a través del peine de Barton y la escala de rugosidad adecuada. Por otra parte, la CFE (2017) y la ISRM (2004), igualmente mencionan que se puede emplear el método convencional de Barton (1997), pero dando la recomendación del empleo de métodos de no-contacto o 3D (escáner, láser, fotogrametría, entre otros), dado el avance tecnológico actual.

Barton (1973, 1977) y Barton & Choubey (1976) propusieron un JRC y una expresión que relaciona el

esfuerzo cortante con el esfuerzo normal, la resistencia a la compresión simple de la discontinuidad (JCS), el ángulo de fricción básico (ϕ_b) y el JRC a través de la Ecuación 2:

$$\tau_r = \sigma_n \tan (\phi_b + JRC \log_{10}(JCS/\sigma_n)) \quad \text{Ec. 2}$$

Esta es una de las ecuaciones empíricas más utilizadas en la actualidad para la estimación de la resistencia al corte de las discontinuidades en roca. El método más conocido es el de Barton (1977); sin embargo, la obtención del JRC sigue siendo un parámetro derivado por medios visuales que deja incertidumbre.

Comparando el perfil obtenido con el peine de Barton y cotejado con una escala de Barton de 10 rugosidades, el valor de su coeficiente oscila en el rango de 0 a 20 (Figura 1).

Esfuerzo normal

La resistencia al corte es directamente proporcional a la presión normal o sobrecarga, por lo que, cuanto mayor sea la carga normal, mayor será la resistencia requerida. Considerando lo anterior, el esfuerzo normal se refiere al esfuerzo máximo que se puede aplicar axialmente a un espécimen durante la ejecución de cualquier prueba (CFE, 2017). En este aspecto, y conociendo el área de contacto de cada espécimen, se calcularon los esfuerzos normales mediante la Ecuación 3:

$$\sigma_n = P/A \quad \text{Ec. 3}$$

Donde P = carga en kgf por el sistema internacional de unidades y A = área de contacto en cm^2

Resultados

Densidad

Esta propiedad se llevó a cabo de acuerdo con lo establecido en la norma correspondiente. Para ello, en primer lugar, se definieron los diferentes cambios litológicos y se elaboró el perfil litológico, lo que facilitó el ensayo, así como el poder determinar la densidad de la roca. Hasta los primeros 60 m aproximadamente, el rango de valores calculados está entre 1.50 y 2.14 gr/cm^3 , después de los 60 m los valores dismi

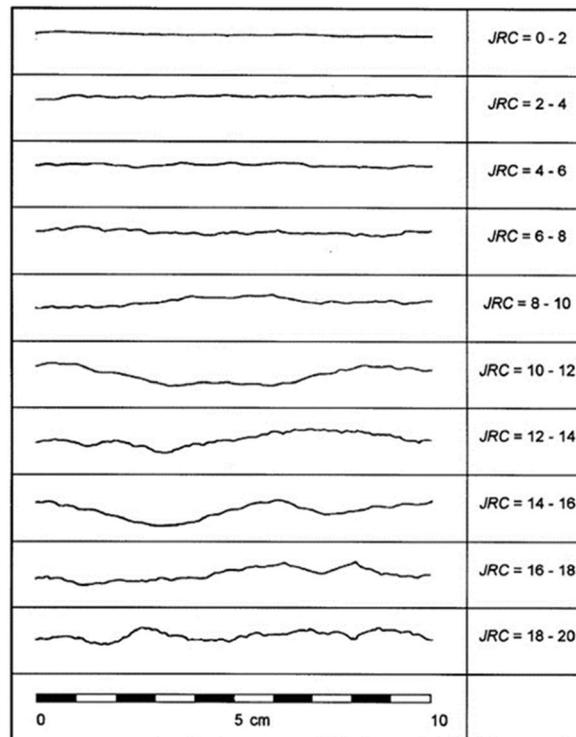


Figura 1. Perfiles del coeficiente de rugosidad (JRC) propuestos por Barton (1977).

nuyen hasta un rango de 1.38 a 1.99 gr/cm³. En la Figura 2a se aprecia la variación con respecto a la profundidad. Los valores más bajos de densidad se encuentran en los primeros metros y en los últimos, mientras que los valores más altos pertenecen a las profundidades entre los 10 y 60 m (Luz, 2019).

En la Figura 2b se muestra la variación de la absorción en porcentaje, considerando la profundidad. Para los primeros 75 m, los valores están entre un rango de 3% y 11%, después de dicha profundidad los valores aumentan considerablemente hasta un rango de 22% (Luz, 2019).

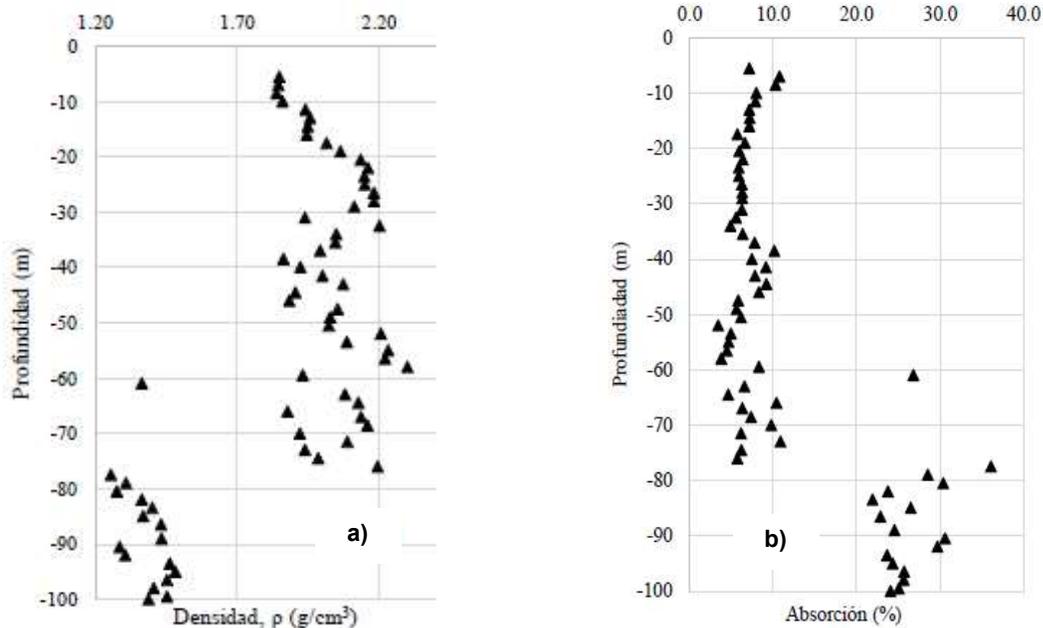


Figura 2. Variación de los valores de la densidad en a) y de la absorción en b), de acuerdo con la profundidad (Luz, 2019).

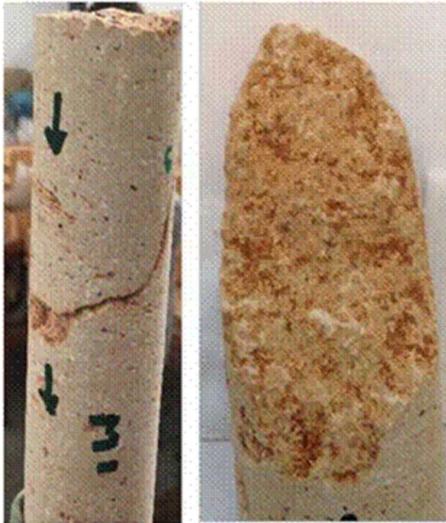


Figura 3. Identificación de muestras con discontinuidades (izquierda) y rugosidad (derecha). Autoría propia.



Figura 4. Esquema de discontinuidades naturales. Autoría propia.

a 36%. Los valores más altos de absorción se presentan en los últimos metros de la profundidad excavada.

Discontinuidades en la superficie de núcleos de roca

La caracterización de las discontinuidades se hizo para un sondeo geotécnico con longitud de 100 m de roca ignimbrita. A través de la técnica de observación se identificaron las discontinuidades naturales a lo largo de todo el sondeo, las cuales tenían pequeñas incrustaciones de material de relleno y cierta presencia de oxidación (Figura 3). Cada muestra fue identificada con una etiqueta, señalando el número de muestra, su profundidad y se marcó con flechas el sentido en que se produce el corte.

Generalmente, las discontinuidades naturales presentan irregularidades en cuanto a su forma, a diferencia de las discontinuidades inducidas, que pueden ser fracturas muy bien definidas, sin forma, e incluso sin rugosidad. En la Figura 4 se observan algunas formas que presentan las discontinuidades naturales.

Debido al tipo de material y al proceso de perforación, hay discontinuidades que llegan a estar incompletas, parcial o totalmente de una o ambas caras, por lo que solamente se obtuvieron once especímenes completos (con ambas caras), con los cuales se procedió a calcular el ángulo de punta de cada discontinuidad (Figura 5). La línea roja muestra la inclinación de la discontinuidad y la línea en blanco la horizontal, con estas dos referencias se procedió a realizar el cálculo a través de un transportador.

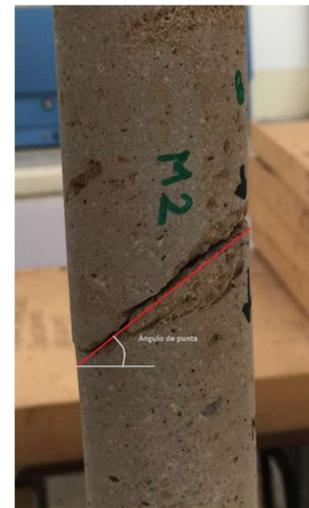


Figura 5. Cálculo del ángulo de punta de la discontinuidad. Autoría propia.

En la Tabla 1 se muestra la clave del espécimen, la profundidad, la longitud de la discontinuidad y el ángulo de punta; además, se aprecia que las muestras solo corresponden a los primeros cincuenta metros, ya que el resto fue descartado por no cumplir con los requerimientos (no naturales, no completas, entre otras).

Área de contacto

Para calcular el área de contacto se utilizó la Ecuación 1, donde se hizo un dibujo de cada discontinuidad que abarcara toda su área (de ambas caras), después

Tabla 1
Identificación de discontinuidades naturales. Autoría propia.

Muestra	Profundidad (m)	Longitud (cm)	Ángulo de punta (°)
M1	9.53	8.16	65
M2	10.90	5.50	44
M3	14.76	4.99	24
M4	15.55	4.87	22
M5	17.82	5.00	9
M6	20.19	4.84	7
M7	19.52	5.38	31
M8	24.55	6.68	50
M9	26.94	6.00	41
M10	35.25	8.49	73
M11	46.56	5.02	63

en cada imagen se trazó una retícula en papel milimétrico para poder cuantificar su valor.

La segunda técnica se enfocó en tomar una serie de fotografías alrededor de la muestra en diferentes ángulos, de tal forma que abarcara todo el espécimen; posteriormente, se procesaron las imágenes en un software especializado (en este caso se empleó PhotoScan). Por el tamaño de los especímenes, es muy complicado utilizar coordenadas para referenciar el modelo, por lo que, previo a la toma de la fotografía, se marcaron dos puntos con separación de un centímetro entre ellos, lo que permitió utilizarlo como referencia para facilitar su proceso (Figura 6). Al aplicar el software se hizo el siguiente proceso: a) Orientación de la fotografía; b) Creación de una nube de puntos densos; c) Creación de una malla y modelo en 3D; y d) Ubicación de referencias y longitud entre puntos.

Para la medición del área se delimitó la superficie de la discontinuidad y, mediante la opción “Medir área”, se calculó el área de la malla delimitada en centímetros cuadrados. Enseguida se obtuvo el perfil de

rugosidad a través de: a) Cambio de la longitud entre puntos para escalar el modelo y se usó el software CivilCad; b) Se generó un modelo digital de elevación con curvas de nivel (Figura 7), teniendo una mayor precisión; c) Se exportó en formato *.dxf para utilizarlo en AutoCad; y d) Dada la amplitud de la escala para visualizar mucho mejor los detalles de la rugosidad, se empleó el software CivilCad y su módulo de Altimetría para trazar los perfiles de rugosidad, en sentido longitudinal y transversal.

El modelo consideró la obtención de una malla y de un área de contacto. En la Figura 8 se presentan imágenes de una de las discontinuidades obtenidas: en la Figura 8 (izq.) se muestra la digitalización de un espécimen en 3D con el empleo de la fotogrametría donde se utilizaron dos puntos con una separación de 1 cm entre ellos, con el objeto de dimensionar el modelo. Adicionalmente, se aplicó un teselado para darle mayor detalle al modelo, logrando mostrar bordes y

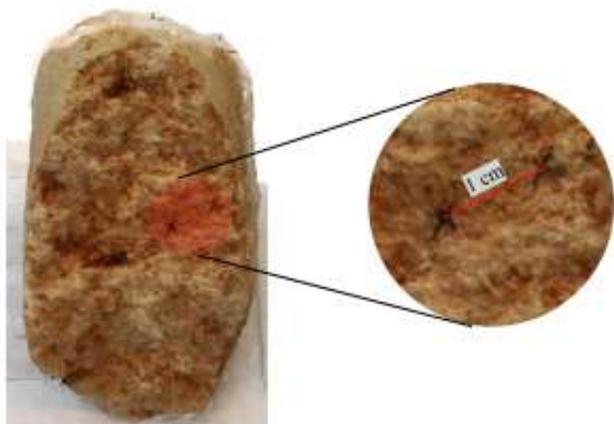


Figura 6. Fotografía con la referencia de 1 cm de separación en una discontinuidad. Autoría propia.

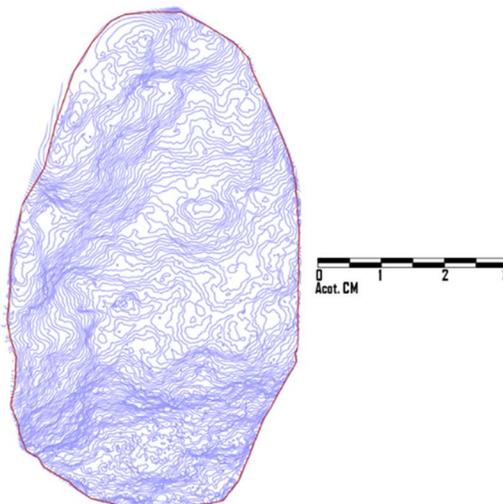


Figura 7. Contornos del modelo y curvas de nivel. Autoría propia.

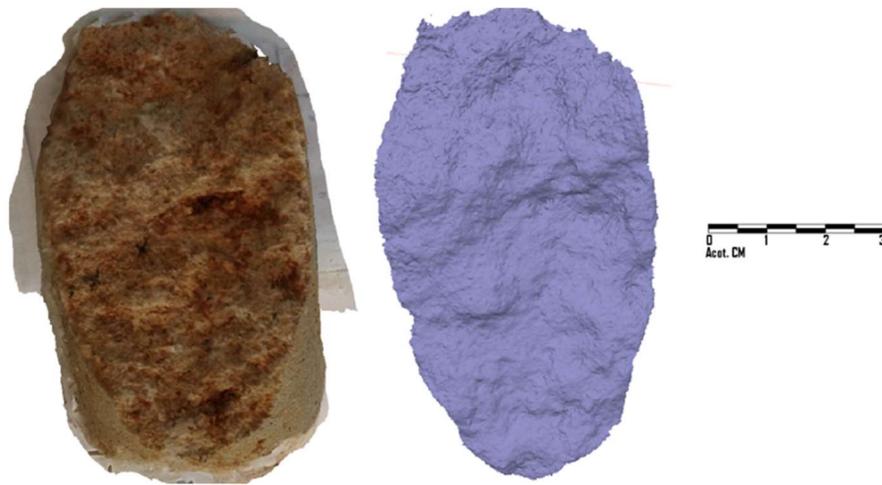


Figura 8. Modelo en 3D (izquierda) y mallado de la superficie (derecha). Autoría propia

curvas sobresalientes, esto con la finalidad de definir claramente el perímetro o superficie de contacto. Por otra parte, en la Figura 8 (der.) se muestra el mallado únicamente de la superficie de contacto, y al tener características geométricas en cada nodo de la malla, el programa permitió medir el área de contacto que considera el relieve rugoso de la muestra, obteniendo su coeficiente de rugosidad.

Al tener dos resultados del área de contacto por cada muestra (la obtenida con la norma ASTM D 5607 y del modelo digital fotogramétrico), fue preciso determinar qué área utilizar. De acuerdo con la norma, es importante considerar que cuando la discontinuidad está completa, se toma el área mayor, mientras que en caso contrario se tomará el área menor, debido a que es el área que estará en contacto durante el proceso de la prueba de corte. En la Tabla 2 se muestran las áreas de las discontinuidades obtenidas para cada espécimen (son las áreas mayores aplicando el método fotogramétrico).

El área de contacto permitió obtener el esfuerzo normal al que se sometió la muestra al momento de realizar la prueba.

Coeficiente de rugosidad

Aunque el método del peine de Barton (1977) es el más aceptado en la práctica, a lo largo de los años se han propuesto nuevas técnicas que tratan de escanear los perfiles en 3D, tal como lo sugiere la ISRM (2014) y otros trabajos (Ecuación 2). Con fines de aprovechar los modelos generados en 3D de este trabajo, también se obtuvo el JRC en sentido transversal y longitudinal. De esta manera, se recabaron los perfiles de rugosidad para cada muestra utilizando el método fotogramétrico y el convencional (peine de Barton). En la Figura 9 se muestran los valores del coeficiente de rugosidad promedio de los especímenes en estudio. Cabe mencionar que se cuidó que las discontinuidades estuvieran completas, así como una longi-

Tabla 2
Área de contacto obtenida para cada espécimen (cm²).

Muestra	Área
M1	32.99
M2	26.71
M3	20.60
M4	20.46
M5	20.69
M6	21.44
M7	21.84
M8	25.58
M9	25.68
M10	43.68
M11	17.62

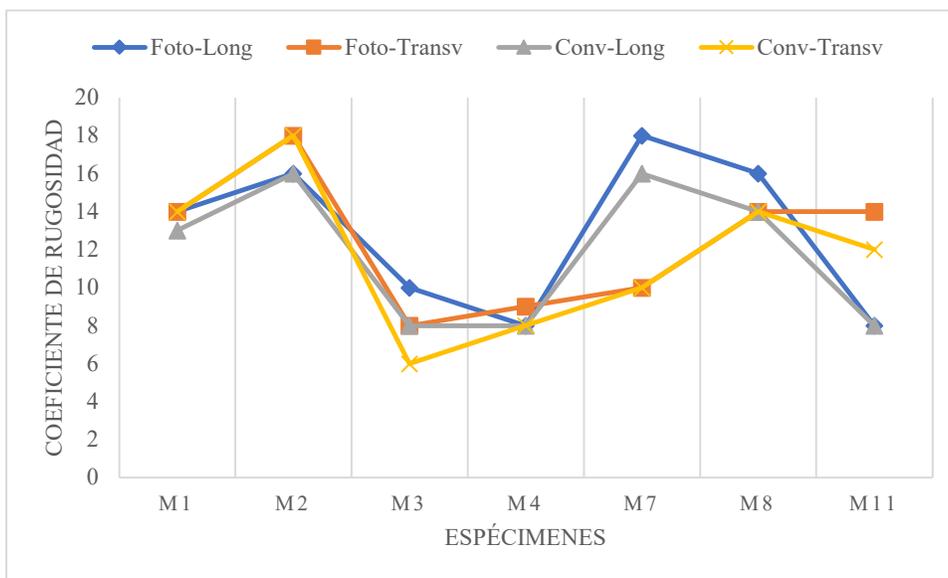


Figura 9. Valores de la rugosidad (JRC) de cada espécimen empleando las dos metodologías. Descripción de la leyenda: Foto-Long, Fotogrametría Longitudinal; Foto-Transv, Fotogrametría Transversal; Conv-Long, Convencional Longitudinal y Conv-Transv, Convencional Transversal. Autoría propia.

tud considerable, por lo que se descartaron las muestras 5, 6, 9 y 10 por tener una longitud demasiado corta, lo que afectaría la realización de la prueba de corte directo.

Como se aprecia en la Figura 9, los valores de la rugosidad de los especímenes M3 y M4, aplicando los dos métodos (Ecuación 2 y el peine de Barton), son bajos, lo que indica que estas rugosidades tienen poca aspereza y tienden a ser lisas. Para la muestra M7, las rugosidades transversales por los dos métodos tienen los valores de una rugosidad poco áspera o casi lisa. En cambio, la muestra M11 tiene valores bajos que son de rugosidades casi lisas, además coinciden los valores de los dos métodos en la rugosidad longitudinal.

Por otra parte, en la Figura 10 se muestra el ejemplo de perfiles con los dos métodos empleados, observándose que el grado de detalle que proporciona el método fotogramétrico es de mayor precisión con respecto al método convencional, lo cual permite tener una mayor certeza del valor, así como una mejor apreciación del cambio de la rugosidad.

Esfuerzo normal

Para conocer el esfuerzo normal que se aplicaría a cada espécimen, se utilizó la Ecuación 3. Los resultados se muestran en la Tabla 3, donde se aprecia la carga normal y los esfuerzos que se aplicaron en las etapas consecutivas de esta investigación. Igualmente, se presentan los valores de la densidad, apreciando que en los primeros quince metros el material es más frágil (roca más débil), como se observó en la Figura 2. No ocurre lo mismo después de los veinte metros de profundidad, donde se muestran valores más altos que indican que la roca tiene mejores condiciones (más sana) y menos porosidad.

En la misma tabla se observan los valores de la carga y del esfuerzo normal, lo que demuestra que a mayor profundidad existe mayor densidad, por ende, mayor carga para la ruptura y como resultado mayor resistencia al esfuerzo.

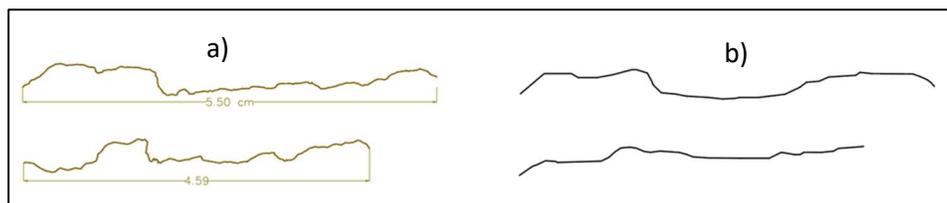


Figura 10. Comparación de perfiles: a) método fotogramétrico; b) método convencional. Autoría propia.



Tabla 3
Esfuerzos y cargas normales (kg/cm²). Autoría propia.

Muestra	Profundidad (m)	Área (cm ²)	Densidad (g/cm ³)	P (kg)	σ_n (kg/cm ²)
M1	9.53	32.99	1.82	58.47	1.77
M2	10.90	26.71	1.94	56.50	2.12
M3	14.76	20.60	1.95	59.15	2.87
M4	15.55	20.46	1.95	61.90	3.03
M5	17.82	20.69	2.06	76.06	3.68
M6	20.19	21.44	2.14	79.49	4.31
M7	19.92	21.84	2.14	92.89	4.25
M8	24.55	25.58	2.15	135.00	5.28
M9	26.94	25.68	2.18	150.92	5.00
M10	35.25	43.68	2.05	314.94	7.21
M11	46.56	17.62	2.05	168.50	9.56

Discusión de resultados

Como ya se mencionó, los parámetros de los esfuerzos cortantes en rocas son de suma importancia para el diseño de cualquier obra civil. Sin embargo, su obtención y análisis requiere de un gran trabajo preliminar para proporcionar a la prueba de resistencia y al esfuerzo cortante, las condiciones más apegadas a lo real, con el objeto de definir los parámetros con menor grado de incertidumbre. En seguida se mencionan los aspectos principales de este trabajo:

- Los resultados que se obtuvieron de la densidad y de la absorción, permitieron observar que la roca a una profundidad de 60 m presenta una densidad con rangos de 1.50 a 2.14 gr/cm³; en cambio, los valores de la absorción están entre 3% y 11%. Después de dicha profundidad los valores para la densidad disminuyen a un rango de 1.38 a 1.99 gr/cm³; sin embargo, para la absorción aumentan considerablemente hasta un rango de 22% a 36%.
- En la etapa de selección de las discontinuidades se logró diferenciar entre las discontinuidades naturales y los fracturamientos inducidos por el proceso de la perforación.
- Se logró ubicar once discontinuidades de roca en un sondeo de 100 m de profundidad con la técnica de la observación, etiquetando cada discontinuidad con su longitud, ángulo de punta y profundidad correspondiente.
- Para obtener el área de contacto se aplicó la técnica de la fotogrametría, permitiendo tener modelos en 3D a partir de métodos gráficos convencionales como las fotografías en 2D.

Asimismo, se logró conocer el área de contacto a través de la aplicación de fórmulas. Para este estudio se consideraron once muestras y sus áreas oscilaron en el rango de 17.62 a 43.68 cm².

- Se calculó la rugosidad de cada discontinuidad a través del método de Barton (1977) que también es visual (peine de Barton), así como la valoración del coeficiente de rugosidad en las discontinuidades, el cual se obtuvo de una gráfica propuesta por el mismo autor. Con ese resultado se aplicó un modelo en 3D que arrojó una topografía a escala milimétrica de cada perfil de rugosidad.
- Se calculó el esfuerzo normal de los once especímenes en el laboratorio, obteniéndose un rango entre 1.77 y 9.56 kg/cm².

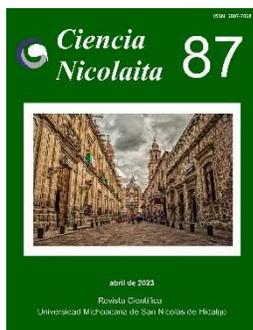
Conclusiones

Los resultados con el método de fotogrametría resultaron sumamente aceptables en comparación con el teórico de Barton, pero ayudaron o potencializaron la investigación a detalle de la misma rugosidad.

Referencias

- ASTM C127-04, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.
- ASTM D4543-08e1, 2017, Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances. West Conshohocken, PA: ASTM International.

- ASTM D5607-16, Standard Test Method Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force.
- Barton, N. and Choubey, V., 1976, The shear strength of rock and rock joints: *Int. Rock Mech. Min. Sci and Geomech. Abstr.*, 13(9), 255-279.
[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(76\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)90003-6)
- Barton, N., 1973, Review of a new shear-strength criterion for rock joints: *Engineering geology*, 7(4), 287-332.
[https://doi.org/10.1016/0013-7952\(73\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0013-7952(73)90013-6)
- Barton, V.C., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice: *Springer-Verlag*, 10, 1-54.
<https://doi.org/10.1007/BF01261801>
- Comisión Federal de Electricidad (CFE), 2017, Pruebas de laboratorio de mecánica de rocas. Manual de diseño de obras civiles: *México, CFE*.
- Grasselli, G. and Egger, P., 2002, Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameter: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(1), 25-40.
[https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00101-6](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00101-6)
- Grasselli, G. and Egger, P., 2003, Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(1), 25-40.
[https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00101-6](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00101-6)
- Grasselli, G., 2006, Shear Strength of Rock Joints Based on Quantified Surface Description: *Springer-Verlag*, 1-20.
- Hencher, S. and Richards, L.R., 2014, Assessing the shear strength of rock discontinuities at laboratory and field scales: *Springer-Verlag*, 48, 883-905.
<https://doi.org/10.1007/s00603-014-0633-6>
- Luz Martínez, J.C., 2019, Determinación del deterioro de núcleos de ignimbritas a través de ensayos en laboratorio: Tesis de Maestría, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*.
- Muralha, J., Grasselli, G., Tatone, B., Blümel, M., Chryssanthakis, P. and Yujing, J., 2014, ISRM suggested method for laboratory determination of the shear strength of rock joints: revised version: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(1), 291-302.
<https://doi.org/10.1007/s00603-013-0519-z>
- Xia, C.C., Tang, Z.C., Xiao, W.M. and Song, Y.L., 2014, New peak shear strength criterion of rock joints based on quantified surface description: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(2), 387-400.
<https://doi.org/10.1007/s00603-013-0395-6>



Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Ajuste de curvas a los datos de caracterización físico-mecánica de la roca ignimbrita

Fitting curves to physical-mechanical characterization data of ignimbrite rock

Marco A. Navarrete-Seras,* Elia. M. Alonso-Guzmán, Wilfrido Martínez-Molina, Hugo L. Chávez-García, Mauricio Arreola-Sánchez, Jorge A. Borrego-Pérez, Cindy Lara-Gómez, Ramiro Silva-Orozco y Carlos A. Júnez-Ferreira.

Para citar este artículo: Navarrete-Seras Marco A., Alonso-Guzmán Elia. M., Martínez-Molina Wilfrido, Chávez-García Hugo L., Arreola-Sánchez Mauricio, Borrego-Pérez Jorge A., Lara-Gómez Cindy, Silva-Orozco Ramiro y Júnez-Ferreira Carlos A., 2023. Ajuste de curvas a los datos de caracterización físico-mecánica de la roca ignimbrita. Ciencia Nicolaita no. 87, 99-107. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.659>



Historial del artículo:

Recibido: 25 de mayo de 2022
Aceptado: 26 de octubre de 2022
Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: marcoantonionavarreteseras@gmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Ajuste de curvas a los datos de caracterización físico-mecánica de la roca ignimbrita

Fitting curves to physical-mechanical characterization data of ignimbrite rock

Marco A. Navarrete-Seras,^{1*} Elia. M. Alonso-Guzmán,^{1,2} Wilfrido Martínez-Molina,¹ Hugo L. Chávez-García,¹ Mauricio Arreola-Sánchez,¹ Jorge A. Borrego-Pérez,¹ Cindy Lara-Gómez,¹ Ramiro Silva-Orozco¹ y Carlos A. Júnez-Ferreira.¹

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Morelia, México

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Arquitectura, Morelia, México

Resumen

La presente investigación se centra en el estudio de las canteras de ignimbrita con las que actualmente se realizan las restauraciones en Morelia, Michoacán, México; asimismo, se obtuvieron resultados de muestras de roca con las que se construyeron algunos edificios y otras de canteras que actualmente se encuentran cerradas. Resulta interesante, que al obtener los datos de las diferentes pruebas físico-mecánicas y compararlas, se obtenga un buen modelo matemático mediante el ajuste de curvas a los datos de las pruebas, lo que permite estimar el $Is(50)$, que es un índice de clasificación mecánica de la roca, obteniendo un coeficiente de correlación múltiple R^2 igual a 0.82 bastante adecuado. Se realizó la prueba de partículas alargadas y lajeadas, permitiendo entender la mecánica de falla del material.

Palabras clave: roca, ignimbrita, ajuste de curvas, pruebas físico-mecánicas, modelo matemático

Abstract

The present investigation focuses on the study of the ignimbrite quarries with which restorations are currently carried out in Morelia, Michoacán, México. In addition, results were obtained from samples of stone used in the construction of some buildings and other quarries that are currently closed. Interestingly, when obtaining the data from the different physical-mechanical tests and comparing them a good mathematical model is obtained by fitting the test data to a curve, which allows estimation the $Is(50)$, which is a mechanical classification index of the stone, obtaining a multiple correlation coefficient R^2 equal to 0.82, which is quite adequate. The test of elongated and slanted particles was carried out, allowing us to understand the failure mechanics of the material.

Keywords: stone, ignimbrite, curve fitting, physical-mechanical tests, mathematical model



1. Introducción

A lo largo del tiempo, el hombre ha trabajado con las rocas. En un principio tuvo la necesidad de tallarlas para obtener instrumentos que le permitieran cazar animales para su alimentación; asimismo, la utilizaron como viviendas: las denominadas cavernas.

Por otra parte, en las construcciones civiles las rocas siempre se han utilizado. Es importante mencionar que una construcción civil consta de superestructura y subestructura —también conocida como cimiento—, esta última transmite las cargas de la estructura al basamento. Para proyectar y construir la parte de la superestructura, es necesario conocer las propiedades de los materiales que serán empleados, ya que el basamento está directamente relacionado con la roca y el suelo, por lo que tal conocimiento es crucial para cualquier construcción.

En la actualidad existen canteras de ignimbrita ubicadas en Michoacán, de donde se extrajeron las muestras conocidas como matriz rocosa, de las cuales se obtuvieron sus propiedades físicas y mecánicas. Parte de estos estudios se engloban en la ingeniería de mecánica de rocas que es una ciencia de ingeniería interdisciplinaria que requiere la interacción entre las ciencias físicas, matemáticas y geológicas con la ingeniería civil, petrolera y minera. La ingeniería de mecánica de rocas existe desde principios de los 50 y se convirtió en una disciplina independiente en los 60 (Aadnøy & Looyeh, 2019).

Los depósitos de flujo piroclástico, conocidos como tobas de flujo de ceniza o ignimbritas, son materiales invaluable para estudios paleomagnéticos, con muchas aplicaciones para fines geológicos y tectónicos (Agrò *et al.*, 2017). Diversos autores han estudiado las ignimbritas, por ejemplo, Pola *et al.* (2012) describieron en detalle las propiedades físicas de algunas rocas volcánicas meteorizadas/alteradas y su variación con el grado de alteración, a la vez que realizaron una serie de pruebas para identificar y cuantificar la degradación progresiva de las propiedades. Cabe señalar que aparte de otras rocas, se realizó el estudio en depósitos de ignimbrita no soldada. Alonso-Guzmán *et al.* (2021) realizaron un estudio de las propiedades físicas y mecánicas de diferentes canteras de ignimbrita de Tlalpujahuá, Michoacán, México. Aygun *et al.*

(2016) estudiaron cuatro tipos de ignimbrita (amarillo claro, amarillo, negro y blanco) y piedra pómez de la región de Ahlat, aplicando el método EPR (Electronic Paramagnetic Resonance, Resonancia Paramagnética Electrónica) para determinar sus propiedades magnéticas. Además, mencionaron que los materiales naturales como las ignimbritas se prefieren comúnmente no solo en lugares históricos, sino también en casas o en diferentes tipos de edificios en todo el mundo. Jeong *et al.* (2021) se centraron en comprender mejor los procesos eruptivos y de depósito de la toba Kusan-dong del Cretácico, que es una ignimbrita silícica de varios metros de espesor y lateralmente extensa en Corea. Özvan *et al.* (2015) revelaron las propiedades mineralógicas, petrográficas, petrofísicas y mecánicas de las ignimbritas frescas, a la vez que determinaron el efecto de los líquenes y la capilaridad en el deterioro de las lápidas selyúcidas de acuerdo con estudios de laboratorio y observaciones de campo. Alonso y Martínez (2003) estudiaron las ignimbritas retiradas de la catedral de Morelia, Michoacán, México, durante una intervención de restauración, obteniendo las propiedades mecánicas, químicas y físicas de los bloques de ignimbrita de las cuatro fachadas y la ba-laustrada de la catedral, las cuales compararon con las propiedades correspondientes a los bloques “sanos” de canteras cercanas, utilizadas en la actualidad para restauración de monumentos históricos. Korkanç (2013) determinó las propiedades de ingeniería y el deterioro de piedras ampliamente utilizadas en los diferentes edificios históricos en la región de Nigde que forma el límite sur de Capadocia. Para ello tomó muestras de bloques (dos de mármol, dos de travertino, seis de toba, cinco de ignimbrita y uno de andesita) que fueron extraídos —de acuerdo con los permisos obtenidos— de piedras que habían caído de los edificios y que no pudieron ser utilizadas nuevamente como parte de ninguna restauración.

En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo investigar el índice de carga puntual de algunas canteras de ignimbrita provenientes de diferentes lugares de la región Michoacán, México (Figura 1).

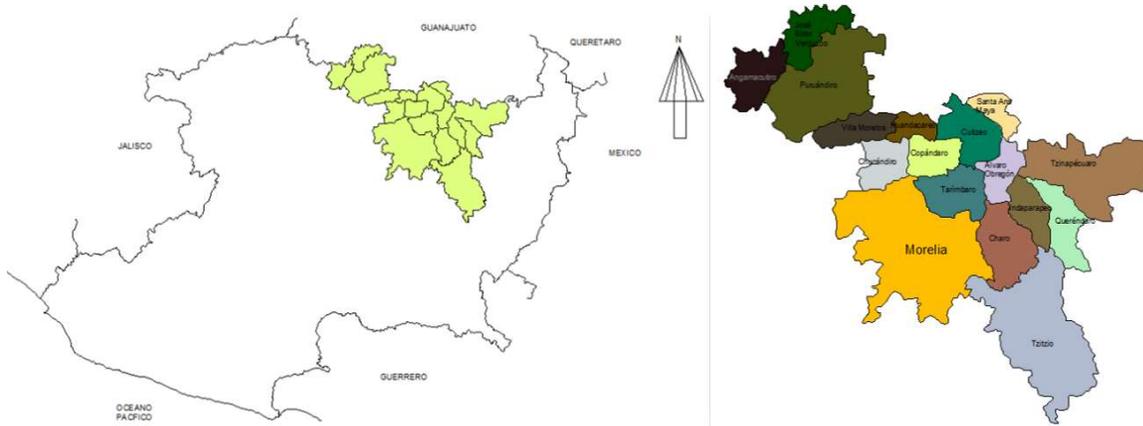


Figura 1. Localización de la región en estudio.

Debido a que Morelia es una ciudad colonial, con frecuencia se utiliza roca como la ignimbrita en la construcción (Figura 2), por esta razón, estudiar diferentes canteras permitirá conocer su comportamiento para determinar cuál es la más adecuada; de igual manera, conocer su compresión uniaxial en fragmentos sin labrar reduce los costos. Para la caracterización mecánica de los fragmentos de roca o material pétreo, que impiden el labrado en muestras cúbicas o cilíndricas y cuya resistencia a compresión uniaxial es muy importante determinar para diseñar y calcular el porcentaje que debe ir inmerso en matrices cerámicas, poliméricas, arcillosas o asfálticas, se utilizó el equipo Point Load, ASTM D 5731-16 (D18.12, 2016), cuya prueba permite clasificar y estimar la resistencia a compresión uniaxial de fragmentos irregulares de roca. Este trabajo presenta los resultados obtenidos de manera experimental en rocas ígneas, naturales y reducidas de tamaño y con casi cualquier morfología,



Figura 2. Roca ignimbrita del Acueducto de Morelia, Michoacán, México.

pero diámetros promedios del orden de hasta cuatro pulgadas.

2. Metodología

Se llevaron muestras de roca de diferentes canteras al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), como se detalla a continuación: Tlalpujahuá, Arindeo, Cointzio y algunas otras se obtuvieron del parque ecológico, Exconvento de Tiripetío y Ciudad Industrial. A las muestras se les realizaron pruebas físicas y mecánicas, prueba de partículas alargadas y lajeadas. Con los datos obtenidos, se realizó un análisis multivariable para predecir el índice de carga puntual en fragmentos de roca de tres canteras de ignimbrita muy utilizadas en la región.

2.1 Absorción

El procedimiento consiste en secar las muestras en el horno a una temperatura de $110 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas; posteriormente, se dejan enfriar y se pesan (p_s = peso seco); una vez hecho esto, las muestras se saturan en un recipiente con agua durante 24 horas como mínimo; después, las muestras se retiran del agua y se secan superficialmente con un lienzo o frañela y se pesan (p_h) (D18.12, 2015; Navarro *et al.*, 2011).

2.2. Densidad

El objetivo es determinar la densidad de la roca, para ello, el procedimiento consiste en marcar la



Figura 3. Equipo de ensayo de carga puntual y las partes que lo componen.

muestra o numerarla para identificarla; a continuación se deja saturar en el agua durante un periodo de 24 horas; después se procede a secar superficialmente y se registra su peso húmedo (W en gramos); posteriormente, se llena con agua el picnómetro y se coloca dentro la muestra de roca; finalmente, el volumen de agua desalojado (V en centímetros cúbicos) es medido con una probeta (D18.12, 2015; Navarro *et al.*, 2011).

2.3 Gravedad específica

El procedimiento consiste en secar las muestras en el horno a una temperatura de $110 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, dejar enfriar y pesar (p_s = peso seco), poner a saturar en agua durante 24 horas y después se pesan lo que permite obtener el peso superficial seco (p_{ss}), después se colocan en una canastilla adaptada en la báscula y se sumergen en agua, finalmente se obtiene el peso sumergido (p_a) (D18.12, 2015; Navarro *et al.*, 2011).

2.4. Ensayo de carga puntual

De acuerdo con la Norma D 5731-16 de la ASTM, el objetivo de esta prueba es determinar la resistencia de las rocas al someterlas a cargas puntuales que se aplican mediante un par de piezas cónicas (Figura 3). Es una prueba de índice y está destinada a ser utilizada para clasificar y caracterizar la roca. Esta prueba de carga puntual se realiza sometiendo una muestra de roca a una carga cada vez más concentrada, hasta que el fallo se produce por la división de la muestra. Este ensayo permite determinar el índice de resistencia de carga puntual no corregido (I_s). Este debe ser corregido al diámetro equivalente estándar $De = 50 \text{ mm}$. Si

el diámetro del espécimen está cerca de 50 mm (como con los núcleos NX), la corrección no es necesaria. El procedimiento para la corrección por tamaño puede ser obtenido gráficamente o matemáticamente por los procedimientos definidos por el ISRM, para obtener el valor para el $I_s(50)$ en MPa (D18.12, 2016).

2.5 Partículas alargadas y lajeadas de materiales pétreos para mezclas asfálticas, N-CMT-4-04

Esta prueba permite determinar el contenido de partículas alargadas y lajeadas presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en separar el retenido de la malla N° 4 de una muestra de materiales pétreos, para determinar la forma de cada partícula, empleando calibradores de espesor y de longitud (Figuras 4 y 5).

$$C_a = \left(\frac{m_a}{M} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde C_a es por ciento en masa de partículas en forma alargada (%); m_a es masa de las partículas con forma alargada, determinada en cada una de las muestras de prueba, según corresponda en g; y M es masa total de la muestra para cada una de las muestras de prueba, es decir, M_1 o M_2 según corresponda en g (IMT, 2002).

Se calcula el porcentaje de las partículas en forma de laja, con relación a la masa de la muestra de prueba utilizada, empleando la Ecuación 2.

$$C_p = \left(\frac{m_e}{M} \right) \times 100 \quad (2)$$



Figura 4. Partículas que pasan por el calibrador de espesores.



Figura 5. Partículas que no pasan por el calibrador de longitudes.

Donde C_p es por ciento en masa en forma de laja (%); m_e es la masa de las partículas con forma de laja, determinada en cada una de las muestras de prueba según corresponda; y M es masa total de la muestra en g (Figura 6). En caso que se presente una variación entre los cálculos del contenido con forma alargada (C_a) igual al 20% o mayor entre una muestra y otra, se considera para el cálculo del resultado de la prueba el promedio de ambas; en caso contrario, se considera el valor que resulta mayor, lo mismo para el contenido de partículas en forma de laja (C_p). Se reportan los contenidos de partículas alargadas y lajeadas, considerando lo indicado anteriormente; asimismo, se reporta como resultado de la prueba el porcentaje en masa de partículas alargadas y lajeadas, como la suma de C_a más C_p (IMT, 2002).

2.6 Ajuste de curvas

Los métodos de ajuste se agrupan en dos tipos: gráficos y numéricos. Los residuos gráficos y los límites de predicción son métodos gráficos que ayudan a la visualización y a la interpretación, mientras que las estadísticas de bondad de ajuste y los límites de coeficiente y confianza, se calculan y dan como resultado medidas numéricas que ayudan al razonamiento estadístico. Después de usar métodos gráficos, se analizó R^2 que es el cuadrado de la correlación entre los valores de respuesta y los valores de respuesta predichos, también llamado el cuadrado del coeficiente de correlación múltiple y el coeficiente de determinación múltiple (The MathWorks Inc., 2020). El software Curve Fitting Toolbox, de Matlab, utiliza el método de mínimos cuadrados al ajustar datos. El ajuste requiere un



Figura 6. Muestra de Tlalpujahuia en fracciones más pequeñas.

modelo paramétrico que relacione los datos de respuesta con los datos del predictor con uno o más coeficientes. El resultado del proceso de ajuste es una estimación de los coeficientes del modelo. Para obtener las estimaciones de coeficientes, el método de mínimos cuadrados minimiza el cuadrado sumado de los residuos. El residual para el i -ésimo punto de datos r_i se define como la diferencia entre el valor de respuesta observado y_i y el valor de respuesta ajustado \hat{y} , y se identifica como el error asociado con los datos.

Para obtener R^2 es necesario obtener la suma de cuadrados debido a un error (SSE) por la Ecuación 3.

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \underline{y})^2 \tag{3}$$

Donde w_i son los pesos y n es el número de puntos de datos incluidos en el ajuste. Los pesos determinan cuánto influye cada valor de respuesta en las estimaciones finales de los parámetros. El R^2 es el cuadrado

de la correlación entre los valores de respuesta y los valores de respuesta pronosticados, también llamado el cuadrado del coeficiente de correlación múltiple y el coeficiente de múltiplo. R^2 se define como la razón de la suma de cuadrados de la regresión (SSR) y la suma total de cuadrados (SST) (Ecuación 4).

$$SST = \sum_{i=1}^n w_i (\hat{y} - \underline{y})^2 \quad (4)$$

Donde $SST = SSR + SSE$. R^2 está dada por la Ecuación 5:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (5)$$

R^2 puede tomar cualquier valor entre 0 y 1, con un valor más cercano a 1 que indica que el modelo presenta una mayor proporción de varianza. En estadística RMSE (Root Mean Squared Error, Error Cuadrático Medio), también se conoce como error estándar de ajuste y error estándar de la regresión. Es una estimación de la desviación estándar del componente aleatorio en los datos y se define como:

$$RMSE = s = \sqrt{MSE} \quad (6)$$

$$MSE = \frac{SSE}{v} \quad (7)$$

Donde MSE es el error cuadrático medio o el cuadrado medio residual.

Esta estadística utiliza R^2 y lo ajusta en función de los grados de libertad residuales. Los grados de libertad residuales se definen como el número de valores de respuesta n menos el número de coeficientes ajustados m estimados a partir de los valores de respuesta; v es $m - n$, v e indica el número de piezas de información independientes que implican los n puntos de datos que se requieren para calcular la suma de cuadrados. Si los parámetros están acotados y una o más de las estimaciones están en sus límites, entonces esas estimaciones se consideran fijas. Los grados de libertad se incrementan con el número de tales parámetros.

Al igual que con el SSE, un valor de MSE más cercano a 0 indica un ajuste que es más útil para la predicción (The MathWorks Inc., 2020).

3. Resultados y discusiones

La Figura 7 muestra los promedios de las muestras de cada cantera para cada una de las pruebas. Se observa que la densidad y la gravedad específica siguen un comportamiento similar. Para la ignimbrita de Tlalpujahua, el porcentaje de humedad de absorción es de 15.67% y tiene un $Is(50)$ alto. Cuando el porcentaje de humedad de absorción es alto, existen resistencias bajas, como la ignimbrita de Cointzio y la ignimbrita de Arindeo. Los bancos de ignimbrita de Tlalpujahua, Cointzio y Arindeo son las rocas que se utilizan actualmente en la región Morelia.

Los resultados del ajuste de la curva a los datos (Figura 8) muestra una correlación entre el índice de carga puntual, el porcentaje de humedad de absorción y la densidad, en este caso se estimó R^2 igual a

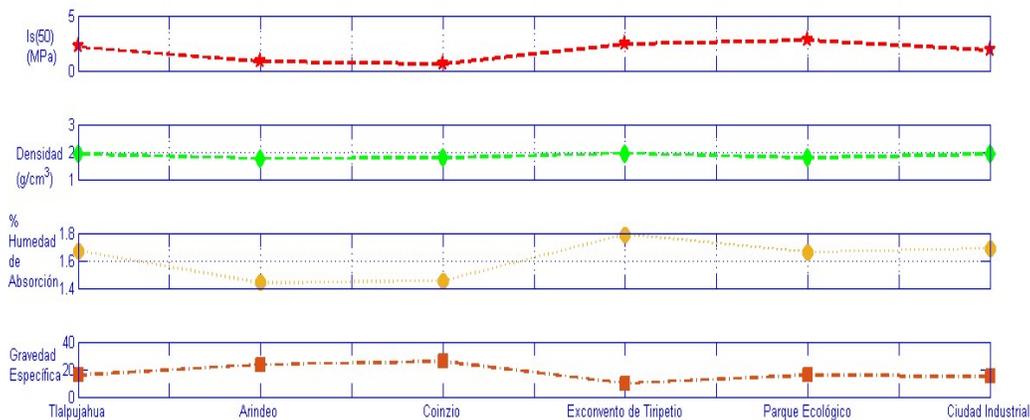


Figura 7. Resultados de las propiedades físicas de las rocas en estudio.

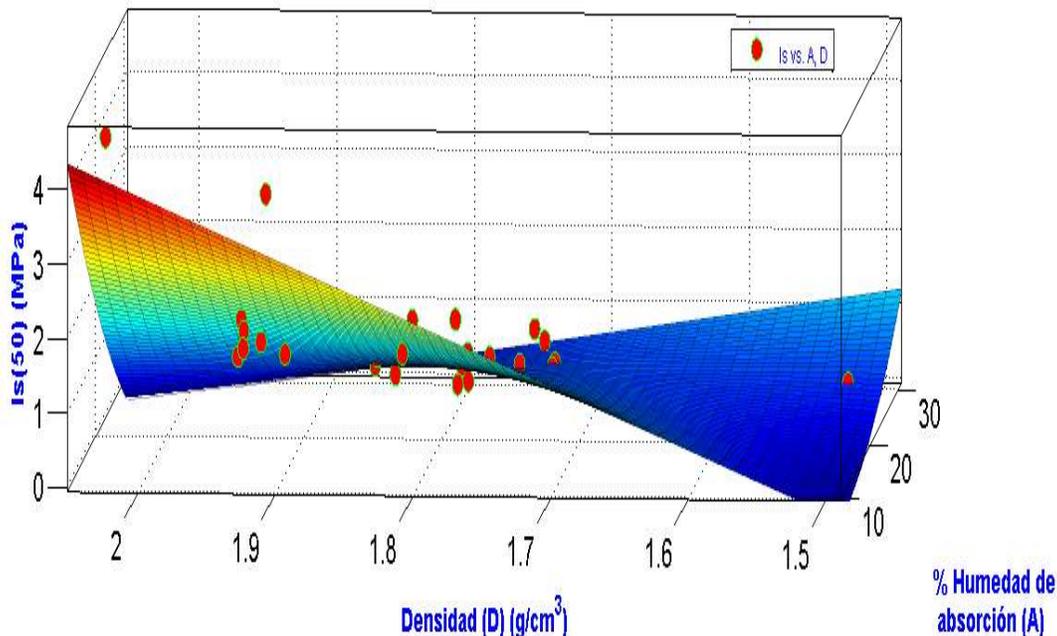


Figura 8. Curva de ajuste polinomial para los datos obtenidos de las pruebas realizadas a las rocas ignimbritas de Tlalpujahua, Arindeo y Coitzio.

0.82, el ajuste se realizó mediante una superficie polinomial debido a que con ella se obtuvo el mejor R^2 y la bondad del ajuste además del modelo (Tabla 1). Para interpretar el coeficiente de correlación se han dado las siguientes pautas generales: valores de R de 0.00 a 0.25 implica que no existe correlación entre ambas variables, valores de R de 0.25 a 0.50 implican una correlación de baja a moderada, valores de R de 0.50 a 0.75 implica una correlación de moderada a buena y un valor de $R \geq 0.75$ implica una correlación de muy buena a excelente (Figuroa Montañó *et al.*, 2014). De acuerdo con lo anterior, el modelo obtenido en este trabajo tiene un coeficiente de correlación de bueno a excelente, debido a que R es igual 0.91 (raíz cuadrada de R^2).

Tabla 1

Modelo matemático para estimar el $Is(50)$ de las ignimbritas de Tlalpujahua, Arindeo y Coitzio.

Modelo matemático	
$Is(50)(A, D) = -19.48 + 0.714A + 12.84D + 0.00325A^2 - 0.5219(A)(D) + 0.1602D^2$	
Bondad de Ajuste	
SSE	5.52
R^2	0.82
RMSE (Error cuadrático medio)	0.47

Tabla 2

Partículas en forma de laja para las muestras fragmentadas de Tlalpujahua.

Muestra	$M(g)$	$m_e(g)$	$C_p (%)$
1	2008.2	4774	23.77

Tabla 3

Partículas en forma alargada para las muestras fragmentadas de Tlalpujahua.

Muestra	$M(g)$	$m_a(g)$	$C_a (%)$
1	2008.2	293.6	14.62

Las tablas anteriores muestran que para las muestras fragmentadas de Tlalpujahua existen porcentajes bajos tanto de partículas en forma de laja y partículas en forma alargada (Tablas 2 y 3), lo anterior indica que la mecánica de falla tiene un comportamiento uniforme en la mayoría de las muestras y existen partículas más redondeadas.

4. Conclusiones

Las correlaciones entre el índice de carga puntual, porcentaje de humedad de absorción y densidad, permiten conocer el comportamiento de la roca. Es un modelo matemático aceptable (R^2 igual a 0.82), ya que podemos utilizarlo para estimar el $Is(50)$, sobre todo

porque son rocas que constantemente se utilizan en la restauración de monumentos históricos.

La ignimbrita de Tlalpujahua es la que mejor comportamiento mecánico presenta, ya que como se pudo ver en la Figura 7, la densidad fue de 2 g/cm³ y *I_s(50)* en promedio 2.5 MPa, lo que indica que es una roca que se encuentra en buenas condiciones, sana y no intemperizada.

En cuanto a las partículas alargadas y lajeadas, los resultados indican una mecánica de falla buena; sin embargo, se deben comparar estos resultados con otros materiales pétreos y analizar sus porcentajes en cuanto a partículas alargadas y lajeadas.

Se deben seguir haciendo estudios, ya que la caracterización de la roca nos lleva a conocer su comportamiento mecánico, lo que permite tomar decisiones que lleven a construir y cimentar obras civiles con la mejor calidad, además de dar un panorama geotécnico más amplio sobre los problemas que se presentan en la obra.

La ciudad de Morelia cuenta con numerosos edificios históricos construidos con roca como la ignimbrita; el deterioro de estas edificaciones es evidente debido al paso del tiempo, por lo cual resulta importante conocer las propiedades mecánicas de la roca para realizar las restauraciones y reposiciones, cuidando su funcionalidad y su apariencia.

Agradecimientos

Los autores agradecen a: Proyectos CIC en la UMSNH; CONACYT, Proyecto 321260: Desarrollo de un modelo de producción social replicable para la vivienda y el hábitat; SEP-Prodep; Laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas”, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.

Referencias

Aadnøy, B.S., and Looyeh, R., 2019, “Introduction to Petroleum Rock Mechanics”, in Bernt S. Aadnøy and Reza Looyeh, *Petroleum Rock Mechanics*, Elsevier Inc., pp. 65-76. ISBN 978-0-12-815903-3. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815903-3.00006-6>

Agrò, A., Zanella, E., Le Pennec, J.-L. and Temel, A., 2017, Complex remanent magnetization in the Kızilkaya ignimbrite (central Anatolia): Implication for paleomagnetic directions: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 336, 68-80. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.02.007>

Alonso-Guzmán, E.M., Navarrete-Seras, M.A., Martínez-Molina, W., Chávez-García, H.L., Lara-Gómez, C. and García-Perdomo,

J.C., 2021, Study of the physical-mechanical properties of igneous stones from Tlalpujahua Michoacan, Mexico: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1150(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1150/1/012021>

Alonso, E. and Martínez, L., 2003, The role of environmental sulfur on degradation of ignimbrites of the Cathedral in Morelia, Mexico: *Building and Environment*, 38(6), 861-867. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00023-4](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00023-4)

Aygun, Z. and Aygun, M., 2016, Spectroscopic analysis of Ahlat stone (ignimbrite) and pumice formed by volcanic activity: *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 166, 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.05.018>

D18.12, A.S., 2015, Standard Test Method for Laboratory Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate ASTM C127-04. American Society for Testing Materials (ASTM).

D18.12, A.S., 2016, Standard: D 5731-16. Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock.

Figuroa Montaña, A., Ramírez Sánchez, H.U., and Alcalá Gutiérrez, J., 2014, Introducción a la metodología experimental: *Pearson Educación*.

IMT, (2002, MMP. Métodos de Muestreo y prueba de Materiales. Capítulo 005 partículas alargadas y lajeadas de materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas.

Jeong, J.O., Ahn, H.-S., Son, M., Cho, H. and Sohn, Y.K., 2021, Eruptive and depositional processes of a low-aspect-ratio ignimbrite (the Southern Kusandong Tuff, South Korea) inferred from magnetic susceptibility variability: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 419, 107374. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107374>

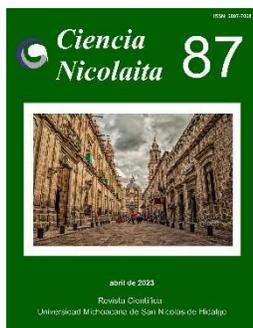
Korkanç, M., 2013, Deterioration of different stones used in historical buildings within Nigde province, Cappadocia: *Construction and Building Materials*, 48, 789-803. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.033>

Navarro, L., Martínez, W. and Espinoza, A., 2011, Análisis de Materiales, Manual de Análisis de Materiales, Resistencia de Materiales (FIC-UMSNH (ed.)).

Özvan, A., Dinçer, İ., Akın, M., Oyan, V. and Tapan, M., 2015, Experimental studies on ignimbrite and the effect of lichens and capillarity on the deterioration of Seljuk Gravestones: *Engineering Geology*, 185, 81-95. <https://doi.org/10.1016/j.eng-geo.2014.12.001>

Pola, A., Crosta, G., Fusi, N., Barberini, V. and Norini, G., 2012, Influence of alteration on physical properties of volcanic rocks: *Tectonophysics*, 566-567, 67-86. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.07.017>

The MathWorks Inc., 2020, Curve Fitting Toolbox™ User's Guide R2017b.



Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Remoción de contaminantes del agua en humedales artificiales de flujo subsuperficial, utilizando *Typha domingensis*, tezontle y grava triturada y su relación con la conductividad hidráulica

Removal of water contaminants in artificial wetlands of subsurface flow, using *Typha domingensis*, tezontle and crushed gravel and their relationship with hydraulic conductivity

Roberto García-Acevedo,* Ezequiel García-Rodríguez y Norma Erika Pérez-Amezcu

Para citar este artículo: García-Acevedo Roberto, García-Rodríguez Ezequiel y Pérez-Amezcu Norma Erika, 2023. Remoción de contaminantes del agua en humedales artificiales de flujo subsuperficial, utilizando *Typha domingensis*, tezontle y grava triturada y su relación con la conductividad hidráulica. Ciencia Nicolaita no. 87, 108-120. DOI:

<https://doi.org/10.35830/cn.vi87.660>



Historial del artículo:

Recibido: 25 de mayo de 2022

Aceptado: 25 de octubre de 2022

Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: roberto.garcia@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Remoción de contaminantes del agua en humedales artificiales de flujo subsuperficial, utilizando *Typha domingensis*, tezontle y grava triturada y su relación con la conductividad hidráulica

Removal of water contaminants in artificial wetlands of subsurface flow, using *Typha domingensis*, tezontle and crushed gravel and their relationship with hydraulic conductivity

Roberto García-Acevedo,* Ezequiel García-Rodríguez y Norma Erika Pérez-Amezcu

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Morelia, Michoacán

Resumen

El tratamiento de aguas residuales es una problemática que conviene abordarse mediante humedales artificiales debido a sus bajos costos, particularmente en el caso de localidades de baja densidad poblacional. En esta investigación se utilizaron humedales artificiales de flujo subsuperficial, construidos en terrenos del Centro de Información, Arte y Cultura de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, con material de soporte de tezontle y grava triturada, vegetados con *Typha domingensis*. Respecto a la NOM-001-SEMARNAT-1996, en cuanto a la temperatura, pH, DBO₅, SST y SSed presentes en el efluente, ambos humedales cumplen, por lo que la conductividad hidráulica no resulta determinante; sin embargo, la remoción es mayor con tezontle como material de soporte que con grava triturada.

Palabras clave: humedal artificial, tratamiento de agua residual, *Typha domingensis*, tezontle, grava triturada

Abstract

Wastewater treatment is a problem that should be addressed with artificial wetlands as they are a viable alternative because of their low costs, particularly in the case of low density populations. In this work, artificial subsurface flow wetlands were used. Those artificial wetlands were constructed at Information, Art and Culture Center of the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, with tezontle and crushed gravel as substrate, and vegetated with *Typha domingensis*. Regarding NOM-001-SEMARNAT-1996, in terms of temperature, pH, BOD₅, SST, and SSed present in the effluent, both wetlands comply, so hydraulic conductivity is not decisive; however, removal is greater with tezontle as a substrate than with crushed gravel.

Keywords: artificial wetlands, water treatment, *Typha domingensis*, tezontle, crused gravel

Introducción

En las últimas décadas, a nivel global, la creciente preocupación sobre el deterioro del medio ambiente ha llevado al estudio y desarrollo de nuevas alternativas para minimizar el impacto ambiental que causan las actividades humanas, siendo el agua uno de los recursos naturales más afectados. El crecimiento de la población y, por lo tanto, del consumo del vital líquido para diferentes usos, ha propiciado que se declare la veda en numerosas cuencas hidrográficas.

Cubrir adecuadamente los requerimientos de agua, constituye un reto cada vez mayor que hace necesario tratar las aguas residuales para reincorporarlas a los usos pertinentes. La construcción y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, que requieren energía eléctrica y equipos electromecánicos costosos para su funcionamiento, se ve limitada por los recursos económicos disponibles (Lahera, 2010; Rojas, 2012), por lo tanto, una alternativa es la construcción de humedales artificiales.

La vida útil de los humedales artificiales depende del diseño, construcción y mantenimiento correspondiente; la disminución de la conductividad hidráulica en los medios de soporte determina la forma y el tiempo en que se debe realizar dicho mantenimiento.

La disminución de la conductividad hidráulica está asociada a fenómenos hidráulicos que derivan en la colmatación del interior del humedal, y que se debe a la acumulación de partículas finas en el material filtrante, por ejemplo, partículas que forman lodos debido a las elevadas concentraciones de sólidos en suspensión, así como aceites y grasas en las aguas a tratar, haciendo deficiente el funcionamiento de las etapas del tratamiento.

Objetivo: la finalidad del presente trabajo fue estudiar la evolución de la disminución de la conductividad hidráulica en humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS), realizando el estudio de dos diferentes medios de soporte y su efecto en la remoción de contaminantes del agua, utilizando la planta *Typha domingensis* en ambos casos; lo anterior con el propósito de realizar dos análisis comparativos: el primero cuando el medio de soporte está constituido por tezontle y el segundo cuando el medio de soporte está

constituido por grava triturada, con la fin de determinar cuál alternativa es mejor para implementar en este tipo de sistemas.

Pertinencia del uso de humedales artificiales

Una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales son los humedales artificiales, los cuales se utilizan ya sea de manera individual o combinada con otros procesos. De acuerdo con el Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento, en México existen 2 337 plantas en operación, de las cuales 211 (11.08% del total) corresponden a humedales artificiales, lo que indica la importancia del desarrollo de esta alternativa de tratamiento de aguas residuales, tanto en áreas rurales como en ciudades con caudales a tratar de hasta 120 litros por segundo (CONAGUA, 2015).

En el tratamiento de aguas residuales, los humedales artificiales son una alternativa viable debido a sus bajos costos de construcción y operación, lo que los convierte en una opción atractiva para aplicarla en localidades de baja densidad poblacional y donde exista disponibilidad suficiente de terreno, como suele ser el caso de las zonas rurales. En estos sistemas de tratamiento, la vegetación hidrófita emergente es la encargada de remover contaminantes, junto con el material de soporte: sustrato y zooglea, esta última que eventualmente se va formando con la zona de la rizosfera, y que contribuyen a la remoción mencionada; sin embargo, paulatinamente se van saturando y, por lo tanto, se va reduciendo su conductividad hidráulica, lo que representa una disminución en la eficiencia de remoción de contaminantes (Ferreyra, 2019).

Generalidades de los humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS)

En estos humedales el agua a tratar circula a través de un material granular (arena, gravilla, grava) de permeabilidad suficiente, confinado en un recinto impermeabilizado y que sirve de soporte para el enraizamiento de la vegetación. “Los HAFSS son instalaciones generalmente de menor tamaño comparados con los humedales artificiales de flujo superficial (HAFS), y

que en la mayoría de los casos se emplean para el tratamiento de las aguas residuales generadas en núcleos de poblaciones de menos de 2 000 habitantes” (Salas *et al.*, 2006, en Delgadillo *et al.*, 2010).

Ventajas de los HAFSs:

- Menor área de terreno en comparación a los humedales de flujo superficial (HAFS).
- No hay problemas de aparición de olores.
- No hay presencia de mosquitos.
- Mejor respuesta ante los descensos de temperatura ambiental.

Desventajas de los HAFSs:

- Mayores costos en su construcción al colocar el material de soporte.
- Mayores riesgos de colmatación del material de soporte.

En los HAFSs, de flujo horizontal, el agua residual se trata a medida que fluye a través de un medio poroso. La profundidad del lecho varía entre 0.45 m y 1 m, con pendiente de entre 0.5% y 1%. El agua residual que ingresa al sistema se mantiene en un nivel inferior al de la superficie (5-10 cm), lo que se logra regulando el nivel del dispositivo de salida (Delgadillo *et al.*, 2010). El agua circula horizontalmente de un extremo a otro del sistema; este tipo de humedales operan inundados permanentemente, por lo que el ambiente para la depuración es mucho más reductor que en los sistemas verticales (Figura 1).

Typha domingensis

Typha domingensis es el nombre científico de la planta que pertenece a la familia typhaceae, también es conocida con nombres comunes como espadaña,

tule, masa de agua, cola de gato, entre otros. Es una especie perenne, originaria de Europa, Asia y América. Su altura puede alcanzar más de tres metros, posee un color moreno claro, con una o más brácteas foliáceas caducas. En cuanto a sus hojas, espigas y frutos/semillas, Vibrans (2009) describe que:

Generalmente igualando o excediendo la altura de las espigas, parte superior de las vainas atenuada hacia la lámina, generalmente asimétricas, pero algunas veces simétricas, epidermis de la superficie ventral (hacia dentro) conteniendo gran cantidad de glándulas mucilaginosas de color oscuro, dispuestas en líneas longitudinales y comúnmente extendiéndose hacia la base de la lámina, láminas hasta de 1.5 m de largo y de 0.8 a 1.3 cm de ancho, envés ligeramente convexo cerca de la vaina y plano hacia el ápice, que es agudo.

Espigas masculinas hasta de 42 cm de largo y 1.5 cm de ancho y en general separadas de las femeninas por 0.7 a 5 cm, bractéolas de las flores masculinas filiformes a espatuladas, simples a ramificadas, algunas veces con incisiones que forman segmentos largos, frecuentemente coloreadas con puntos morenos en el ápice, de 2.5 a 3.5 mm largo, estambres de 2 a 4 total o parcialmente soldados, filamentos de 1 a 2.5 mm de largo, anteras de 2 a 3 mm de largo y 0.15 a 0.2 mm de ancho, conectivo generalmente obtuso y algunas veces con una punta corta y aguda, polen arreglado en mónadas; espigas femeninas hasta de 48 cm de largo y 2 cm de diámetro, flores femeninas con bractéolas largas y delgadas, acuminadas en el

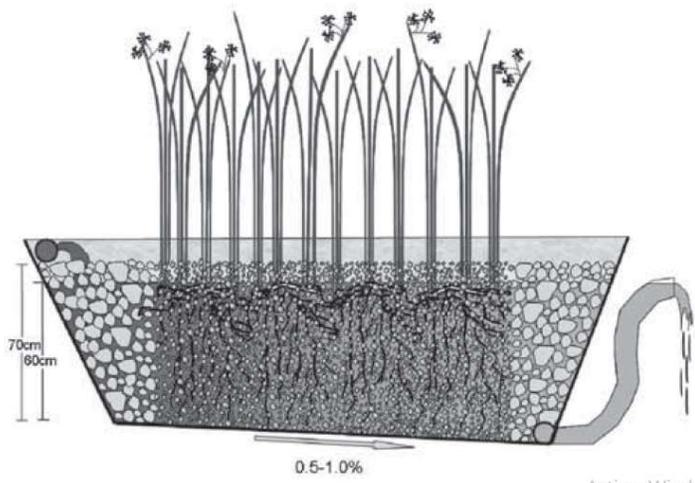


Figura 1. Corte longitudinal de un humedal de flujo subsuperficial horizontal (Delgadillo *et al.*, 2010).

ápice, más largas que los pelos del ginóforo (estructura que levanta al ovario), de color moreno claro en el ápice, de 3 a 5 mm de largo, pelos del ginóforo ligeramente coloreados en la punta y más cortos que los estigmas, ovario fusiforme (con extremos que se alargan y la parte media ancha), estilo de 1 a 2 mm de largo, estigma largo y delgado, de 0.5 a 1.5 mm de largo. Frutos y semillas: Fruto fusiforme, de 1 a 1.5 mm de largo.

Typha domingensis es una especie que requiere medios amplios para su desarrollo y reproducción, por ello, se le caracteriza como especie que crece en zonas amplias, pero al mismo tiempo limitadas por sus cuerpos de agua, donde se lleva a cabo su desarrollo y reproducción. Puede ser utilizada en humedales que se han construido para el tratamiento de efluentes con alta salinidad y pH, características comunes de efluentes industriales (Mufarregé, 2012). También se ha utilizado en espacios adaptados para el tratamiento de efluentes, diseñando el hábitat adecuado para el desarrollo de la especie, así como para el proceso del tratamiento de los efluentes, ya sean industriales o de pequeñas poblaciones. Se ha comprobado que esta especie tiene la capacidad de realizar fitorremediaciones en el tratamiento de aguas residuales, así como soportar la acumulación de altos grados de metales pesados como Cobre (Cu), Plomo (Pb), Zinc (Zn), Hierro (Fe) y Cromo (Cr). Las raíces crecen con vigor en soportes con textura arenosa, franca o arcillosa, pueden mantenerse empapados y sobrevivir en medios acuosos y se les debe situar en lugares con exposición directa al sol (Pérez, 2013, en Alcívar, 2018).

El impacto de *Typha domingensis* para el tratamiento de aguas residuales es muy favorable, ya que se logra la integración del agua tratada a los cuerpos de aguas naturales, o a los usos agrícolas, con una calidad acorde con la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.

Tezontle y grava triturada (materiales de soporte)

El diseño de los humedales subsuperficiales de flujo horizontal, por lo general consiste en una cama o relleno de soporte, ya sea de tierra o arena y grava, en la que se plantan macrófitas acuáticas, en la mayoría de los casos con la caña común o carrizo (*Phragmites australis*). El volumen de material de soporte, que constituye la arena y grava del humedal, se recubre con una membrana impermeable para evitar fugas de agua hacia el suelo (Kolb, 1998, en Ferreyra, 2019).

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica (k) es la propiedad del suelo que describe la facilidad con la que los poros del suelo permiten el flujo de agua. Cuando el suelo se satura, todos los poros pueden dirigir el agua, la conductividad está en su máxima expresión y es representada como (Ks). Los parámetros que definen a la conductividad hidráulica son: tamaño, orientación, distribución, continuidad de los poros y número, es por ello que existe una relación cuantitativa entre la conductividad hidráulica y el volumen de agua en un suelo.

La conductividad hidráulica se mide en laboratorio mediante el uso de permeámetros de carga variable o constante. La conductividad hidráulica es una propiedad cuantitativa importante del movimiento del agua, en especial del agua subterránea que se filtra a través de medios porosos, así como también de irrigación, drenaje, recarga, conservación de suelos, flujo a través de presas y de vasos de embalses, entre otros. El flujo pasa a través de los espacios porosos, esta trayectoria del flujo es complicada, ya que la geometría de estos espacios es muy irregular. La trayectoria que suele tomar el flujo es descendente, de un punto alto a un punto bajo. Para determinar la colmatación se requiere saber, por medio de la conductividad hidráulica, cómo se comporta el fluido.

Tabla 1
Características típicas del medio de soporte en humedales de flujo subsuperficial (Reed et al., 1995, en Ferreyra, 2019).

Tipo de medio	Tamaño efectivo D_{10} (mm)	Porosidad n (%)	Conductividad hidráulica saturada k_s ($\text{pie}^3/\text{pie}^2/\text{d}$)
Arena gruesa	2	28 a 32	300 a 3000
Arena con grava	8	30 a 35	1600 a 16000
Grava fina	16	35 a 38	3000 a 32000
Grava mediana	32	36 a 40	32000 a 160000
Roca triturada	128	38 a 45	16×10^4 a 82×10^4



Para determinar la conductividad hidráulica, Fetter (2001) propone el siguiente procedimiento:

$$q = -k \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (1)$$

Donde:

$q = Q/\text{sección}$ (caudal que circula por m^2 de sección)

$\frac{\Delta h}{\Delta L} =$ Gradiente hidráulico, expresado en incrementos

infinitesimales (adimensional)

$-k =$ Conductividad hidráulica. El signo negativo se

debe a que el caudal es una magnitud vectorial cuya

dirección es hacia los Δh decrecientes.

Despejando k

$$k = \frac{q}{\frac{\Delta h}{\Delta L}} \quad (2)$$

Donde:

$k = \left[\frac{L}{T}\right]$, unidades.

La conductividad hidráulica es la propiedad del medio poroso (del tipo de roca de la que está compuesto el humedal). Conociendo el valor de k se puede calcular el caudal, o aplicando la Ley de Darcy se puede calcular la k . Por otro lado, la conductividad hidráulica (k) y la permeabilidad (K) están relacionadas. La permeabilidad del medio poroso y las propiedades del fluido se determina con la Ecuación 3.

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} \quad (3)$$

Donde:

$K =$ Permeabilidad, propiedad del material poroso

(m^2)

$k =$ Conductividad hidráulica (m/d)

$\rho =$ Densidad del fluido (Kg/m^3)

$g =$ Aceleración de la gravedad (m/d^2)

$\mu =$ Viscosidad del fluido (m^2/d).

$\frac{\rho g}{\mu} =$ Propiedad del fluido

En la determinación cuantitativa del movimiento del agua en el suelo, la conductividad hidráulica es un parámetro esencial para solucionar problemas relativos a irrigación, drenaje, recarga, conservación del suelo, flujo a través de presas y de vasos de embalses, entre otros (Romaña, 2014).

Metodología

Características de diseño del modelo de los humedales artificiales construidos en el Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

En el presente trabajo se utilizaron dos humedales artificiales construidos en los terrenos de la planta de tratamiento del Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Se trata de humedales de flujo horizontal subsuperficial con vegetación a base de *Typha domingensis*, así como tezontle y grava triturada como materiales de soporte. Tanto los materiales de soporte como *Typha domingensis*, se encuentran en el estado de Michoacán; siendo esta última una especie nativa y, por lo tanto, su obtención y costo son accesibles, además de tener excelente capacidad de adaptación y resistencia a las plagas.

En la Figura 2 se observan los HAFSs horizontal vegetados con *Typha domingensis*, planta anfibia (emergente), ya que una parte de ella se encuentra sumergida y el resto expuesta en el exterior y arraigada al sustrato o material de soporte. Cada uno de los dos humedales tiene las siguientes características de diseño: Largo: $L = 2.10 \text{ m}$; ancho: $A = 0.70 \text{ m}$; área superficial: $A_s = 1.47 \text{ m}^2$; temperatura: $\text{Temp} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$; demanda bioquímica de oxígeno: $\text{DBO}_{\text{inf}} = 220 \text{ mg}/\text{L}$. Los



Figura 2. Humedales artificiales de flujo subsuperficial construidos en el Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

valores de DBO y SST del influente, se tomaron de recomendaciones del libro *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización* (Metcalf & Eddy, 1995).

Tezontle y grava triturada

La grava triturada (Figura 3) es un material que posee características distintas a las del tezontle, ya que tiene menor porosidad, baja absorción y mayor tamaño.

Algunas de las características de la grava triturada son las siguientes (Ferreyra, 2019):

- Coeficiente de uniformidad = 1.51; Absorción = 1.65%
- Densidad = 2.65 gr/cm³; Porosidad = 0.40 =40%



Figura 3. Grava triturada.

Algunas de las características del tezontle son las siguientes (Ferreyra, 2019):

- Coeficiente de uniformidad = 1.51; Absorción = 22.26%
- Densidad = 1.6 gr/cm³; Porosidad = 0.63 = 63%

En la construcción de los humedales se utilizaron tezontle y grava triturada previamente caracterizados en laboratorio (Figuras 3 y 4); son materiales con características físicas favorables para el desarrollo de los microorganismos. En el caso del tezontle, debido a su alta porosidad y alto porcentaje de absorción de agua, permite mayor eficiencia en la remoción de contaminantes (Ferreyra, 2019).



Figura 4. Tezontle.

Tabla 2
Caudales de diseño de los humedales construidos en el CIAC de la UMSNH.

Medio de soporte	Caudal
Tezontle	$Q = 0.09259 \text{ m}^3/\text{d} = 92.59 \text{ l/d}$
Grava triturada	$Q = 0.05879 \text{ m}^3/\text{d} = 58.79 \text{ l/d}$



Figura 5. Limpieza y mantenimiento de los humedales y del entorno.



Figura 6. Poda de *Typha domingensis* y remoción de la vegetación ajena.

Caudales de diseño de los humedales en cada uno de los medios de soporte

Ver la Tabla 2.

Mantenimiento de los humedales

Como parte del trabajo se realizó el mantenimiento necesario (Figura 5), tanto del lugar como del sistema de humedales, de tal manera que se garanti-

zara que el sistema de abastecimiento de agua residual (sistema de bombeo, línea de conducción y red de distribución) funcionara adecuadamente.

Como parte del mantenimiento también se realizó la poda de la vegetación de los humedales, así como retiro de la vegetación ajena que crece en los mismos, esto con el objetivo de propiciar un mejor crecimiento de la vegetación del tratamiento y, por lo tanto, un mejor funcionamiento del humedal (Figura 6).



Figura 7. Muestras de agua del influente y efluente de los humedales para su análisis físico-químico.



Figura 8. Muestras de agua del influente y efluente de los humedales para su análisis bacteriológico.

Obtención de muestras de agua y determinación de los parámetros de calidad del agua, tanto en el sitio como en el laboratorio

En cada muestreo se obtuvieron tres muestras de agua residual de dos litros cada una para su respectivo análisis físico-químico: una correspondiente al influente (entrada) de ambos humedales (agua proveniente del CIAC) y una en el efluente (salida) de cada uno de los dos humedales, una vez que el agua fue tratada (Figura 7). Asimismo, se obtuvieron tres muestras de 125 ml en bolsas estériles con cierre hermético, o mediante frascos de farmacia estériles de 100 ml para realizar los análisis bacteriológicos (Figura 8).

Determinación de parámetros de campo

Para la obtención de los parámetros de campo se utilizaron equipos de medición de la marca Hach, como fue el caso de un medidor de conductividad eléctrica o electrolítica que permite medir la conductividad electrolítica en $\mu\text{S}/\text{cm}$, así como la salinidad en partes por miles, la temperatura en $^{\circ}\text{C}$. Se utilizó un potenciómetro para medir el potencial de hidrógeno (pH) y un oxímetro para medir el oxígeno disuelto en

mg/L. En la Figura 9 se aprecia la obtención de parámetros físico-químicos de campo de las muestras de agua de los efluentes de los humedales.

Medición de niveles para la determinación de gradientes hidráulicos

En cada uno de los humedales se hincaron tres tubos en el sustrato: uno al inicio, otro a la mitad y el tercero al final, con el propósito de medir el nivel del agua en los tres puntos. Se midieron los niveles del agua en cada uno de los tubos (Figura 10) con la finalidad de determinar los gradientes hidráulicos. Para determinar los niveles del agua se utilizó una sonda y un nivel de referencia establecido en un punto que permaneció fijo durante el trabajo. La conductividad hidráulica se determinó mediante la comparación del comportamiento del flujo en el humedal que ha estado tratando el agua, con un humedal con el mismo tipo de material, pero limpio de sedimentos, para ello se instalaron humedales complementarios a los dos humedales en estudio, uno para cada tipo de material de soporte o sustrato.



Figura 9. Proceso de obtención de los parámetros de campo.



Figura 10. Medición del nivel del agua en cada punto de muestreo, utilizando el tubo hincado en los humedales.

Conductividad hidráulica

Se calculó la conductividad hidráulica de los dos humedales experimentales en estudio y su relación, en porcentaje, respecto a la conductividad de dos humedales de referencia con material de soporte nuevo. Cabe mencionar que, por lo antes mencionado, se construyeron dos humedales más llamados de referencia para comparar la conductividad de los dos humedales en estudio, con humedales de referencia con el mismo tipo de sustrato completamente nuevo y/o limpio.

Resultados

La comparación de los resultados del estudio de calidad del agua con la normatividad correspondiente y con los estudios realizados, se muestran en las Tablas 3 a la 6:

Parámetros de campo obtenidos en el muestreo 1

Se determinaron parámetros de campo, tales como temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y salinidad, cuyos valores sirven de referencia para conocer las condiciones del agua, tanto en el influente como en el efluente, además de servir de base y confirmación para algunos de los análisis de laboratorio.

- **Muestreo 1 – Fecha de muestreo: 20 de abril de 2021**

Ver la Tabla 3.

Como se observa en los resultados del primer muestreo (Tabla 3), el pH y la temperatura cumplen con la NOM-001-SEMARNAT-1996, y en ambos humedales se tienen prácticamente los mismos valores; sin embargo, el contenido de oxígeno disuelto (OD) no cumple con las recomendaciones de la literatura en cuanto al nivel compatible con la vida acuática y, además, se observa que el agua del humedal cuyo sustrato corresponde a la grava, presenta mayor cantidad de OD que la del humedal cuyo sustrato está constituido por tezontle.

Tabla 3
Muestreo 1. Parámetros de campo.

Parámetro	Influente	Effluente Humedal con <i>Typha domingensis</i> - Tezontle	Effluente Humedal con <i>Typha domingensis</i> - Grava triturada	NOM-001-SEMARNAT 1996 (Límites permisibles - Protecc. de la vida Acuática) Promedio Diario
Conductividad electrolítica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1083	1124	1124	
Salinidad (ppt)	0.5	0.6	0.6	
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	18.0	18.3	18.0	40
pH	8.0	6.6	6.6	5–10
Oxígeno disuelto (mg/l)	0.64	1.2	1.1	>5 *

* Niveles compatibles con la vida de los peces (Colas R., 1972).

Tabla 4
Muestreo 1. Resultados de los análisis de laboratorio.

Muestreo	Fecha	Contaminante /Parámetro	Influente	Enfluyente Humedal con <i>Typha domin-gensis</i> - Tezontle	Enfluyente Humedal con <i>Typha do-mingensis</i> - Grava tritu-rada	NOM-001-SE-MARNAT 1996 (Límites permi-sibles - Pro-tecc. de la vida Acuática) Promedio Dia-rio
Muestreo 1	20/ 04/ 2021	DQO(mgO ₂ /L)	123.75	5	31.25	No aplica
		DBO5(mgO ₂ /L)	64.05	3.53	9.48	60
		SSed(ml/L)	0.5	0.15	0.25	2
		C.Fec.(NMP/100ml)	>2.4x10 ⁷	3x10 ⁴	1.1x10 ⁵	2000

Como se observa en la Tabla 4, en el caso de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y de los sólidos sedimentables (SSed), el agua tratada en los humedales cumple con la norma en ambos humedales, también se observa, nuevamente, mayor remoción en el humedal con tezontle como sustrato que en el humedal cuyo sustrato es grava triturada.

En el caso de los coliformes fecales, el agua de ambos humedales no cumple con la norma; sin embargo, existe remoción tanto en el humedal con sustrato a base de tezontle como en el humedal con sustrato a base de grava triturada, observándose, además, que es mayor la remoción en el humedal con tezontle como sustrato que en el humedal con grava triturada.

- **Muestreo 2 – Fecha de muestreo: 11 de mayo de 2021**

Ver Tabla 5.

Como se observa en los resultados del segundo muestreo (Tabla 5), las muestras de agua de los humedales cumplen en cuanto a pH y temperatura con la NOM-001-SEMARNAT-1996, y en ambos humedales se tienen prácticamente los mismos valores; sin embargo, en cuanto a oxígeno disuelto (OD) no se cumple con las recomendaciones de la literatura en cuanto al nivel compatible con la vida acuática y, además, se observa que el agua del humedal cuyo sustrato está formado por grava triturada presenta cantidad de OD ligeramente mayor que el humedal con tezontle.

Tabla 5
Muestreo 2. Parámetros de campo.

Parámetro	Influente	Enfluyente Humedal con <i>Typha domin-gensis</i> - Tezontle	Enfluyente Humedal con <i>Typha domin-gensis</i> - Grava triturada	NOM-001-SEMARNAT 1996 (Límites permisibles - Protecc. de la vida Acuática) Promedio Diario
Conductividad electrolítica (µS/cm)	851	1192	1129	
Salinidad (ppt)	0.4	0.6	0.6	
Temperatura (°C)	21.0	20.5	20.2	40
pH	8.0	6.5	6.7	5–10
Oxígeno disuelto (mg/l)	0.75	0.79	1.07	>5 *

*Niveles compatibles con la vida de los peces (Colas R., 1972).



Tabla 6
Muestreo 2. Resultados de los análisis de laboratorio.

Muestreo	Fecha	Contaminante /Parámetro	Influyente	Enfluyente Humedal con <i>Typha dominicensis</i> - Tezontle	Enfluyente Humedal con <i>Typha dominicensis</i> - Grava triturada	NOM-001-SE-MARNAT 1996 (Límites permisibles - Protecc. de la vida acuática-PD)
Muestreo 2	11/05/2021	DQO (mgO ₂ /L)	155	70	122	No aplica
		DBO ₅ mgO ₂ /L)	82.5	27.8	36.3	60
		SSed (ml/L)	<0.1	<0.1	<0.1	2
		C.Fec. (NMP/100ml)	2.40E+08	4.50E+06	4.60E+06	2000

Como se observa en la Tabla 6, respecto a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y de los sólidos sedimentables (SSed), el agua de ambos humedales cumple con la norma y, nuevamente, se observa, en el caso de la DBO₅, una mayor remoción en el humedal con sustrato de tezontle que en el humedal con sustrato de grava triturada.

En el caso de los coliformes fecales, el agua de ambos humedales no cumple con la norma; sin embargo, existe remoción en este parámetro, tanto en el humedal con sustrato de tezontle como en el humedal cuyo sustrato es de grava triturada; además, se puede observar que es mayor la remoción en el humedal con

sustrato de tezontle que en el humedal con sustrato de grava triturada.

La conductividad hidráulica (Tabla 7) es un indicador que varía con el efecto de la dinámica que genera la colmatación, dicha dinámica constituye un fenómeno complejo donde intervienen los sólidos presentes en el agua residual, el ingreso de agua de lluvia, el medio de soporte, su porosidad, su relación de vacíos y su posible estratificación, el sustrato y su posible intervención en la creación de fisuras y agujeros en el medio de soporte, la zona radicular, los rizomas y el ciclo de vida de la vegetación. Por lo antes mencionado, y de acuerdo a lo determinado, se puede decir que la colmatación aumenta a medida que el efecto

Tabla 7
Conductividad hidráulica en los humedales experimentales.

Humedales experimentales	Número de determinación	Conductividad hidráulica K (m/día)	Porcentaje de Conductividad hidráulica Respecto al humedal de referencia K(m/día)	Grado de Colmatación
Humedal 1 Tezontle y <i>Typha domingensis</i>	1	9.94	2.52	Se observa que la colmatación es mayor en el humedal con sustrato a base de tezontle, ya que tiene valores menores de conductividad hidráulica que el humedal con grava triturada.
	2	13.79	6.45	
	3	19.42	13.64	
Humedal 2 Grava triturada y <i>Typha domingensis</i>	1	90.45	30.00	La colmatación en el humedal con sustrato a base de grava triturada es menor, ya que tiene valores mayores en la conductividad hidráulica que el humedal con tezontle.
	2	135.67	45.00	
	3	271.34	90.00	

de dicha dinámica hace disminuir la conductividad hidráulica.

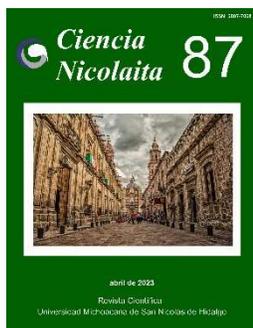
Conclusiones

Se estudió la eficiencia de remoción de contaminantes para los medios de soporte y el correspondiente cumplimiento de las características del agua tratada con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, y se concluye que, en ambos humedales en estudio, el efluente cumple con la norma mencionada en cuanto a temperatura, pH, DBO₅, y SSed; es mayor la remoción en el humedal con sustrato a base de tezontle que en el que se utilizó grava triturada, y en ninguno de los dos casos el efluente cumple con la norma en cuanto a OD y Coliformes fecales, por lo que se seguirá trabajando en la mejora del tratamiento.

En cuanto a la conductividad hidráulica, se concluye, con base en los resultados del presente trabajo, que no es determinante, pues en ambos humedales se cumple con la norma, inclusive se encontró que el tezontle, que tiene menor conductividad hidráulica, presenta mayor remoción de contaminantes. No obstante, cabe mencionar que, al tener menor conductividad hidráulica, se colmata más que la grava triturada, por lo que es recomendable estudiar la permeabilidad, otro parámetro hidráulico también relacionado con la dinámica de la saturación del medio de soporte y su posterior colmatación en los humedales.

Referencias

- Alcívar Cedeño, D.X., 2018, Propuesta de remoción de plomo en piscinas de relaves mineros utilizando la especie *Typha domingensis* pers en Camilo Ponce Enríquez, Ecuador: Tesis, *Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil*, p. 58.
- Colas, R., 1972, La pollution des eaux Que sais-je?: *Francia, Presses Universitaires de France*, 4a. ed., p. 128.
- CONAGUA, 2015, Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales: *México, CONAGUA*.
- Delgadillo, O., Camacho, A.F., Pérez, L. and Andrade, M., 2010, Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales: *Serie técnica del Proyecto GOV-AGUA, Programa ALFA de la Unión Europea*, p. 105.
- Ferreira, T. J.L., 2019, Medios de soporte alternativos para mejorar la eficiencia de los humedales artificiales de flujo subsuperficial, en el estado de Michoacán: Tesis de Maestría, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*.
- Fetter, C.W., 2001, *Applied Hydrogeology: Prentice-Hall*, 4ª ed., p. 81.
- Lahera, V., 2010, Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales: *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, 12(2), pp. 58-69.
- Metcalf y Eddy, INC., 1995, Ingeniería de aguas residuales, Tratamiento, vertido y reutilización: *Madrid, McGraw Hill*, p. 528.
- Mufarrege, M., 2012, Propuesta de remoción de plomo en piscinas de relaves mineros utilizando la especie *Typha domingensis* pers en Camilo Ponce Enríquez, Ecuador.
- Romaña, J.F., 2014, Los límites de la ley de Darcy: Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil.
- SEMARNAT, 1996, NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, 6 de enero de 1997.
- Vibrans, H., 2009, "Malezas de México". <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/typhaceae/typha-domingensis/fichas/ficha.htm> [consultado en mayo de 2022].



Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Sistemas de enfriamiento evaporativo para uso en elementos verticales: una revisión del estado del arte

Evaporative cooling systems for vertical elements: a review

Roberto Ernesto Cárdenas-Rodríguez, Luis Aarón García-Solórzano, Carlos Javier Esparza-López,*
José Ricardo Moreno-Peña y José Fidel Navarro-Arellano

Para citar este artículo: Cárdenas-Rodríguez Roberto Ernesto, García-Solórzano Luis Aarón, Esparza-López Carlos Javier, Moreno-Peña José Ricardo y Navarro-Arellano José Fidel, 2023. Sistemas de enfriamiento evaporativo para uso en elementos verticales: una revisión del estado del arte. Ciencia Nicolaita no. 87, 121-133. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.663>



Historial del artículo:

Recibido: 25 de mayo de 2022
Aceptado: 3 de noviembre de 2022
Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: cesparza@ucon.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Sistemas de enfriamiento evaporativo para uso en elementos verticales: una revisión del estado del arte

Evaporative cooling systems for vertical elements: a review

Roberto Ernesto Cárdenas-Rodríguez,¹ Luis Aarón García-Solórzano,¹ Carlos Javier Esparza-López,^{2*} José Ricardo Moreno-Peña¹ y José Fidel Navarro-Arellano¹

¹Instituto Tecnológico de Colima, Av. Tecnológico 1, Villa de Álvarez, Colima.

²Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima; carretera Colima-Coquimatlán s/n, cp 28400, Coquimatlán, Colima, México

Resumen

Los sistemas de enfriamiento evaporativo son una alternativa en el ámbito de la construcción y la vivienda para reducir la temperatura en regiones con clima cálido mediante el cambio de fase del agua, el cual busca disminuir la alta demanda de energía para enfriar los espacios habitables. El siguiente documento realiza una búsqueda de diversos sistemas de enfriamiento evaporativo colocados en elementos verticales. Se presentan los resultados de búsqueda de información con base en la metodología PRISMA a través de sitios científicos como ScienceDirect, ResearchGate, Google Scholar y Scielo, con las palabras clave: enfriamiento evaporativo, enfriamiento evaporativo directo, enfriamiento evaporativo indirecto y enfriamiento pasivo.

Palabras clave: enfriamiento evaporativo, estado del arte, clima cálido, sistema vertical

Abstract

Evaporative cooling systems are an alternative in construction and housing to reduce the temperature in regions with hot climates through the phase change of water, which seeks to reduce the high demand for energy to cool living spaces. The following document searches for various evaporative cooling systems placed on vertical elements. The information search results are presented based on the PRISMA methodology through scientific sites such as ScienceDirect, ResearchGate, GoogleScholar, and Scielo, with the keywords: thermal comfort, evaporative cooling, direct evaporative cooling, indirect evaporative cooling, and passive cooling.

Keywords: evaporative cooling, state of the art, warm climate, vertical system



Introducción

En las últimas tres décadas del siglo XX, el planeta Tierra ha experimentado un deterioro ambiental en el cual las condiciones climáticas se han modificado, teniendo cada año niveles más altos en la temperatura global, lo que ha provocado que el clima, los ecosistemas y la población en general, sufran las consecuencias negativas (Amestoy, 2010). Algunos efectos ya se pueden observar, por ejemplo, el deshielo de los polos o las largas sequías; de acuerdo con el tercer y cuarto Informe de Evaluación Climática Nacional, se prevén más efectos en el futuro provocados por el aumento de la temperatura global, tales como: temperaturas en aumento, cambios en los patrones de precipitación, más sequías y olas de calor, huracanes más fuertes e intensos, aumento del nivel del mar, entre otros (Melillo *et al.*, 2014; Reidmiller, 2018).

El calentamiento global ocurre por el exceso de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, esta retiene gran parte del calor que entra a la Tierra, encapsándolo sin permitir su completa salida, lo que genera estos cambios en el clima, especialmente contener calor (National Geographic, 2022)

La necesidad de combatir el calentamiento global, pone en marcha la búsqueda y mejora de estrategias con el fin minimizar el costo energético, de fabricación y de emisión de dióxido de carbono (CO₂) para que a largo plazo el calentamiento disminuya mientras que los periodos climáticos del planeta se estabilizan y esto se traduzca en un beneficio para el medio ambiente y los seres vivos en general.

En el caso de la arquitectura y el ámbito de la construcción, la solución surge en encontrar la sostenibilidad en las edificaciones, principalmente, al intentar conseguir el confort térmico en el interior de los espacios, con el menor impacto ambiental y que resulte económicamente barato y accesible para los habitantes, ya que entre el 30 y el 40% del consumo global de energía, se debe a los edificios donde un 50% de ese gasto se requiere para generar calor, ventilación y por el uso de aire acondicionado (Duan *et al.*, 2012; Amer *et al.*, 2015; Saffari *et al.*, 2017). Una de las estrategias empleadas para alcanzar la sostenibilidad en ambientes cálidos es el Enfriamiento Evaporativo (EE).

El EE se ha convertido en una alternativa que resulta eficiente para impulsar la pérdida de calor en los espacios interiores de una edificación. En ciertos casos se procura que la energía para su funcionamiento provenga de fuentes renovables, en caso de no serlo, intenta tener un aprovechamiento de los sistemas de enfriamiento al interior para funcionar con el menor consumo de electricidad, con el objetivo de reducir el costo económico y ambiental debido a la huella de carbono que generan estos sistemas (Santamouris, 2005). En adición, el costo de adquisición y mantenimiento de estos sistemas, resulta más económico que los de refrigeración convencional como el aire acondicionado (Wen *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2019; Xuan *et al.*, 2012).

Existen alternativas para lograr este enfriamiento, adecuándose cada una de ellas a las condiciones del clima en donde se aplica para tener un mejor rendimiento y desarrollo con la correcta ejecución y funcionamiento. Unas se enfocan en la transformación de la energía para reducir la ganancia de calor, otras en generar el flujo de la energía para disipar el calor, otras en evitar la ganancia de calor antes de que ingrese a los espacios, etc. (Bhamare, 2019).

En este contexto, el objetivo de esta investigación es analizar sistemas de enfriamiento evaporativo que se pueden colocar en elementos verticales de una edificación, para lo cual se explican sus características, funcionalidad y diseños, sin abundar en el amplio desglose de modelos existentes dentro del funcionamiento de un mismo sistema y definir únicamente la idea principal de cada uno de ellos. El propósito es obtener información que permita formular una visión simplificada y objetiva de estos sistemas.

Metodología

La búsqueda de información se realizó con base en el sistema PRISMA (Liberati *et al.*, 2009), a través de bases de datos para publicación de artículos científicos como ScienceDirect, ResearchGate, GoogleScholar y Scielo, con interés en las palabras clave: enfriamiento evaporativo, enfriamiento evaporativo directo, enfriamiento evaporativo indirecto y enfriamiento pasivo. Estos buscadores académicos fueron seleccionados porque contienen fuentes con un alto

valor de credibilidad por parte de la comunidad científica a nivel mundial, con dominio en temas similares al que se analiza en esta investigación. Se encontraron 75 artículos referentes al tema, los cuales fueron valorados críticamente según su importancia, considerando su aporte en la reducción de temperatura, la relación que tiene con la función de EE con su uso en elementos verticales, los datos que presenta para cada modelo, incluyendo uso, características y función. Se analizó el trabajo operativo de los modelos de sistemas, sin abundar el análisis en las variaciones de cada modelo existente para no repetir información de configuraciones de un sistema donde se presenten cambios surgidos por nuevas propuestas o hipótesis.

Discusión

Sistemas de enfriamiento evaporativo (EE)

La evaporación es uno de los métodos a utilizar para lograr el enfriamiento natural dentro de un edificio (Rafique *et al.*, 2015). Funciona intercambiando la masa térmica que se encuentra en el aire al incorporar humedad al espacio (por consecuencia disminuye la temperatura), para que posteriormente inicie el proceso de evaporación del líquido (debido a las altas temperatura del ambiente) para que finalmente se retire por medio de la ventilación (Amer *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2019; Rafique *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2007). Todos los procesos de enfriamiento evaporativo incluyen un volumen de agua y un volumen de aire, sirviendo como el medio de enfriamiento o el medio complementario para hacerlo (Yang *et al.*, 2019). Los sistemas se dividen en dos categorías, llamándose directo e indirecto, dependiendo la interacción que tienen con el agua y la relación con ella para trabajar (Amer *et al.*, 2015; Sotelo-Salas *et al.*, 2021). Con esas dos formas de trabajo se desglosan otras tres variaciones para cada sistema (Amer *et al.*, 2015):

1. Enfriamiento evaporativo directo (EED). En estos sistemas el flujo de aire que ingresa desde el exterior realiza un contacto directo con un cuerpo húmedo localizado en el interior del modelo, refresca las partículas del aire que entra y por ese medio comienza el proceso de enfriamiento cambiando el calor sensible por calor latente (Amer *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2007). Este aire que ingresa al interior del espacio entra cargado de humedad, por lo que alcanza a llegar hasta

80% de humedad relativa (Lechner, 2018). Los sistemas directos son más utilizados en zonas con condiciones de clima cálido seco; su efectividad es de aproximadamente 85% (Rafique *et al.*, 2015).

2. Enfriamiento evaporativo indirecto (EEI). En este sistema se evita que el flujo de aire que ingresa al espacio interior tenga contacto directo con el medio húmedo que ayuda a realizar el cambio de temperatura, consiguiéndolo con un intercambiador de calor, esto para sustituir el calor sensible sin modificar la humedad del ambiente (Amer *et al.*, 2015; Rafique *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2007; Sotelo-Salas *et al.*, 2021). El intercambiador tiene contacto con dos corrientes de aire, la que entra al interior (la no humectada) y con la corriente de aire de trabajo (la humectada) sin cruzarlas, se evita el contacto de estos dos flujos para que no aumenten los niveles de humedad al interior (Liberari *et al.*, 2017). Los sistemas indirectos son mayormente utilizados en zonas con condiciones de clima cálido y húmedo; su efectividad es aproximadamente de 60-70% (Rafique *et al.*, 2015; Esparza-López *et al.*, 2018; Esparza-López *et al.*, 2022).

3. Sistema combinado de enfriamiento directo e indirecto (EEDI). Se trata de un sistema que utiliza flujos de aire directo e indirecto para conseguir el enfriamiento, logrando potenciar las características de ambos sistemas, reduciendo el calor sensible del espacio, pero reduciendo la humedad relativa, con mayor eficiencia y con un control de humedad (Amer *et al.*, 2015; Rafique *et al.*, 2012). Estos sistemas utilizan un doble flujo de aire dependiendo la cantidad de humedad que se desea en el espacio interior, el primer flujo entra como EEI al interior del modelo, ahí se humecta en caso de ser necesario con un sistema de EED en la cantidad requerida. Estos sistemas tienen una eficiencia aproximada de 70% (Duan *et al.*, 2012; Esparza-López *et al.*, 2022).

Estos sistemas pueden dividirse en otras categorías, dependiendo si son impulsados o no por medios que consuman energía eléctrica (Firfiria *et al.*, 2019), nombrándolos en:

1. Activos. Impulsan el rendimiento para el enfriamiento al tener un sistema que consuma energía (generalmente eléctrica) que acelera la velocidad del viento que ingresa o la velocidad de evaporación del cuerpo de agua en el sistema.

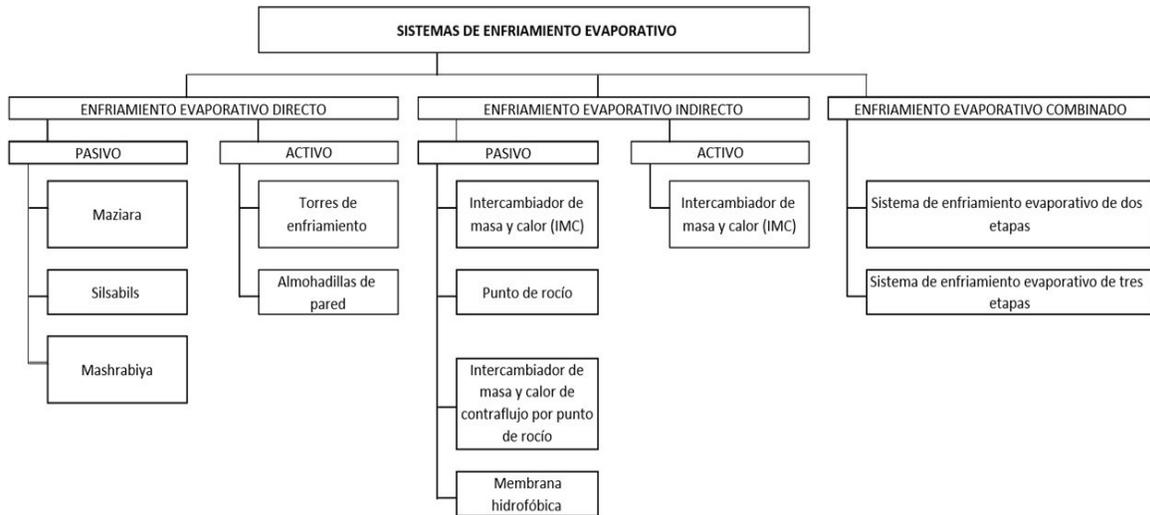


Figura 1. Concentrado de sistemas evaporativos para elementos verticales.

2. Pasivos. Buscan alcanzar el mayor rendimiento posible para eliminar el calor sin utilizar sistemas eléctricos con el aprovechamiento del entorno natural en conjunto de las geometrías que presenta la edificación.

A partir de cada uno de los sistemas se encuentran diferentes alternativas para intentar alcanzar el confort térmico en los interiores de los espacios, dependiendo de las condiciones climáticas donde se apliquen, ya que esas condiciones delimitan la funcionalidad que debe considerarse para cada sistema.

En la Figura 1 se muestra el concentrado de los tipos de sistemas de enfriamiento evaporativo y los dis-

tintos modelos encontrados para cada uno. Los modelos guardan la característica común de ser capaces de aplicarse en elementos verticales de una edificación.

1. Sistemas de enfriamiento evaporativo directo (EED) pasivo

1.1. Maziara

En Egipto, se llamó de esta forma a los elementos empleados en un sistema de enfriamiento evaporativo tradicional de la sociedad Islámica utilizado desde el año 2500 a. C. Funciona colocando jarras (a las que llamaron “maziara”) llenas de agua en los vanos o nichos de los muros; las jarras tienen la capa de barro

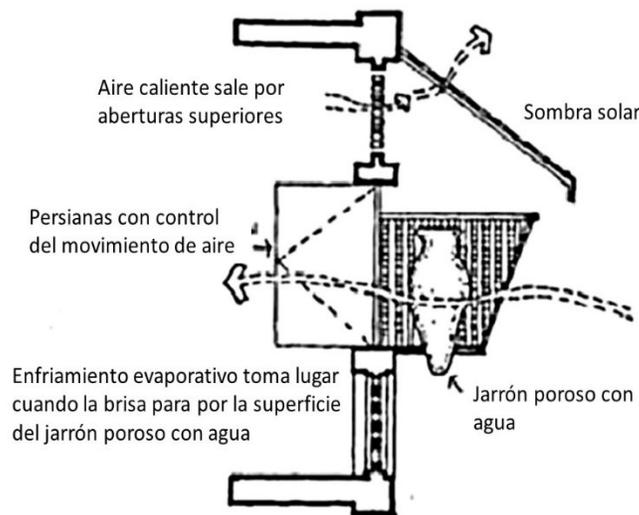


Figura 2. Funcionamiento de maziara (Fardeheb *et al.*, 2009).

con textura porosa, lo que permite que puedan transpirar y conectar la humedad hacia el exterior de esta, haciendo que por la evaporación del agua refresque el aire que entra al interior de la edificación cuando realiza el contacto (Figura 2) (Rafique *et al.*, 2015; Fardeheb *et al.*, 2009). En este sistema se absorben 580 calorías de energía por cada centímetro cúbico de agua evaporada.

1.2. Silsabils

Es un sistema utilizado en los inicios de la sociedad Islámica que se enfoca en correr agua a través de losas haciendo un efecto “cascada”, dirigiendo el agua hacia canales que recorren la vivienda en los espacios comunes humectando el aire durante el recorrido de esta, consiguiendo así reducir la sensación térmica dentro de la vivienda (Bagasi *et al.*, 2020).

1.3. Mashrabiya

Es un elemento de la arquitectura Islámica particular del Cairo, Egipto, y de la ciudad de Yeda, el cual consta de un marco segmentado hecho de madera que se coloca en las ventanas de las edificaciones, su función es proteger la ventana de la entrada de calor proveniente de los rayos del sol mientras permite el paso del viento (Bagasi *et al.*, 2020); además, procura cuidar la intimidad del interior de la habitación (Figura 3). Por sí mismo, no funciona como un sistema de EED, pero en muchos de los casos se combina este elemento con mantas de tela que están humectados o con jarrones del tipo maziara para elevar el rendi-

miento de este sistema al generar brisas frescas y reducir la temperatura (Amer *et al.*, 2015; Fardeheb, 2009).

En la actualidad, el uso de las mashrabiya se ha cambiado para dar paso al empleo de dobles fachadas, permitiendo conservar la tradición de su arquitectura mientras que aplica su funcionamiento para reducir los gastos en sistemas de enfriamiento en las edificaciones (Schielke, 2014).

2. Sistema de enfriamiento evaporativo directo (EED) activo

2.1. Torres de enfriamiento

El proceso de este sistema es similar al de la típica torre de viento (Figura 4). Este se inicia al atomizar agua caliente desde la cima de la torre para producir un flujo de finas gotas de agua en la cara de un elemento sólido, las cuales combinadas con la corriente del viento, apoyan a la evaporación del líquido (Yang *et al.*, 2019); en la parte interior de la torre, el aire estaría combinándose con las gotas de agua, impulsándolo hacia el interior del edificio para realizar la función del enfriamiento. En la parte superior de la torre se encuentra un ventilador que retira el aire caliente de la torre y facilita la salida del flujo de vapor que se produce en la torre (Yu *et al.*, 2021; Glaciar ingenierías, 2022).

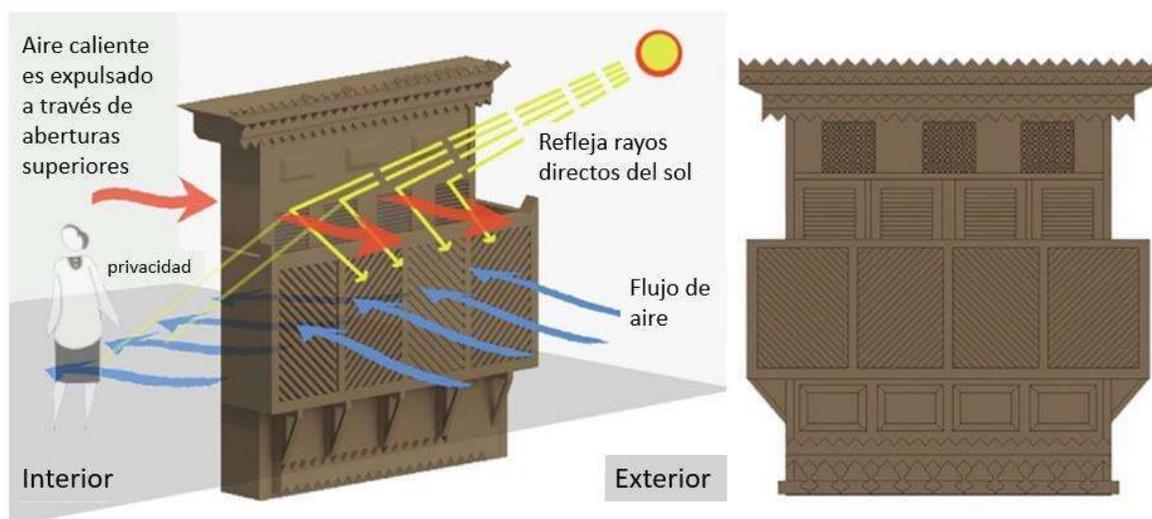


Figura 3. Esquema de función de mashrabiya (Bagasi *et al.*, 2020).

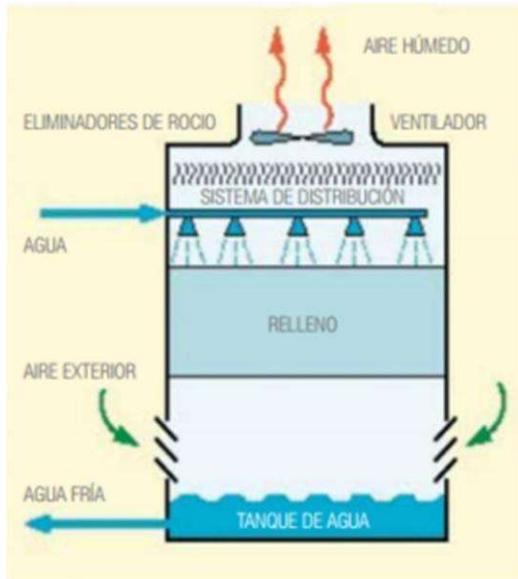


Figura 4. Funcionamiento de una torre de enfriamiento (Glacial ingenierías, 2022).

Como resultado, el agua que consigue mantenerse dentro de la torre se enfría e introduce al espacio donde es requerido, entrando aire sin calor y con una carga de humedad (Yang *et al.*, 2019). Con este sistema, el agua realiza el trabajo de enfriamiento y el viento es el medio complementario. La velocidad de evaporación en estos sistemas obedece al tipo de rocío que se aplique; dependiendo de las condiciones de velocidad, orientación y presión, se puede obtener un distinto proceso de evaporación (Somasundar *et al.*, 2020).

2.2. Almohadillas de pared

Este sistema es el más utilizado en la actualidad como sistema de enfriamiento evaporativo directo, siendo el de mejor desempeño y simple en su tipo (Xuan *et al.*, 2012). Tiene distintas variaciones en su rendimiento dependiendo del material con el que se elabore la almohadilla; el desempeño de evaporación depende de las características de cada fibra y del flujo de viento (Xu *et al.*, 2016). Se trata de cubos de metal o cajas de plástico que tienen dentro paredes hechas de fibras porosas que crean canales por donde fluyen las corrientes de aire. Las fibras se humidifican constantemente para generar el enfriamiento del aire, el cual se introduce a los espacios apoyado por ventiladores que están dentro del sistema; a ese aire que entra se le denomina 'aire lavado' (Figura 5) (Xuan *et al.*, 2012). Algunos sistemas colocan ventiladores con más

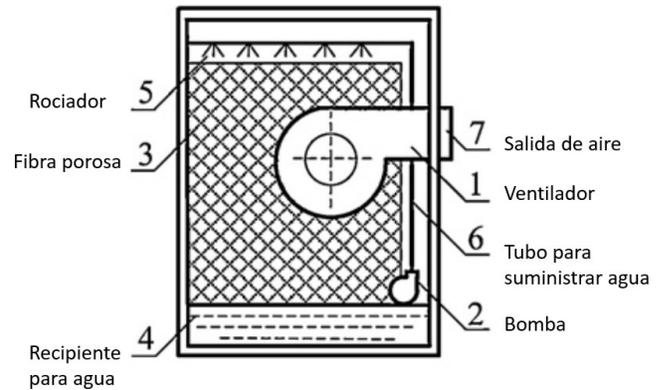


Figura 5. Diagrama de funcionamiento de almohadilla de pared (Xuan *et al.*, 2015).

de una velocidad para controlar la cantidad de aire que ingresa al espacio.

A través de rociadores el agua se lleva a la fibra para humectarla por completo, su capacidad de absorción de humedad depende del movimiento que el tejido permita por la fuerza de su capilaridad (Xu *et al.*, 2016); la fibra se puede colocar de manera vertical u horizontal y de esa forma también se distribuirá el agua en la fibra. Los materiales con que se fabrican las fibras pueden ser de metal poroso, celulosa, organismos de polímeros o cerámica porosa, estos materiales necesitan tener excelente absorción de agua y propiedades térmicas adecuadas, además de ser resistentes a la corrosión, al fuego y de propiedades antiincrustantes (Yang *et al.*, 2019). En caso de tener un exceso de líquido, este se recupera en la parte baja del sistema para regresar a los canales de distribución de los rociadores (Xuan *et al.*, 2012).

La eficiencia para el enfriamiento de la mayoría de los modelos comerciales en el mercado de este sistema, registra entre 70 y 95% (Xuan *et al.*, 2012), siendo que la variable que cambia ese resultado puede ser tanto el diseño del equipo, las condiciones del equipo, la porosidad de la fibra, las condiciones del clima, entre otros.

3. Sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto (EEI) pasivo

3.1. Intercambiador de masa y calor (IMC)

Se trata de un sistema con el que el cambio de temperatura ocurre al separar dos o más canales de flujo

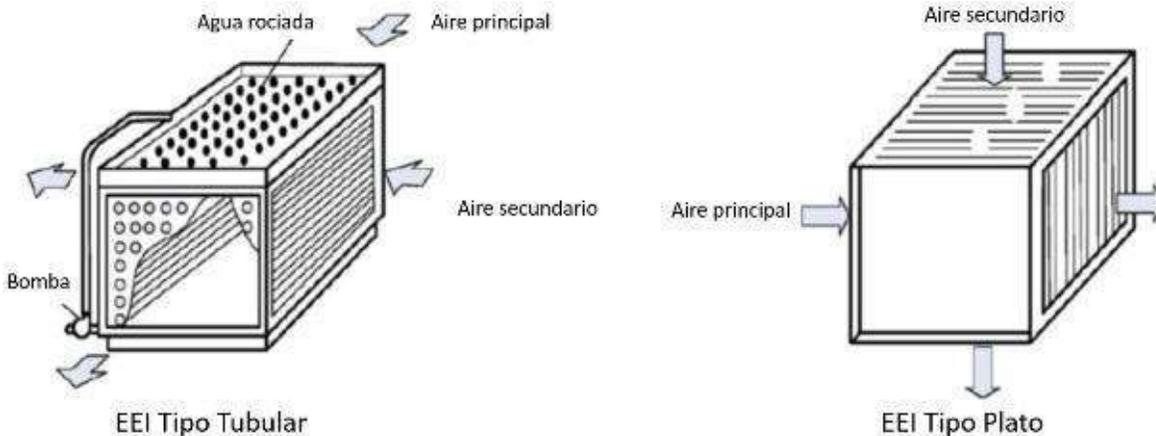


Figura 6. Configuraciones para IMC tipo tubular y tipo placa (Yang *et al.*, 2019).

de viento para evitar la humidificación del aire que entra, haciendo que la superficie que separa ambos flujos de aire sea el medio por el cual se logre la transferencia de calor de forma convectiva, reduciendo la temperatura del aire que ingresa ya renovado. En uno de los lados de esta superficie se agrega una hoja o almohadilla la cual está humectada, en ella se realiza el trabajo de humidificación del ‘aire de trabajo’, el cual por convección, reducirá la temperatura al lado contrario de la superficie que separa los canales de entrada de aire (Xhao *et al.*, 2007). Tradicionalmente se utilizan dos tipos de configuraciones para los sistemas intercambiadores de calor: tipo ‘placa’ y tipo ‘tubular’ (Figura 6).

El tipo placa es el más común. Trabaja con una placa que divide los flujos de aire seco y humidificado para evitar que el aire que entra tenga contacto con el agua; su rango de efectividad es entre 50 y 80% (Amer *et al.*, 2015). El tipo tubular consiste en una serie de tubos colocados en forma de rejilla y rociados con

agua por la parte externa; el aire que ingresa al interior del edificio pasa por dentro de los tubos, mientras que el aire humectado tiene contacto con la cara exterior del tubo (Amer *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2019).

3.2. Punto de rocío

Fue desarrollado por el Dr. Valeriy Maisotsenko en Rusia, como una propuesta para mejorar los sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto. Este diseño hace que por medio de agua, el aire que entra a la edificación alcance a reducir su temperatura de bulbo húmedo a un punto muy cercano al de la temperatura de punto de rocío, de allí su nombre (Xuan *et al.*, 2012). Para una configuración ideal de un IMC (Figura 7), la entrada de ‘aire cambiante’ (1) y de ‘aire renovado’ (2) sería la misma, teniendo su paso por el lado seco de la placa; en este modelo existe una segunda entrada de aire dedicada a la entrada de ‘aire de trabajo’.

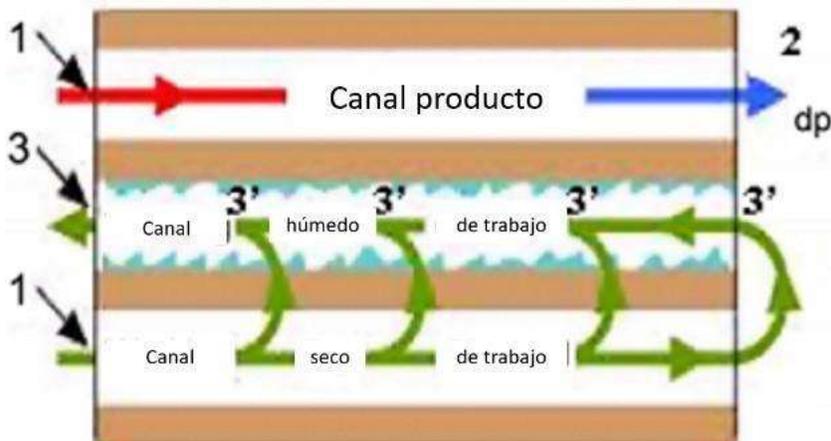


Figura 7. Diagrama de funcionamiento de un IMC (Zhao *et al.*, 2007).

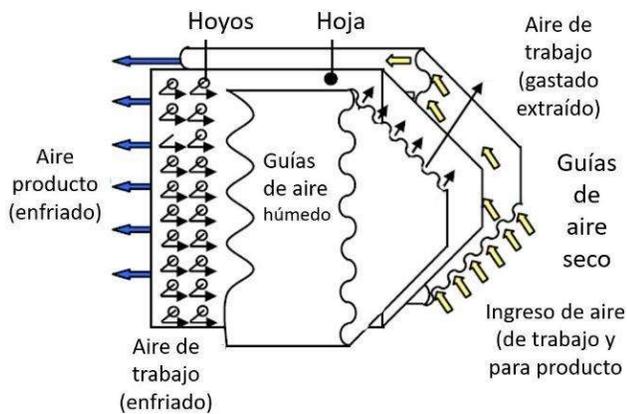


Figura 8. IMC de forma poligonal (Zhao *et al.*, 2007).

La superficie de esa placa tiene distribuidos una serie de hoyos por los cuales ocurre el intercambio para lograr el enfriamiento con el lado húmedo, esperando que el aire que entra ingrese al canal húmedo para generar un flujo de aire que a su vez enfríe por medio de la evaporación, expulsando el aire caliente al exterior (Xuan *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2007), esta configuración ha sido nombrada por algunos autores como el sistema M-cycle, combinando el intercambiador de calor y un enfriamiento evaporativo indirecto (Cuce, P. M. & Riffat, S., 2016).

3.2.1. Intercambiador de masa y calor de contraflujo por punto de rocío

Los investigadores Zhao, Li y Riffat (2007), diseñaron un nuevo IMC de contraflujo para enfriamiento por punto de rocío para un clima de verano en el Reino Unido. El principio con el que se hizo fue el mismo en cuanto colocar canales fabricados con almohadillas colocadas una tras otra, cambiando la configuración de la forma del IMC de una forma cuadrada a una poligonal para obtener un distinto flujo de aire (Figura 8).

Por un lado, cada almohadilla está cubierta con material a prueba de agua para evitar su penetración. El aire entra por la parte baja hacia los canales donde se divide en dos partes, la primera continúa su flujo entrando al interior del espacio para enfriar, mientras que la segunda parte se dirige hacia el lado que toca el extremo húmedo de la almohadilla para realizar el intercambio de temperaturas por medio de la evaporación, este aire fluye en reversa (de la corriente que ingresa) y se envía a la parte superior para ser extraído. En este diseño, el canal seco maneja el 'aire

cambiante' y el 'aire renovado', mientras que el canal húmedo solo el 'aire cambian'.

Los resultados mostraron que la eficiencia de este modelo depende de la captación de aire que entra, mientras más aire entre por el IMC, menor gasto energético requiere el espacio a enfriar; además, mientras más velocidad presente el aire que ingresa, menor es la capacidad de enfriamiento.

3.3. Membrana hidrofóbica

Es un diseño conformado por una membrana multicapa para el enfriamiento evaporativo, siendo el medio de enfriamiento el agua (que realiza la acción de enfriamiento) y el medio complementario el aire (que apoya el ingreso de las partículas refrescadas con función para enfriar).

Fue desarrollado por Rothmaier (2008) con una lámina de triple capa. Consta de dos membranas hidrofóbicas con características a prueba de agua, pero que permiten el paso del vapor a través de ellas y una fibra hidrofóbica que se encuentra en medio de las otras dos. El agua está en contacto directo con una de estas membranas y es ahí en donde se realiza la evaporación, dejando transitar vapores con ayuda de la ventilación natural hacia la atmósfera e introduciéndolos a los espacios interiores de la edificación una vez que estos se hayan enfriado (Figura 9). Las membranas que se usan en este diseño son densas membranas de poliéster, co-polímeros y éter hidrófobos.

4. Sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto (EEI) activo

4.1 Intercambiador de masa y calor (IMC)

El sistema trabaja de la misma manera que un sistema pasivo, en donde el enfriamiento se logra a través de dos corrientes de aire que interactúan en una misma configuración: la primera corriente ingresa al interior de los espacios sin contener humedad, mientras la otra está en contacto directo con el cuerpo líquido o humectado para realizar el enfriamiento del aire que ingresa. En este caso, la variable para volverse un sistema activo es a través del tipo de configuración para lograr el enfriamiento, siendo dicha configuración una del tipo llamado 'tubo de calor'. Esta se puede lograr por termo-fusión, criogenización,

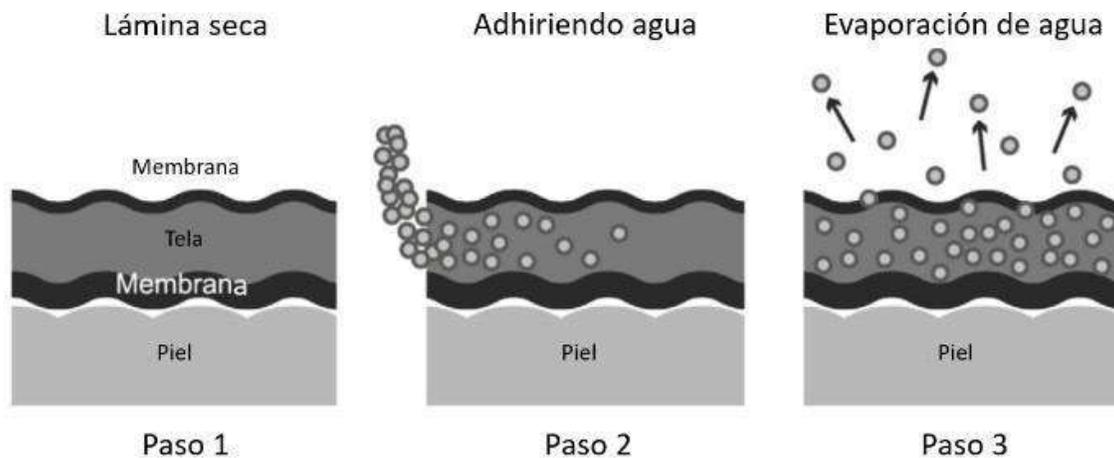


Figura 9. Diagrama de funcionamiento de membrana hidrofóbica (Yang *et al.*, 2019).

rotando o revolviendo el aire para lograr su condensación, así la corriente que condensa es la húmeda y la que evapora es la seca.

La eficiencia de estos modelos se encuentra entre los valores de 50 y 70%; alcanzar estos porcentajes dependen principalmente de la cantidad de aire al que le logra intercambiar el calor, por lo mismo, depende en gran medida de cuánto de este ingresa por los flujos primario y secundario, además de las condiciones térmicas de este.

5. Combinado

5.1. Sistema de enfriamiento evaporativo de dos etapas

Es un sistema que combina una etapa de flujo de aire enfriado de manera indirecta y otra etapa de flujo de aire enfriado de manera directa (Rafique *et al.*, 2015; Heidarinejad *et al.*, 2009): en la primera etapa se enfría sin humedad, mientras que en la segunda se le agrega. Este tipo de sistema ha ganado popularidad en zonas con mucha humedad en el ambiente donde

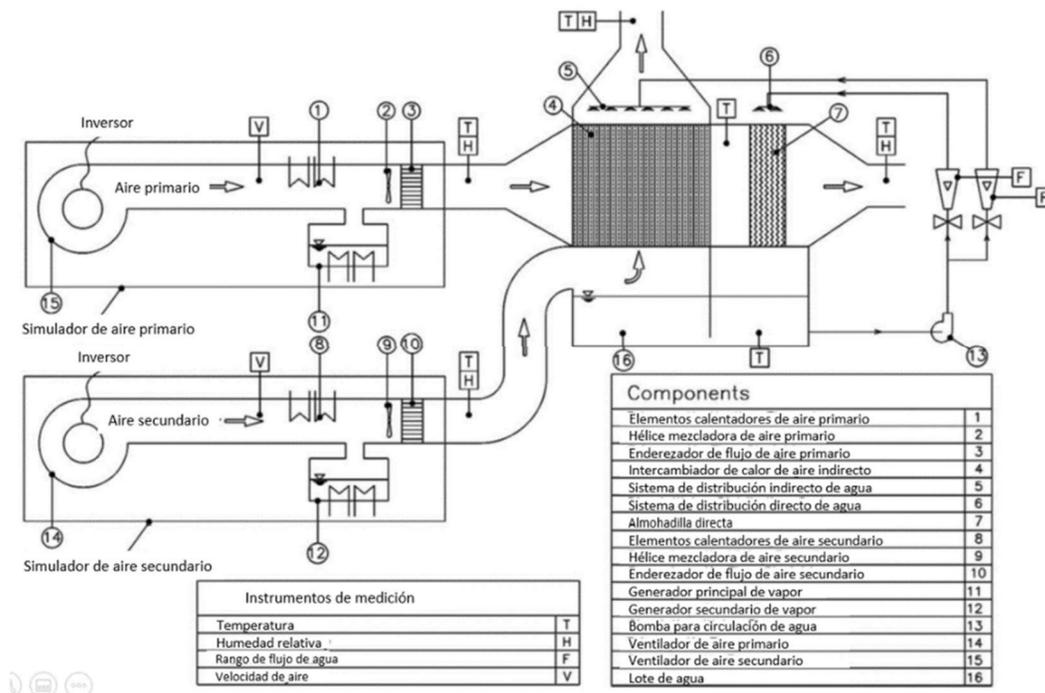


Figura 10. Diagrama de funcionamiento de un sistema de EE de dos etapas (Heidarinejad *et al.*, 2009).

un sistema directo no es suficientemente bueno para reducir la temperatura.

Se ha encontrado en investigaciones previas que los sistemas logran reducir el costo energético entre un 30% y hasta un 75%, comparado con sistemas de refrigeración convencionales.

En el documento que presentan Heidarinejad *et al.* (2009), comparan el uso del agua en un sistema de enfriamiento evaporativo indirecto y un sistema combinado directo/indirecto, colocando estos sistemas en varias condiciones climáticas. El sistema trabaja con cuatro módulos: el primero se trata del suministro de aire primario que está equipado con un ventilador centrífugo el cual cuenta con un sistema que regula temperatura, humedad y dispersión de aire para controlarlo, dependiendo de la condición climática que se quiera evaluar. El segundo módulo consiste en el suministro del aire secundario con un sistema similar al anterior. El tercero se trata de un sistema de enfriamiento directo/indirecto con una unidad intercambiadora de calor con superficie húmeda y una membrana gruesa de celulosa de unos 15 cm de espesor como EED, una bomba para circular agua, medidores y válvulas para el suministro de agua; el suministro del agua en los sistemas EEI y EED es por medio de rociadores. El cuarto está formado por un panel de control para obtener la configuración de temperatura y humedad relativa con el flujo de viento en los primeros dos módulos (Figura 10).

Realizaron las pruebas para siete ciudades en época de verano. En los resultados encontraron que estos sistemas ayudan a conseguir el confort térmico en temporadas de calor con más facilidad que un sistema directo, además de reducir el consumo eléctrico. La efectividad de cada sistema varía, encontrando que para un sistema de enfriamiento evaporativo indirecto va de 55 a 61% de eficiencia, mientras que en un sistema de enfriamiento evaporativo directo va de 108 a 111%.

5.2. Sistema de enfriamiento evaporativo de tres etapas

Funciona ingresando aire del exterior a partir de un sistema de enfriamiento de dos etapas; ingresa aire humectado que, una vez dentro, regresa al sistema indirecto haciendo un reciclado del aire. Gracias a este método, el sistema tiene un ahorro de energía entre

54 y 82%, comparado con un sistema de enfriamiento convencional (Amer *et al.*, 2015).

Conclusiones

Los sistemas de enfriamiento evaporativo tienen distintas configuraciones, por lo que la implementación dependerá de las condiciones y características del lugar donde se desea aplicar, junto a los cambios que se quieran lograr en el interior de los espacios; la eficiencia que pueden alcanzar está relacionada con las condiciones de cada caso específico, las cuales pueden ser climáticas, morfológicas, geográficas y hasta económicas.

Una variable similar en todas las investigaciones es que el flujo de aire juega un papel importante para el funcionamiento, en algunos se obtiene de manera natural mientras que en otros se consigue por medio de motores. En los casos donde el aire entra de manera pasiva, el enfriamiento puede no alcanzar la eficiencia óptima para que el modelo enfríe con la mayor potencia que podría tener realmente.

Para todos los modelos de sistemas EE, una pequeña variación en el funcionamiento representa una diferencia en su capacidad de enfriar, por tal motivo, es indispensable identificar la(s) necesidad(es) de cada situación para aplicar correctamente el uso de un sistema. Las variaciones que pueden existir dentro del sistema van desde tamaños de aberturas o ingreso para el flujo de aire, materiales de fabricación, posición del módulo, cantidad y tipo de líquido humectante, posición de materiales en el interior del módulo, entre otros. Estas variaciones alteran y generan nuevos modelos; sin embargo, continúan trabajando bajo una configuración de sistema existente.

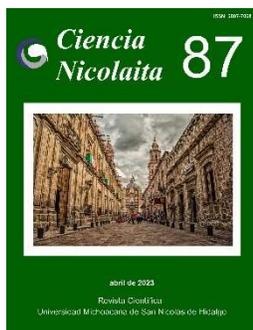
Los sistemas de enfriamiento evaporativo han logrado demostrar que tienen la capacidad para utilizarse con mayor frecuencia en distintas edificaciones y con diversos usos (dependiendo de la disposición que tiene el espacio para colocar el sistema), además de que su uso resulta benéfico para el medio ambiente y para la economía de los habitantes de los espacios donde se utilizan.

Referencias

- Amer, O., Boukhanouf, R. and Ibrahim, H., 2015, A Review of Evaporative Cooling Technologies: *International Journal of Environmental Science and Development*, 6(2), 111-117. DOI:10.7763/IJESD.2015.V6.571
- Amestoy, J., 2010, El planeta Tierra en peligro: Calentamiento Global, Cambio Climático, Soluciones: *San Vicente, España, Editorial Club Universitario*.
- Bagasi, A.A. and Calautit, J.K., 2020, Experimental field study of the integration of passive and evaporative cooling techniques with Mashrabiya in hot climates: *Energy and Buildings*, 225, 110325. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110325>
- Bhamare, D.K., Rathod, M.K. and Banerjee, J., 2019, Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones-The state of art: *Energy and Buildings*, 198, 467-490. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.023>
- Cuce, P.M., Riffat, S., 2016, A state of the art review of evaporative cooling systems for building applications: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1240-1249. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.066>
- Duan, Z., Zhan, C., Zhang, X., Mustafa, M., Zhao, X., Alimohammadisagvand, B. and Hasan, A., 2012, Indirect evaporative cooling: Past, present and future potentials: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9), 6823-6850. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.007>
- Esparza-López, C.J., Escobar del Pozo, C., Al-Obaidi, K.M. and González-Trevizo, M.E., 2022, Improving the Thermal Performance of Indirect Evaporative Cooling by Using a Wet Fabric Device on a Concrete Roof in Hot and Humid Climates: *Energies*, 15(6), 2213. <https://doi.org/10.3390/en15062213>
- Esparza-López, C.J., Escobar del Pozo, C., Gómez Azpeitia, A., Gómez Amador, A. and González Cruz, E.M., 2018, Potential of a wet fabric device as a roof evaporative cooling solution: Mathematical and experimental analysis: *Journal Building Engineering*, 19, 366-375. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.05.021>
- Fardeheb, F., 2009, "Examination and Review of Passive Solar Cooling Strategies in Middle Eastern and North African Vernacular Architecture". In: D.Y. Goswami and Y. Zhao (eds), *Proceedings of ISES World Congress 2007 (vol. I-vol. V)*: Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 2511-2515. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75997-3_508
- Firfiria, V.K., Martzopoulou, A.G. and Kotsopoulos, T.A., 2019, Passive cooling systems in livestock buildings towards energy saving: A critical review: *Energy and Buildings*, 202, 109368. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109368>
- Glaciar ingenierías S.A.S., 2022, "¿Qué es una torre de enfriamiento?" <https://glaciaringenieria.com.co/torre-enfriamiento/> [consultado en febrero de 2022].
- Heidarinejad, G., Bozorgmehr, M., Delfani, D. and Esmaeelian, J., 2009, Experimental investigation of two-stage indirect/direct evaporative cooling systems in various climatic conditions: *Building and Environment*, 44(10), 2073-2079. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.017>
- Kun, F. and Xiang, H., 2014, A case Analysis of Application of Evaporative Cooling Air Conditioning of the Communication Equipment Room in Xi'an. *Applied Mechanics and Materials*, 472, 231-236. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.472.231>
- Lechner, N., 2014, Heating, cooling, lighting: sustainable design methods for architects (3rd ed.): *New Jersey, U.S.A., Wiley*, pp. 276-293.
- Liberati, A., Altman, D.G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. and Ioannidis, J., 2009, The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: Explanation and elaboration: *PLoSMed.*; 6 (7), <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.100010025>
- Liberari, P., Antonellis, S.D., Leone, C., Joppolo, C.M. and Bawa, Y., 2017, Indirect Evaporative cooling systems: modelling and performance analysis: *Energy Procedia*, 140, 475-485. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.159>
- Melillo, J., Richmond, T. and Yohe, G. (eds.), 2014, Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment: *U.S., Global Change Research Program*, 841 pp. ISBN 9780160924026. doi:10.7930/J0Z31WJ2
- National Geographic, 2022, "¿Qué es el calentamiento global?" <https://www.nationalgeographic.com/medio-ambiente/que-es-el-calentamiento-global> [consultado el 1 de octubre de 2022].
- Rafique, M.M., Gandhidasan, P., Rehman, S. and Al-Hadhrami, L.M., 2015, A review on desiccant based evaporative cooling systems: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 145-159. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.051>



- Reidmiller, D.R., Avery, C.W., Easterling, D.R., Kunkel, K.E., Lewis, K.L.M., Maycock, T.K. and Stewart, B.C. (eds.), 2018, Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment, volume II: *U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA*, 1515 pp. doi: 10.7930/NCA4.2018
- Rothmaier, M., Weder, M., Meyer-Heim, A. *et al.*, 2008, Design and performance of personal cooling garments based on three-layer laminates: *Med Biol Eng Comput*, 46, 825-832. <https://doi.org/10.1007/s11517-008-0363-6>
- Saffari, M., De Gracia, A., Ushak, S. and Cabeza, L.F., 2017, Passive cooling of buildings with phase change materials using whole-building energy simulation tools. A review: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(C), 1239-1255. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.139>
- Santamouris, M., 2005, Passive cooling of buildings: Athens, Greece, *Advances of Solar Energy, Group Building Environmental Studies, Physics Department, University of Athens*.
- Schielke, T., 2014, Light Matters. Mashrabiya - Translating Tradition into Dynamic Facades: *ArchDaily*. ISSN 0719-8884. <https://www.archdaily.com/510226/light-matters-mashrabiya-translating-tradition-into-dynamic-facades>
- Sotelo-Salas, C., Escobar del Pozo, C. and Esparza-López, C.J., 2021, Thermal assessment of spray evaporative cooling in opaque double skin facade for cooling load reduction in hot arid climate: *Journal of Building Engineering*, 38, 102156. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102156>
- Somasundar, K.G., Soorej, S., Karthkeyan, S., Jayan, N. and Bhatlu, L.M., 2020, Review on cooling tower nozzle types: *Materials Today: Proceedings*, 37(2), 3016-3018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.723>
- Wen, M.Y., Ho, C.Y., Jang, K.J. and Yeh, C.H., 2014, Experimental study on the evaporative cooling of an air-cooled condenser with humidifying air: *Heat Mass Transfer*, 50, 225-233. <https://doi.org/10.1007/s00231-013-1243-7>
- Xu, P., Ma, X., Zhao, X. and Fancey, K.S., 2016, Experimental investigation on performance of fabrics for indirect evaporative cooling applications: *Building and Environment*, 110, 104-114. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.003>
- Xuan, Y.M., Xiao, F., Niu, X.F., Huang, X. and Wang, S.W., 2012, Research and application of evaporative cooling in China: A Review (I) - Research: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3535-3546. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.052>
- Yang, Y., Cui, G. and Lan, C.Q., 2019, Developments in evaporative cooling and enhancer evaporative cooling - A review: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109230. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.037>
- Yu, Z., Sun, C., Zhang, L., Bao, B., Li, Y., Bu, S. and Xu, W., 2021, Analysis of a novel combined heat exchange strategy applied for cooling towers: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 169, 120910. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120910>
- Zhao, X., Li, J.M. and Riffat, S.B., 2007, Numerical study of a novel counter-flow heat and mass exchanger for dew point evaporative cooling: *Applied Thermal Engineering*, 28(14-15), 1942-1951. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.006>



Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Reutilización de partículas de PET en la elaboración de morteros para construcción

Reuse of PET particles in the manufacture of mortars for construction

Marcelino Benito Vásquez-López, Prisciliano Felipe de Jesús Cano-Barrita,*
Frank Manuel León-Martínez y Martín Hidalgo-Reyes

Para citar este artículo: Vásquez-López Marcelino Benito, Cano-Barrita Prisciliano Felipe de Jesús, León-Martínez Frank Manuel e Hidalgo-Reyes Martín, 2023. Reutilización de partículas de PET en la elaboración de morteros para construcción. Ciencia Nicolaita no. 87, 134-148. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.664>



Historial del artículo:

Recibido: 26 de mayo de 2022
Aceptado: 22 de noviembre de 2022
Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: pcano@ipn.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Reutilización de partículas de PET en la elaboración de morteros para construcción

Reuse of PET particles in the manufacture of mortars for construction

Marcelino Benito Vásquez-López,^{1,2} Prisciliano Felipe de Jesús Cano-Barrita,^{1,*} Frank Manuel León-Martínez¹ y Martín Hidalgo-Reyes²

¹Instituto Politécnico Nacional-CIIDIR Unidad Oaxaca, Hornos No. 1003, Colonia Noche Buena, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.

²Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 carretera México-Textcoco, Chapingo, Estado de México, México.

Resumen

Partículas de PET reciclado se usaron como reemplazo parcial del agregado fino en morteros de cemento Portland. La relación agua/cemento en peso de los morteros fue 0.50, y el PET reciclado se trituró hasta obtener partículas con tamaños menores a 4.75 mm. Las proporciones de sustitución de arena natural por PET fueron 0, 5, 10, 15 y 20% con base en el volumen. Se elaboraron en triplicado especímenes cúbicos de 5 cm por lado y prismas cuadrangulares de 4 cm x 4 cm x 16 cm. Se evaluaron las propiedades reológicas de los morteros en estado fresco, así como las propiedades mecánicas y de durabilidad en estado endurecido. Los resultados indican que el PET incrementa la viscosidad y el esfuerzo de fluencia de los morteros con respecto al control, mostrando valores similares de ambas propiedades en los morteros conteniendo desde 5 hasta 15% de PET. Con relación a las propiedades en estado endurecido, a medida que se incrementó la cantidad de PET se observó una disminución en la velocidad de pulso ultrasónico, en la resistencia a la compresión, en el módulo de elasticidad y en la resistencia a la flexión. La absorción capilar de agua aumentó en los morteros conteniendo PET.

Palabras clave: PET, mortero, reología, resistencia mecánica, absorción de agua

Abstract

Recycled PET particles were used as a partial replacement for fine aggregate in Portland cement mortars. The water/cement ratio by weight of the mortars was 0.50, and the recycled PET was crushed until obtaining particles with sizes smaller than 4.75 mm. The proportions of substitution of natural sand for PET were 0, 5, 10, 15 and 20% based on volume. Cubic specimens of 5 cm per side and quadrangular prisms of 4 cm x 4 cm x 16 cm were made in triplicate. The rheological properties of the mortars in the fresh state, as well as the mechanical and durability properties in the hardened state, were evaluated. Results indicate that the PET increases the viscosity and the yield stress of the mortars, with respect to the control, showing similar values of both properties in the

mortars containing from 5 to 15% of PET. Regarding the properties in the hardened state, as the amount of PET increased, a decrease was observed in the ultrasonic pulse velocity, in the compressive strength, in the modulus of elasticity and in the flexural strength. The capillary absorption of water increased in the mortars containing PET.

Keywords: PET, mortar, rheology, mechanical strength, water absorption

1. Introducción

Los plásticos tienen beneficios sustanciales en términos de su bajo peso, mayor durabilidad y menor costo en comparación con otros materiales (Andrady & Neal, 2009; Thompson *et al.*, 2009). La producción de polímeros en todo el mundo se estimó en 260 millones de toneladas métricas por año para el 2007 (Plastics Europe, 2009). A causa de toda esta producción y disposición final inadecuada, la contaminación del medio ambiente y los problemas asociados a la vida silvestre son visibles, especialmente en la acumulación de plástico en el hábitat terrestre y marino (Gregory, 2009). Aproximadamente el 50% de los plásticos son usados y desechados después de haber sido utilizados una sola vez, tales como envases, acolchados agrícolas, artículos de consumo desechable, tubos, revestimientos de cable, materiales estructurales, dispositivos electrónicos, mobiliario y vehículos (Plastics Europe, 2009). Esto ha originado un grave problema ambiental, ya que por ejemplo al PET le toma entre 100 a 1000 años para degradarse (D. A. Silva *et al.*, 2005). La reducción de este contaminante es cualquier medida que reduzca el volumen de desechos plásticos producidos, siendo el reciclaje una alternativa que permite elaborar nuevos productos (Abdel-Bary *et al.*, 1998).

En el área de materiales para construcción, una aplicación de los plásticos de desecho ha sido en la sustitución parcial de agregados pétreos, especialmente los finos o su uso como fibras de refuerzo. La reutilización de PET en los materiales base de cemento tiene como ventajas la disminución de la disposición de este material en el medio ambiente, inmovilizando el PET en la matriz cementante, además de incentivar la economía circular al procesar el PET para la producción de un sustituto parcial de arena natural. El PET ha sido uno de los plásticos empleados en materiales base de cemento, y las propiedades estudiadas incluyen trabajabilidad, densidad, propiedades

mecánicas, térmicas y de durabilidad. Otros plásticos como el policarbonato también producen un comportamiento similar al producido por las partículas de PET en morteros (Hannawi *et al.*, 2010).

En estado fresco, el efecto de adicionar las partículas planas e irregulares de PET es la reducción del revenimiento del concreto debido a la forma de las partículas (Albano *et al.*, 2009; Ismail & AL-Hashmi, 2008; Meza & Siddique, 2019), así como también se ha reportado un incremento del revenimiento cuando se utilizó en morteros autoconsolidables (Safi *et al.*, 2013). En estado endurecido, las propiedades mecánicas han sido ampliamente estudiadas. Albano *et al.* (2009) investigaron el comportamiento mecánico de morteros conteniendo partículas de PET, en los cuales realizaron sustituciones volumétricas de agregado natural por PET del 10% y 20%, con tamaño promedio de las partículas de PET de 2.6 mm y 11.4 mm. Los resultados mostraron una disminución en la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y módulo de elasticidad. Sin embargo, en el trabajo de Rahmani *et al.* (2013) se observó que la resistencia a la flexión incrementó para porcentajes de reemplazo bajos (5%), aunque disminuye para mayores porcentajes.

Por otra parte, Meza y Salman (2019) utilizaron botellas de PET recicladas para la elaboración de fibras de refuerzo en mezclas de concreto, considerando la cantidad de fibra y la proporción de aspecto de la fibra como factores que afectan la respuesta del concreto a la flexión y su nivel de asentamiento, encontrando que la trabajabilidad disminuye al incluir fibras de refuerzo; asimismo, la tenacidad a la flexión tiende a mejorar cuando se incrementa la cantidad y la proporción de forma de las fibras.

Con relación a la durabilidad, la propiedad evaluada ha sido la absorción capilar de agua. Algunos estudios reportan incremento de la absorción (Albano *et al.*, 2009) debido a la separación que se genera entre las partículas de PET y la pasta de cemento, aunque otros reportan una menor capacidad de absorción por

capilaridad (Marzouk *et al.*, 2007; Safi *et al.*, 2013). En otros trabajos se reportan ambos comportamientos (Silva *et al.*, 2013), dependiendo del tipo de partícula adicionada: pelets, partículas pequeñas y grandes.

Con base en lo antes descrito, el objetivo de esta investigación fue evaluar la influencia que tiene la adición de partículas de PET en la reología de las mezclas y en las propiedades en estado endurecido de morteros, al sustituir parcialmente el agregado fino natural con diferentes porcentajes volumétricos usando partículas de tamaño menores de 4.75 mm y con deficiencia de partículas finas.

Tabla 1
Composición química del cemento
Portland utilizado.

Oxido	% en peso
SiO ₂	21.07
Al ₂ O ₃	3.69
Fe ₂ O ₃	4.5
CaO	61.93
TiO ₂	0.97
P ₂ O ₅	0.1
MgO	1.83
MnO	0.08
Na ₂ O	0.09
K ₂ O	0.3
PPI a 1000 °C	4.38

2. Materiales y Método

2.1. Materiales

Se utilizó cemento Portland ordinario 30RS (Holcim, México), cuya composición química se muestra en el Tabla 1. El agregado fino fue arena de río con módulo de finura de 2.6, absorción de 2.3% y densidad de 2.6 g/cm³. El PET reciclado seleccionado fue del

tipo cristal transparente, adquirido en forma de hojuelas de tamaño máximo 20 mm y una densidad de 1.3 g/cm³.

2.2. Método

2.2.1. Obtención y caracterización de las partículas de PET y el agregado pétreo fino

Se utilizó una licuadora industrial (International, Estado de México, México) para reducir el tamaño inicial de las hojuelas de PET de un tamaño máximo de 20 mm a uno menor de 4.75 mm (Figura 1). Lo anterior debido a que se consideró que al reducir el tamaño de las partículas de PET, se lograría reducir las pérdidas de resistencia a la compresión a porcentajes de sustitución semejantes a los previamente reportados por otros autores (Meza *et al.*, 2021) donde el PET fue usado en tamaños mayores. Se determinaron las curvas granulométricas del agregado fino y del PET (Figura 2) basados en la Norma ASTM C136 (ASTM C136-01, 2001). La granulometría de la arena estuvo dentro de los límites de la norma ASTM C33 (ASTM C33-03, 2003), mientras que el PET triturado tuvo deficiencia de partículas finas; sin embargo, se decidió utilizar el PET con esta granulometría.

2.2.2. Preparación de los morteros y elaboración de especímenes

Las proporciones utilizadas para la elaboración de los morteros con relación agua/cemento en masa de 0.50 se indican en la Tabla 2. El mortero control fue denominado M0, mientras que los morteros con sustitución de 5, 10, 15 y 20% en volumen de agregado fino natural por partículas de PET fueron denomina-

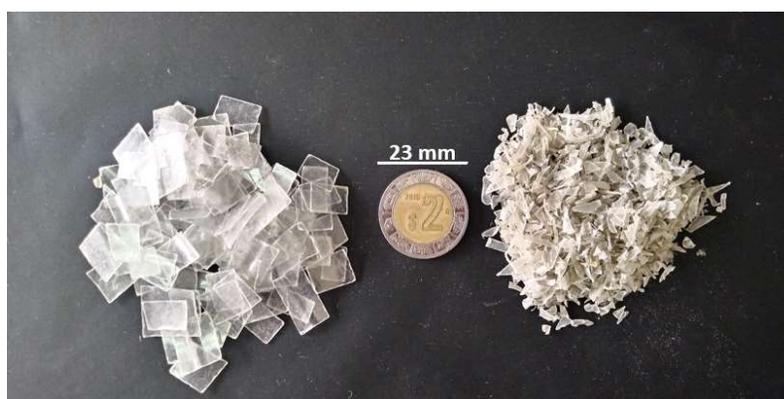


Figura 1. Partículas de PET antes (izquierda) y después (derecha) del proceso de triturado utilizando una licuadora industrial.

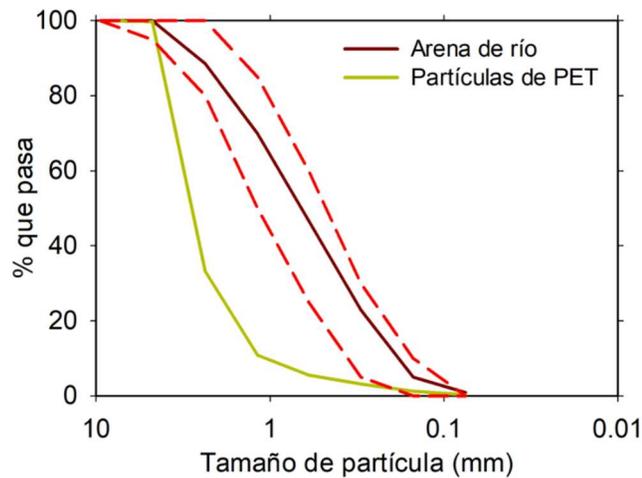


Figura 2. Curva granulométrica del agregado fino natural y del PET triturado. Las líneas discontinuas rojas representan los límites superior e inferior de la ASTM C 33.

dos M1, M2, M3 y M4, respectivamente. La elaboración de los morteros se realizó de acuerdo con la norma ASTM C305 (ASTM C305, 2014), utilizando una mezcladora con movimiento planetario (Economirugo S.A. de C.V., Ciudad de México, México).

Se colaron por triplicado especímenes cúbicos de 5 cm x 5 cm x 5 cm para evaluar la resistencia a la compresión a 28 y 56 días de edad, así como para absorción capilar a 56 días. Los prismas cuadrangulares de 4 cm x 4 cm x 16 cm se elaboraron para determinar la resistencia a la flexión a 56 días. Los moldes se llenaron en dos capas y se vibraron durante 5 s, después se enrasaron en la parte superior. Una vez terminado el llenado de los moldes, se cubrieron con bolsas de plástico para evitar la pérdida de agua por evaporación. Los especímenes se desmoldaron 24 horas después y se curaron dentro de una solución saturada de hidróxido de calcio hasta la edad de prueba.

2.2.3 Caracterización reológica de los morteros

De cada una de las mezclas preparadas se tomó 0.50 L para realizar la caracterización reológica. Las mediciones se realizaron en una sola réplica de cada mortero. Se utilizó un reómetro Physica MCR 301 (Anton Paar, Gaz, Austria) con un sistema de medición de esfera de 8 mm de diámetro para obtener las curvas de flujo a 25 °C. Los datos obtenidos se ajustaron al modelo de flujo de Bingham (Yahia & Khayat, 2001), determinándose los parámetros reológicos de esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica de los morteros en estado fresco.

El modelo de flujo de Bingham se expresa por la Ecuación 1:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma \tag{1}$$

Donde τ es el esfuerzo cortante (Pa), τ_0 es el esfuerzo de fluencia (Pa), μ_p es la viscosidad plástica (Pa·s) y γ es la velocidad de corte (s^{-1}).

2.2.4. Caracterización de los morteros en estado endurecido

2.2.4.1 Velocidad de pulso ultrasónico y módulo de elasticidad

La velocidad de pulso ultrasónico (VPU) se determinó a 1, 3, 7, 14, 28 y 56 días de edad, de acuerdo con la norma ASTM C597 (ASTM C597-16, 2016). Se utilizó un equipo PUNDIT 58-E4800 (Controls, Milán, Italia) con transductores a una frecuencia de 54 kHz. Se registró el tiempo de tránsito y la distancia entre las caras paralelas para determinar la velocidad de pulso ultrasónico. El módulo de elasticidad dinámico se estimó de acuerdo con la Ecuación 2 (ASTM C597-16, 2016):

Tabla 2
Proporciones en peso de materiales utilizados para elaborar 1 m³ de mortero con relación a/c = 0.50.

Mortero	Cemento (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	PET (kg)
M0	512	256	1491	0
M1	512	256	1416	37
M2	512	256	1342	75
M3	512	256	1267	112
M4	512	256	1193	149

$$E = \frac{\rho(1+\mu)(1-2\mu)V^2}{(1-\mu)} \quad (2)$$

Donde E es el módulo de elasticidad dinámico (Pa), ρ es la densidad (kg/m^3), V es la velocidad de pulso ultrasónico (m/s), μ es el módulo de Poisson ≈ 0.18 . La densidad de los morteros fue 2301 kg/m^3 , 2217 kg/m^3 , 2188 kg/m^3 , 2083 kg/m^3 y 1999 kg/m^3 para las muestras M0, M1, M2, M3 y M4, respectivamente.

2.2.4.2 Resistencia a compresión uniaxial y a flexión

Se determinó la resistencia a la compresión a 28 y 56 días de edad en los especímenes cúbicos de 5 cm por lado y se realizó de acuerdo con la norma ASTM C109 (ASTM C109M-16a, 2016). Se utilizó una máquina de compresión ELVEC E-654 con capacidad de 120 toneladas (Elvec S.A. de C.V., Ciudad de México, México).

La resistencia a la flexión se determinó a 56 días, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C348 (ASTM C348-02, 2013). Se utilizó una máquina GEOTEST S5830 (Geotest Instrument Corporation, Illinois, USA) con un punto de carga a la mitad de la longitud del espécimen. Se empleó un anillo de carga con capacidad máxima de 2658 kg para registrar la deformación y, finalmente, con la curva de calibración del anillo se determinó la carga aplicada al espécimen.

2.2.4.3 Absorción capilar

La absorción capilar se determinó de acuerdo con la norma ASTM C1585 (ASTM C1585-13, 2013). A los 56 días de curado se extrajeron los especímenes y se secaron durante 24 horas en un horno a temperatura de $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Una vez que los especímenes se enfriaron, se les aplicó resina epóxica 105 con catalizador 206 (Gougeon Brothers, Inc., Bay City, Michigan, USA) en una proporción de 2:1 en las cuatro caras, dejando libres dos caras opuestas. Se curó la resina durante un día a temperatura ambiente. Los especímenes se colocaron dentro de un recipiente que contenía agua destilada, manteniendo una altura de inmersión de los especímenes en el agua de 2 a 3 mm.

Se midió la ganancia de masa de los especímenes durante los tiempos de 5, 10, 15, 30, 60, 240, 480, 1440 y 2880 minutos después de iniciado el contacto con el agua, utilizando una báscula digital con precisión de 0.01 g. Con esta información se determinó la sorptividad (Hall, 1989), la cual es la capacidad de un

material poroso de absorber un fluido a través de capilaridad y está expresada por la Ecuación 3.

$$i = St^{\frac{1}{2}} + A \quad (3)$$

Donde i es el volumen de agua absorbida por unidad de sección transversal (mm^3/mm^2), S es la sorptividad ($\text{mm}/\text{min}^{1/2}$), t es el tiempo (minutos) y A es la intersección de la recta con el eje de las ordenadas (mm^3/mm^2).

2.2.4.4 Análisis SEM

La microestructura de los morteros, específicamente la interfaz pasta de cemento-partículas de PET, se estudió por medio de microscopía electrónica de barrido, para lo cual se utilizó un microscopio JEOL modelo JSM-IT300LV (JEOL, Akishima, Japón).

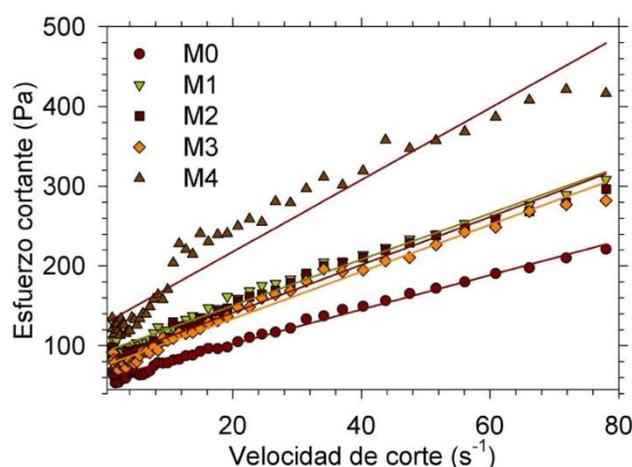


Figura 3. Curvas de flujo de los morteros control y los que contienen distintos reemplazos de agregado fino por PET triturado. Las curvas corresponden a la medición de una sola réplica de cada mortero. Las líneas continuas representan los ajustes de los datos al modelo de flujo de Bingham. El R^2 para los ajustes de datos de los morteros M0, M1, M2 y M3, es de 0.98; y para para el mortero M4 es de 0.94.

3. Resultados y Discusión

3.1. Reología de los morteros en estado fresco

La Figura 3 muestra las curvas de flujo de los morteros, en las cuales se observa que a una misma velocidad de corte los morteros con mayor porcentaje de PET presentaron un mayor esfuerzo cortante, lo que implica una menor trabajabilidad del material. Por

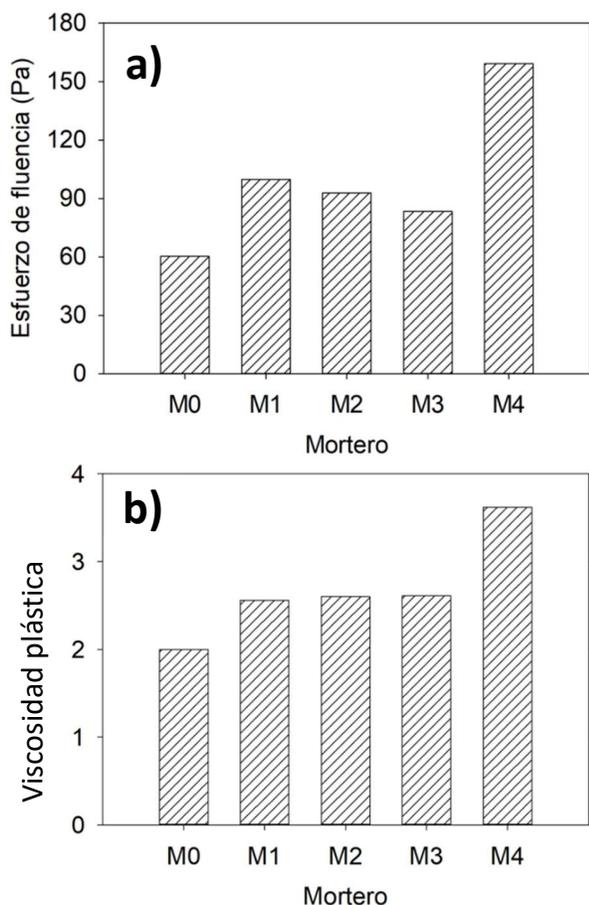


Figura 4. Propiedades reológicas de la mezcla de mortero de acuerdo con el modelo de Bingham, a) Esfuerzo de fluencia, b) Viscosidad plástica. Ambos parámetros estimados de una sola réplica del material.

ejemplo, a la velocidad de 10 s^{-1} se observan valores de esfuerzo de 80 Pa y 170 Pa para M0 y M4, respectivamente, es decir, se duplicó el esfuerzo cortante necesario en M4 con respecto a M0. Sin embargo, el esfuerzo cortante de los morteros M1, M2 y M3 fue semejante entre sí.

Existen dos factores que afectan el comportamiento de flujo de suspensiones de partículas: la fracción de volumen de partículas sólidas en la suspensión y la medida en que las partículas interactúan en la mezcla; también la forma del agregado tiene un efecto importante en la reología de mezclas (Struble *et al.*, 1998).

La Figura 4a muestra el esfuerzo de fluencia de Bingham requerido en las mezclas de mortero para iniciar el flujo. Se observa un incremento mayor a dos veces del esfuerzo de fluencia de M4 con respecto a la mezcla M0, debido al mayor porcentaje de PET, lo cual produjo una mezcla M4 considerablemente menos

trabajable. Los morteros M1, M2 y M3 tuvieron un esfuerzo de fluencia cercano entre ellos, pero intermedio entre los valores de M0 y M4. La Figura 4b muestra la viscosidad plástica de las mezclas, donde se observa un incremento menor que dos veces para la muestra M4 con respecto a la muestra control, por el notable aumento del volumen de PET que produjo una mezcla más viscosa. De la misma manera que en caso del esfuerzo de fluencia, la viscosidad plástica de las mezclas M1, M2 y M3 son similares entre sí, pero intermedias con relación a M0 y M4. La literatura reporta una disminución del revenimiento, estrechamente ligado a un incremento del esfuerzo de fluencia cuando se incluyen partículas de PET (Albano *et al.*, 2009; Meza *et al.*, 2021; Meza & Siddique, 2019; Saikia & De Brito, 2014). Sin embargo, también se ha reportado un incremento del revenimiento (disminución del esfuerzo de fluencia) en concreto autoconsolidable cuando se sustituye desde 10 y hasta 50% (en peso) de arena por partículas de PET (Safi *et al.*, 2013).

3.2. Velocidad de pulso ultrasónico y módulo de elasticidad

La Figura 5 muestra que a una determinada edad la VPU de los morteros disminuye a medida que se incrementa el contenido de PET. Esto se debe, principalmente, a una reducción de la densidad del mortero por la inclusión del PET y por una disminución del módulo de elasticidad, ya que el PET tiene un valor menor comparado con el de la arena y el de la pasta de ce-

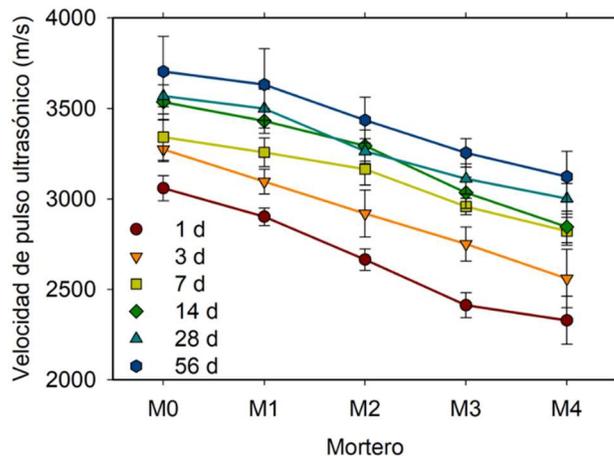


Figura 5. Velocidad de pulso ultrasónico en función de los días de curado de especímenes de mortero con diferentes porcentajes de sustitución de arena natural por PET. Las barras de error representan \pm una desviación estándar.

mento. La densidad y el módulo de elasticidad influyen principalmente en la VPU (Malhotra & Carino, 1991), tal como lo indica la Ecuación 4.

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (4)$$

Por otra parte, para un determinado mortero y mayor tiempo de hidratación, se reduce la porosidad (mayor densidad) y se incrementa el módulo de elasticidad de la pasta de cemento, lo que produce un incremento en la velocidad de pulso ultrasónico.

Con base en la velocidad de pulso ultrasónico se calculó el módulo de elasticidad dinámico (ASTM C597-16, 2016), además de que se estimó con base en la resistencia a compresión utilizando $E = 4700 (f'c)^{1/2}$ (ACI-318). En la Figura 6 se observa que ambos métodos proporcionan valores similares y, en ambos casos también, existe una disminución final del 33% y 38% del mortero M4 con respecto al control M0. El concreto con menor resistencia a la compresión posee valores pequeños de módulo de elasticidad (Saikia & De Brito, 2014). Albano *et al.* (2009) observaron que para una mezcla con sustitución del 20% (en volumen) de arena por PET con tamaño 11.4 mm y una relación agua/cemento de 0.60, el módulo de elasticidad disminuyó un 51% con respecto al control, esto debido al tamaño de partícula y mayor porcentaje de sustitución. Considerando el módulo de elasticidad dinámico a 56 días de edad, se observa una disminución final del mortero M4 del 38% con respecto al control M0. La reducción en el módulo de elasticidad se debe en parte a la disminución de la densidad del mortero por la inclusión del PET y también al menor módulo de elasticidad del PET, con lo cual se disminuye la velocidad de propagación de la onda ultrasónica (Marzouk *et al.*, 2007).

3.3. Resistencia a la compresión uniaxial y a la flexión

La Figura 7a muestra la resistencia a compresión a 28 y 56 días de edad en función del contenido de PET en los morteros. A medida que aumenta el porcentaje de PET, disminuye la resistencia a la compresión. Existe una disminución final de la resistencia a compresión del mortero M4 del 53% y 56% respecto al control M0 a 28 y 56 días, respectivamente. Esta dis-

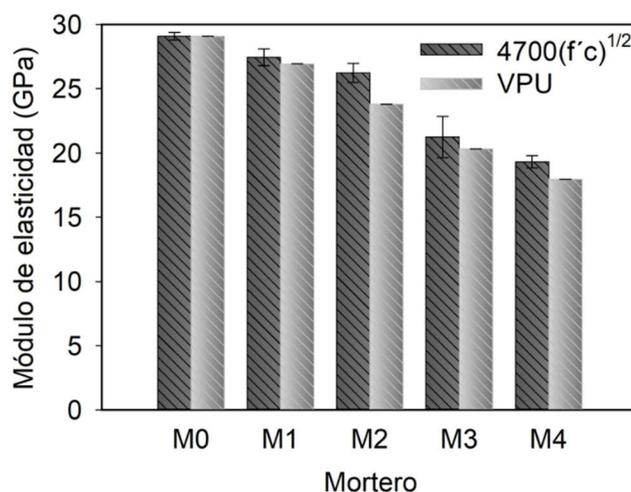


Figura 6. Módulos de elasticidad de los morteros a 56 días de edad calculados con base en el ACI-318 y a partir de la velocidad de pulso ultrasónico. Las barras de error representan \pm una desviación estándar.

minución es consistente con el comportamiento general reportado en la literatura (Albano *et al.*, 2009; da Luz García *et al.*, 2021; Hannawi *et al.*, 2010) y que se muestra en la Figura 7b cuando se normaliza la resistencia con el valor del control. Se observaron dos tendencias en el comportamiento: la primera muestra una mayor disminución de la resistencia con un aumento en el reemplazo de arena (incluye los datos del presente estudio); la segunda corresponde a otras investigaciones donde utilizaron partículas pequeñas o una combinación de partículas pequeñas y grandes, u otras que se agregaron en forma de pélets. Este último grupo posiblemente mejora la adherencia con la pasta de cemento, con lo que se reduce la pérdida de resistencia.

La relación inversamente proporcional entre la resistencia y el contenido de PET en volumen se conserva hasta valores de reemplazo menores a 30% que se ha reportado, ya que para sustituciones superiores al 50%, según Hannawi *et al.* (2010), ya no conserva el comportamiento lineal. La reducción de la resistencia se atribuye a una deficiente unión entre la matriz cementante y las partículas de PET (Hannawi *et al.*, 2010; Saikia & De Brito, 2014). Tratamientos con base de bacterias producen una superficie rugosa y además reducen el ángulo de contacto entre el agua y las partículas de PET (Denaro *et al.*, 2020), lo que implicaría una mejor adherencia con la pasta de cemento.

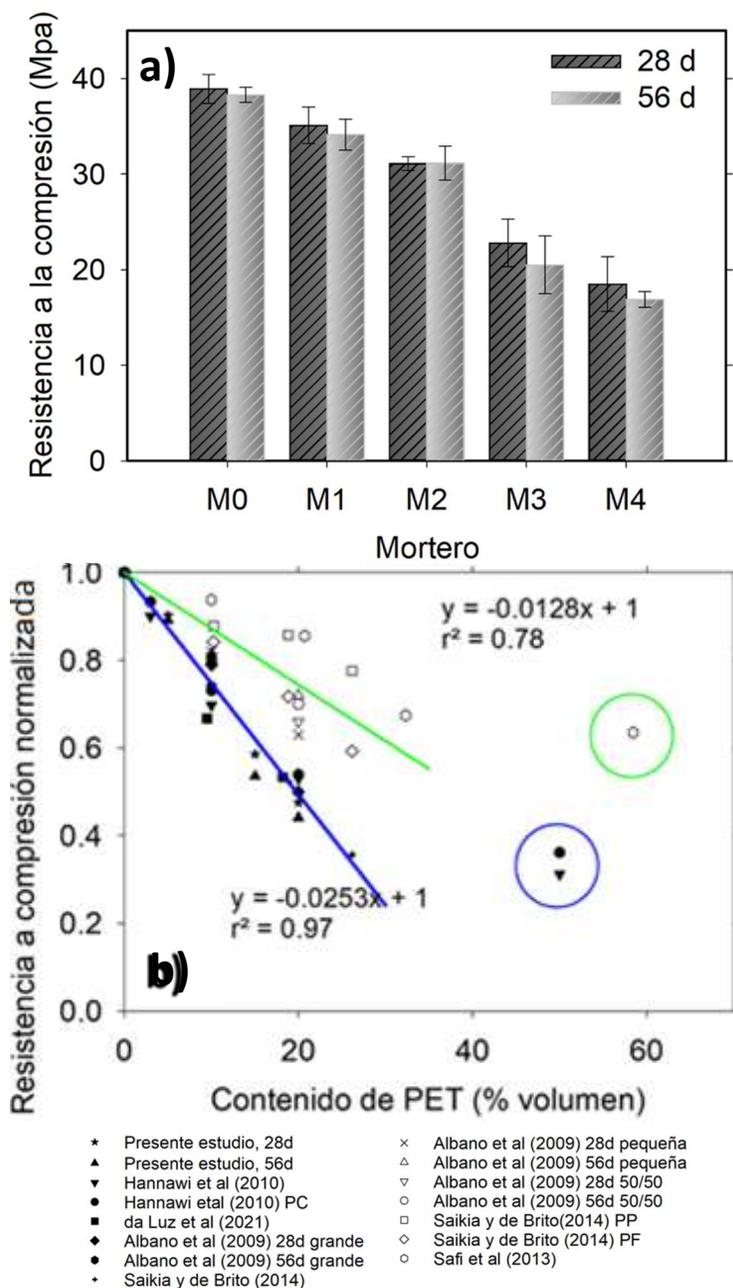


Figura 7. Resistencia a compresión de morteros con sustitución de arena por distintos porcentajes de PET, a) Presente estudio a 28 y 56 días de edad, b) Comportamiento de la resistencia a compresión simple normalizada con respecto al control versus el volumen de sustitución, tanto del presente estudio como en estudios en mortero y concreto reportados en la literatura. Las barras de error indican ± 1 desviación estándar. Hannawi et al (2010): mortero, Da Luz et al (2021): mortero, Albano et al (2009): concreto, Saikia et al (2014): concreto.

La Figura 8a muestra la resistencia a la flexión de los morteros. De manera similar a la resistencia a la compresión, a 56 días de edad se observó en el mortero M4 una disminución de la resistencia a la flexión del 39% con respecto al control M0. Esta disminución fue menor que la observada sobre la resistencia a la compresión, debido a que las partículas de PET redu-

jeron ligeramente la pérdida de resistencia a la tensión del mortero, a pesar del tamaño pequeño de las partículas. Durante los ensayos, se observó una falla dúctil de las probetas y aun estando agrietada toda la sección transversal, las dos partes se mantuvieron unidas. En este mismo sentido, se observó que las probetas del mortero control M0, al agrietarse y fallar, presentaron la típica falla frágil, separándose en dos

partes. Rahmani *et al.* (2013) observaron que cuando la cantidad de partículas de PET aumentan, la resistencia a la flexión tiene una tendencia creciente al principio. Con 5% de sustitución se observó un aumento de 7.5% respecto al control, pero tuvo una disminución final de 13% respecto al control a medida que aumentó el porcentaje de PET.

La disminución de resistencia a la compresión y del módulo de elasticidad afecta la resistencia a la flexión (Saikia & De Brito, 2014). Por su parte, Hannawi *et al.* (2010) observaron una disminución de resistencia a la flexión usando tres tamaños de partícula: 5 mm, 2 mm y 1 mm con relación agua/cemento de 0.50 y diferentes volúmenes de sustitución de agregado fino por agregado ligero PET: 2, 5, 10, 15 y 20%. Obtuvieron

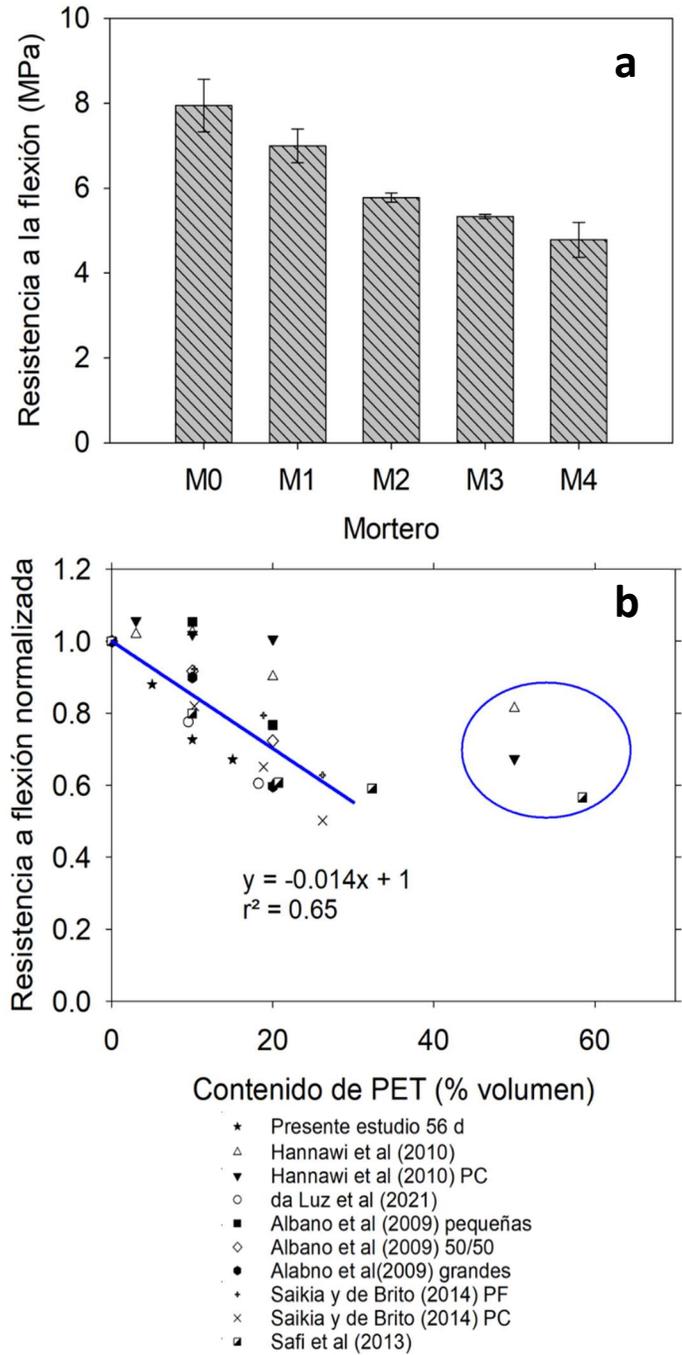


Figura 8. Resistencia a la flexión de morteros con sustitución de arena por distintos porcentajes de PET, a) Presente estudio a 56 días de edad, b) Comparación de resistencia normalizada al control del presente estudio y de estudios reportados en la literatura. Las barras de error indican ± 1 desviación estándar.

resultados iniciales de 4% de incremento de la resistencia a la flexión en 5% y 10% de sustitución, después tuvo una disminución de 10% y 30% respecto a las sustituciones de 10% y 20%. Sakr & El-hakim (2005) indicaron que las variaciones en las propiedades analizadas pueden atribuirse a la forma y textura de las partículas de PET, ya que son planas y lisas, a diferencia del agregado fino natural que son partículas redondas y rugosas.

La Figura 8b muestra el comportamiento general de resistencia a la flexión reportada por otros investigadores, normalizado con respecto a la resistencia del control (incluyendo los resultados del presente estudio) a razón del volumen de sustitución. Esencialmente corresponden a los mismos estudios donde se reportó la resistencia a compresión presentados en la Figura 7b. En principio se observó una mayor dispersión de los resultados y un menor coeficiente de correlación comparado con los calculados para la resistencia a compresión. La pendiente de la recta ajustada a los datos es similar a la que presentaron los datos de resistencia a compresión cuando las partículas de PET fueron pequeñas o una combinación de pequeñas y grandes, o cuando se peletizaron. Sin embargo, la pendiente es menor que la recta donde se encuentran los valores encontrados en el presente estudio, lo que indica que la resistencia a la flexión disminuye menos que la resistencia a compresión para un reemplazo específico de arena por partículas de PET.

3.4. Absorción capilar

La sorptividad se considera un indicativo de la durabilidad del concreto (Basheer *et al.*, 2001; Hall, 1989). La Figura 9a muestra la comparación de las pendientes obtenidas en especímenes M0 y M2, las cuales son las sorptividades o capacidad de un material poroso para absorber un líquido por capilaridad (Hall, 1989). La sorptividad del mortero conteniendo 10% de PET es mayor que el control. La Figura 9b muestra las sorptividades en los morteros con distinto contenido de PET. La adición de PET incrementa la sorptividad en todos los morteros con respecto al control, independientemente del porcentaje de PET. Estos resultados coinciden con lo reportado por otros investigadores, quienes han indicado que existe una separación de entre 5-60 mm entre la partícula de PET y la pasta de cemento que incrementa la porosidad y la permeabilidad del mortero. Sin embargo, también se

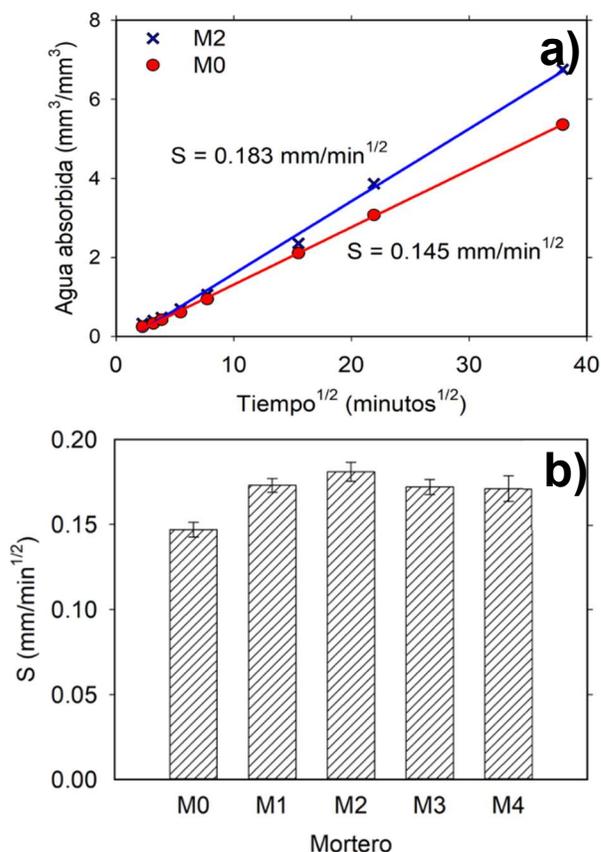


Figura 9. Absorción capilar de especímenes curados en húmedo durante 56 días, a) Comparación de las pendientes (sorptividades) de dos especímenes de mortero (M0 y M2), b) Sorptividad de los morteros con diferentes porcentajes de reemplazo de agregado fino natural por partículas de PET. Las barras de error representan \pm una desviación estándar.

ha reportado que la absorción de agua disminuye con la inclusión de partículas de PET (Safi *et al.*, 2013).

3.5. Microscopía electrónica de barrido

La Figura 10a muestra la superficie de una partícula de PET triturada. Se observa una superficie rugosa a causa del rozamiento de las cuchillas de la trituradora con el PET, lo que mejoraría la adherencia con el mortero. En la Figura 10b se muestra la sección lateral del PET donde se observa mayor rugosidad y desprendimiento de capas por el proceso de triturado.

La Figura 11 muestra la interfaz entre la partícula de PET y la pasta de cemento, con una separación que incrementaría la permeabilidad del mortero y explicaría el incremento en sorptividad reportado en la sección 3.4, al funcionar dicha separación como un capilar. Hannawi *et al.* (2010) han estimado que la separación entre el agregado de PET y la pasta de cemento

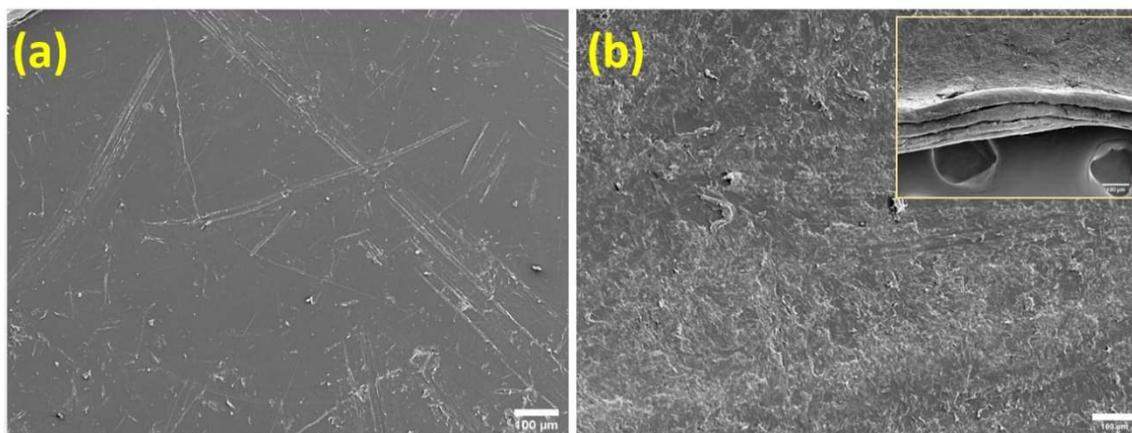


Figura 10. Imágenes de SEM de electrones secundarios (voltaje de aceleración de 5 kV) de las superficies de partículas de PET, a) hojuela PET reciclada, b) partícula de PET triturada. La micrografía insertada sobre la figura (b) presenta una vista transversal de una partícula de PET triturada.

es 5-60 mm. Esta separación también tendría influencia en la reducción del módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión.

La Figura 12a muestra la parte superficial de una partícula de PET que estuvo inmersa en el mortero, en el cual se indican tres zonas de donde se adquirieron espectros de composición elemental por EDS para estimar el producto de hidratación que se adhirió en dichas zonas (Figura 12b). Debido a las proporciones y abundancia elemental, según se indica en las tablas insertadas dentro de los espectros, se trata de partículas de hidróxido de calcio.

Hannawi *et al.* (2010) mostraron imágenes de microscopía electrónica de barrido que resaltan la calidad de contacto entre la matriz y agregados plásticos

en comparación con la matriz y arena natural. La adherencia entre los materiales fue débil utilizando un tamaño máximo de PET de 10 mm, observando que la unión entre matriz-PET aumenta la porosidad del espécimen. A su vez, Marzouk *et al.* (2007) obtuvieron imágenes de SEM pero utilizando PET con tamaño menor de 5 mm y notaron un alto nivel de compactación en los materiales compuestos cuando el volumen sustituido es menor o igual al 50%. Sin embargo, una vez que este volumen supera ese porcentaje, la estructura parece más porosa, lo cual implica disminución de densidad y propiedades mecánicas.

Conclusiones

En el presente trabajo se investigó las propiedades en estado fresco y endurecido de mortero de cemento Portland, con sustitución del 0 al 20% de agregado fino por partículas de PET triturado con tamaño máximo de partícula similar al agregado fino natural, aunque con deficiencia de partículas finas producto del tipo de molienda utilizado.

Las principales conclusiones de este trabajo son:

- Las curvas de flujo de los morteros con PET se ajustaron a un modelo de flujo tipo Bingham, observándose un incremento del esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica con la incorporación de partículas de PET. Los parámetros reológicos de Bingham indicaron que las mezclas con sustituciones en volumen de PET de 5, 10 y 15%, presentan poca diferencia entre sí y en promedio incrementaron el esfuerzo de fluencia en 52% y la viscosidad plástica en 28%. La

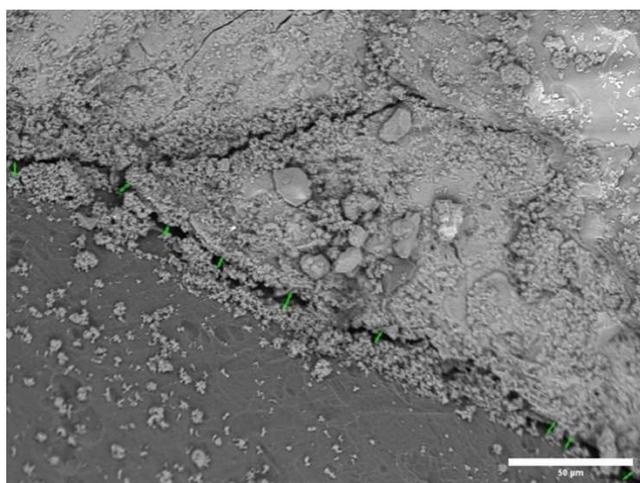


Figura 11. Imagen de SEM de electrones retrodispersados con magnificación de 30X, mostrando la separación entre la pasta de cemento y la partícula de PET. Las flechas verdes son mediciones realizadas para conocer el promedio de ancho de la separación, la cual fue de 5.1 micras.

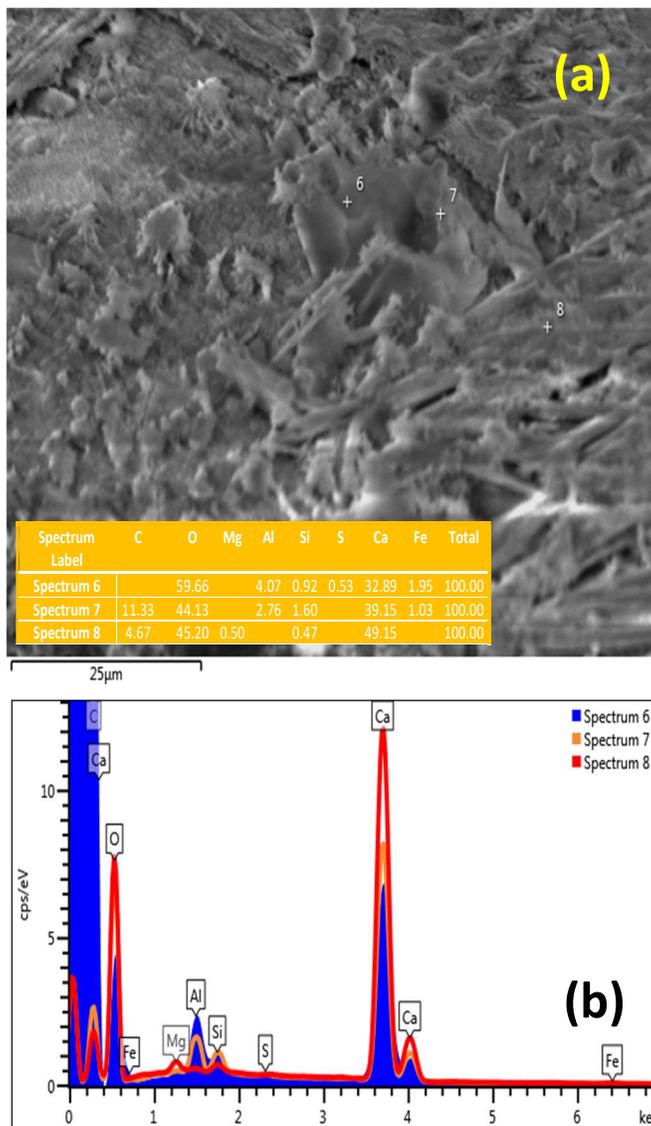


Figura 12. Microscopía electrónica de barrido, a) Imagen de electrones retrodispersados con magnificación de 1500x de la superficie de una partícula de PET que estuvo en contacto con la pasta de cemento dentro de una muestra de mortero, b) Espectros puntuales de EDS correspondientes a los sitios indicados sobre la micrografía. Figura 12a las micro-partículas depositadas sobre la superficie de PET.

- mezcla M4 triplicó el esfuerzo de fluencia y duplicó la viscosidad con respecto a M0.
- Al incrementar el tiempo de hidratación, la velocidad de pulso ultrasónico aumentó, lo que significa que el espécimen incrementó su densidad y el módulo de elasticidad. De igual manera se observó una reducción de VPU conforme incrementaba el contenido de PET, debido a la menor densidad y módulo de elasticidad del material compuesto.
- La resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión disminuyeron con el aumento de PET en la mezcla.
- La sorptividad de los especímenes de mortero a 56 días de edad tuvo un incremento con respecto al control, siendo de 23% en M2 y de 16% en la M4, debido a la separación observada con SEM entre las partículas de PET y la pasta de cemento, que incrementa la porosidad y permeabilidad del mortero.

Con base en las propiedades observadas en este trabajo, algunas aplicaciones potenciales de los morteros con PET podrían ser en la elaboración de elementos de construcción no estructurales como: adoquines, mortero para aplanados en muros y en mortero

para junteo de mampostería. Este último, por ejemplo, aplicable en casos donde se requiera una menor rigidez del mortero de cemento que sea más compatible con bloques de suelo-cemento compactado.

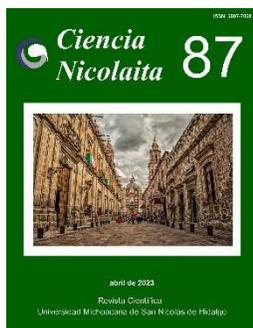
Agradecimientos

Prisciliano Cano agradece a la SIP del IPN por financiar el proyecto con clave 20180029 dentro del cual se desarrolló el presente trabajo, así como al CONACyT por financiar el proyecto CB clave 239727. Marcelino Benito Vásquez López agradece el apoyo financiero brindado por CONACyT para sus estudios de maestría.

Referencias

- Abdel-Bary, E.M., Ismail, M.N., Yehia, A.A. and Abdel-Hakim, A.A., 1998, Recycling of polyethylene films used in greenhouses-development of multilayer plastic films: *Polymer Degradation and Stability*, 62(1), 111-115. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00267-X](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00267-X)
- Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A. and Gutiérrez, A., 2009, Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios: *Waste Management*, 29(10), 2707-2716. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.007>
- Andrady, A.L. and Neal, M.A., 2009, Applications and societal benefits of plastics: *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 364, 1977-1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>
- ASTM C109M-16a, 2016, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. <https://doi.org/10.1520/C0305-06>
- ASTM C136-01, 2001, *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*.
- ASTM C1585-13, 2013, *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes*. <https://doi.org/10.1520/C1585-13.2>
- ASTM C305, 2014, *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. <https://doi.org/10.1520/C0305-13.2>
- ASTM C33-03, 2003, *Standard Specification for Concrete Aggregates*.
- ASTM C348-02, 2013, *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*.
- ASTM C597-16, 2016, *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. ASTM International.
- Basheer, L., Kropp, J. and Cleland, D.J., 2001, Assessment of the durability of concrete from its permeation properties. A review: *Construction and Building Materials*, 15(2-3), 93-103. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00058-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00058-1)
- Da Luz Garcia, M., Oliveira, M.R., Silva, T.N. and Castro, A.C.M., 2021, Performance of mortars with PET: *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(2), 699-706. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01160-w>
- Denaro, R., Aulenta, F., Crisafi, F., Di Pippo, F., Cruz Viggi, C., Matturro, B., Tomei, P., Smedile, F., Martinelli, A., Di Lisio, V., Venezia, C. and Rossetti, S., 2020, Marine hydrocarbon-degrading bacteria breakdown poly(ethylene terephthalate) (PET): *Science of the Total Environment*, 749, 141608. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141608>
- Gregory, M.R., 2009, Environmental implications of plastic debris in marine settings, entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions: *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 364(1526), 2013-2025. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0265>
- Hall, C., 1989, Water sorptivity of mortars and concretes: a review: *Magazine of Concrete Research*, 41(147), 51-61. <https://doi.org/10.1680/mac.1989.41.147.51>
- Hannawi, K., Kamali-Bernard, S. and Prince, W., 2010, Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates: *Waste Management*, 30(11), 2312-2320. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.028>
- Ismail, Z.Z. and AL-Hashmi, E.A., 2008, Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement: *Waste Management*, 28(11), 2041-2047. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.023>
- Malhotra, V.M. and Carino, N.J., 1991, Nondestructive testing of concrete: *Florida, Estados Unidos, CRC Press*.
- Marzouk, O.Y., Dheilily, R.M. and Queneudec, M., 2007, Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites: *Waste Management*, 27(2), 310-318. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012>
- Meza, A., Pujadas, P., López-Carreño, R.D., Meza, L.M. and Pardo-Bosch, F., 2021, Mechanical optimization of concrete with recycled pet fibres based on a statistical-

- experimental study: *Materials*, 14(2), 1-20.
<https://doi.org/10.3390/ma14020240>
- Meza, A. and Siddique, S., 2019, Effect of aspect ratio and dosage on the flexural response of FRC with recycled fiber: *Construction and Building Materials*, 213, 286-291.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.081>
- Plastics Europe, 2009, The Compelling Facts About Plastics 2009. An analysis of plastics production, demand and recovery for 2008: *Bruselas, Plastics Europe*, 24 pp.
<https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2009-Compelling-facts.pdf>
- Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M.H.A., Allahyari, H. and Nikbin, I.M., 2013, On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles: *Construction and Building Materials*, 47, 1302-1308.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041>
- Safi, B., Saidi, M., Aboutaleb, D. and Maallem, M., 2013, The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties: *Construction and Building Materials*, 43, 436-442.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.049>
- Saikia, N. and De Brito, J., 2014, Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate: *Construction and Building Materials*, 52, 236-244.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>
- Sakr, K. and El-hakim, E., 2005, Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties: *Cement and Concrete Research*, 35(3), 590-596.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.023>
- Silva, D.A., Betioli, A.M., Gleize, P.J.P., Roman, H.R., Gómez, L.A. and Ribeiro, J.L.D., 2005, Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials: *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1741-1746.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.040>
- Silva, R.V., De Brito, J. and Saikia, N., 2013, Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates: *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 23-31.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017>
- Struble, L., Szecsy, R., Lei, W.-G. and Sun, G.-K., 1998, Rheology of Cement Paste and Concrete: *American Society for Testing and Materials*, 20(2), 269-277.
<https://doi.org/10.1520/CCA10421J>
- Thompson, R.C., Swan, S.H., Moore, C.J. and Saal, F.S., 2009, Our plastic age: *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 364, 1973-1976. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0054>
- Yahia, A. and Khayat, K.H., 2001, Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudoplastic grout: *Cement and Concrete Research*, 31(5), 731-738. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00476-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00476-8)



Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Análisis de las propiedades físicas de suelos volcánicos de bancos de materiales para construcción: efecto en su comportamiento mecánico

Analysis of the physical properties of volcanic soils of building material quarry: effect on their mechanical behavior

Diana Concepción Santos-Tress,* Teresa López-Lara, Juan Bosco Hernández-Zaragoza, Jaime Horta-Rangel y Luis Arturo Vidal-Sampayo

Para citar este artículo: Santos-Tress Diana Concepción, López-Lara Teresa, Hernández-Zaragoza Juan Bosco, Horta-Rangel Jaime y Vidal-Sampayo Luis Arturo, 2023. Análisis de las propiedades físicas de suelos volcánicos de bancos de materiales para construcción: efecto en su comportamiento mecánico. Ciencia Nicolaita no. 87, 149-158. DOI:

<https://doi.org/10.35830/cn.vi87.666>



Historial del artículo:

Recibido: 25 de mayo de 2022
Aceptado: 27 de septiembre de 2022
Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: diana_0328w@hotmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Análisis de las propiedades físicas de suelos volcánicos de bancos de materiales para construcción: efecto en su comportamiento mecánico

Analysis of the physical properties of volcanic soils of building material quarry: effect on their mechanical behavior

Diana Concepción Santos-Tress,* Teresa López-Lara, Juan Bosco Hernández-Zaragoza, Jaime Horta-Rangel y Luis Arturo Vidal-Sampayo.

Universidad Autónoma de Querétaro, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Querétaro, México

Resumen

En México, los tepetates representan 30% de la superficie del país; sin embargo, es poco aprovechado a pesar de ser sustentable por su fácil acceso. En la industria de la construcción, el tepetate es usado como relleno, pero el efecto mecánico de sus propiedades físicas como material de construcción se desconoce. Con base en esto, se realizó la caracterización de varios suelos volcánicos de la ciudad de Querétaro, México, con la finalidad de analizar sus propiedades físicas, concluyéndose que los tepetates son suelos con cantidades predominantes de arenas y que la cuantía de finos depende de la ubicación del muestreo. Los suelos presentan plasticidad, aun cuando predominan arenas, teniendo posibilidades de colapso, situación que debe prevenirse.

Palabras clave: tepetate, granulometría, suelo volcánico, arenas, suelos

Abstract

In Mexico, the tepetates represent 30% of the country's surface, which makes evident the little use, despite being sustainable due to its easy access. In the construction industry, tepetate is used as a filler, but the mechanical effect of its physical properties as a construction material is unknown. Based on this, the characterization of several volcanic soils in the city of Querétaro, México, was carried out in order to analyze their physical properties. It is concluded that tepetates are soils with predominant amounts of sand and that the amount of fines depends on the sampling location. The soils show plasticity even when sand predominates, having the possibility of collapse, a situation that must be prevented.

Key words: tepetate, granulometry, volcanic soil, sand, soils



Introducción

En los alrededores de las zonas volcánicas del continente americano se ubican bancos de suelos residuales producto de la meteorización de cenizas volcánicas (Williams, 1972). La definición de suelo residual es variante, pero podría entenderse como un suelo derivado de la meteorización y descomposición de la roca *in situ*, el cual no ha sido desplazado de su ubicación de origen (Blight & Leong, 1997).

El “tepetate”, como comúnmente se le llama a las tobas pumíticas o tobas calcáreas en México, es un material muy empleado en la industria de la construcción en México por su abundancia y bajo precio. Es un material ligero, de cohesión muy corta y de peso volumétrico de 1200 kg/m³ en promedio, variando en su composición. Los yacimientos de las tobas son numerosos y se encuentran en todos los terrenos inmediatos a los suelos de origen volcánico en toda la extensión del país (Barbara, 1979). Se estima que en México, aproximadamente el 30% del territorio nacional, dispone de este tipo de material (Gama Castro *et al.*, 2007), por lo que resulta de gran importancia su análisis.

Como material de construcción, el tepetate ha jugado un papel importante en el desarrollo del México moderno (Williams, 1972). De hecho, su uso es conocido desde hace muchos años, puesto que en varias ruinas arqueológicas se han encontrado plataformas y muros de tepetate comprimido (Healan, 1989).

Actualmente, el tepetate es usado para el mejoramiento de suelos; se entiende por mejoramiento de suelo al procedimiento mecánico y artificial mediante el cual se busca obtener un material que cumpla con los requerimientos mínimos de resistencia, permeabilidad y estabilidad volumétrica (Zepeda, 2004).

Uno de los mejores indicadores para la sostenibilidad de la construcción, es el uso de materiales locales terrosos que son completamente reciclables y ahorradores de energía durante su ciclo de vida (López Lara *et al.*, 2013).

Aunque el tepetate es un suelo de usos limitados, es de gran importancia su estudio ya que se tiene gran disposición de él a lo largo de todo México y el mundo, por lo cual esta investigación se enfoca en estudiar sus propiedades físicas para luego relacionarlas con su comportamiento volumétrico como material de construcción.

Metodología

Localización de los bancos de material

Esta investigación inició con la localización de los bancos para la obtención de muestras, para ello, se realizó el muestreo en la ciudad de Santiago de Querétaro, México, ubicada en las coordenadas geográficas de latitud 20°35'15"N, longitud 100°23'34"W, teniendo una altitud media sobre el nivel del mar de 1820 m, compuesto por los municipios conurbados Corregidora y El Marqués. Los bancos estudiados fueron cuatro: 1) Tlacote, 2) Mckey, 3) Alpher y 4) Zaquia. Dichos bancos fueron complementados con otros reportados, con el objetivo de observar las características de todos.

Clasificación del suelo desde el punto de vista edafológico

Los bancos se localizaron en los mapas edafológicos de la ciudad de Querétaro para identificar el tipo de suelo.

Caracterización de los materiales de los bancos

Teniendo las muestras de los bancos seleccionados, se procedió a realizar la caracterización de material, iniciando con su granulometría de acuerdo al procedimiento que ofrecen las normas NMX-C-111-ONNCCE-2018 (ONNCCE, 2018). Para la obtención de los límites de plasticidad, se realizaron los ensayos correspondientes siguiendo los lineamientos que se indican en la NMX-C-416-ONNCCE (ONNCCE, 2003).

Clasificación del suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

El SUCS clasifica los suelos con base en el tamaño de sus partículas y plasticidad, por lo que una vez extraídos, se hizo la clasificación de los suelos.

Resultados

Localización de bancos

A continuación, se describen las localizaciones de los bancos, así como la imagen del suelo de cada uno. La Tabla 1 resume esta información.

- Banco no. 1. Materiales “Tlacote” (Figura 1). Ubicado en Tlacote el Bajo, es una localidad del estado mexicano de Querétaro

Tabla 1
Ubicación de los bancos estudiados

Ubicación	Designación	Coordenadas
1	Tlacote	20°39'47.8"N; 100°30'58.3"O
2	Mckey	20°40'27.2"N; 100°29'16.7"O
3	Alpher	20°37'54.4"N; 100°18'53.1"O
4	Zaquia	20°39'16.7"N; 100°19'30.3"O
5	T3	20°39'07"N; 100°28'53"O
6	J1	20°40'09"N; 100°27'50"O
7	J2	20°38'59"N; 100°25'33"O
8	C1	20°34'33"N; 100°17'10"O
9	C2	20°34'43"N; 100°18'48"O
10	C3	20°34'26"N; 100°18'48"O



Figura 1. Imagen del suelo del banco no.1. Materiales “Tlacote”.

que forma parte del municipio de Querétaro y se localiza en las inmediaciones de la capital, Santiago de Querétaro, en el libramiento Norponiente en las coordenadas 20°39'47.8"N 100°30'58.3"W.

- Banco no. 2. Materiales “Mckey” (Figura 2). Ubicado en la localidad El Paraíso en el estado mexicano de Querétaro, cercano a Paseo Querétaro y a la estación no. 5 de



Figura 2. Imagen del suelo del banco no.2. Materiales “Mckey”.

Bomberos Querétaro, con las coordenadas 20°40'27.2"N 100°29'16.7"W.

- Banco no. 3. Materiales “Alpher” (Figura 3). Ubicado en la localidad de El Marqués en el estado de Querétaro, en la carretera estatal Querétaro-Tequisquiapan, localizado en las coordenadas 20°37'54.4"N 100°18'53.1"W.

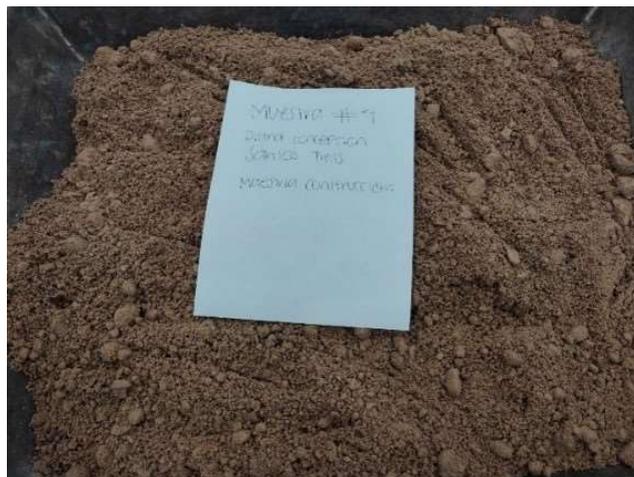


Figura 3. Imagen del suelo del banco no.3. Materiales “Alpher”.

- Banco no. 4. Materiales “Zaquia” (Figura 4). Ubicado en el término del Fraccionamiento “Zaquia” entrando por Cto. Universidades, dentro de la localidad de El Marqués en el estado de Querétaro, con coordenadas 20°39'16.7"N 100°19'30.3"W.



Figura 4. Imagen del suelo del banco no.4. Materiales “Zaquia”.



Figura 5. Ubicación de los bancos en activo (1 a 4) y de los inactivos (5 a 10).

- Bancos no. 5-10. Denominado T3 (Banco 5) corresponde a la zona de Tlacote; los bancos J1 y J2 (bancos 6-7, respectivamente) se localizan en la zona de Jurica, mientras que los bancos C1, C2 y C3 (bancos 8-10, respectivamente) se encuentran en la zona denominada “Conín” (Rosales Hurtado, 2011). Las ubicaciones pertenecen a las inmediaciones de la ciudad de Querétaro, México. Estos bancos fueron los utilizados para complementar la investigación; en estos bancos no se reportan imágenes del suelo.

Clasificación del suelo desde el punto de vista edafológico

La Tabla 1 muestra el resumen de las ubicaciones de los bancos estudiados.

La Figura 5 muestra las ubicaciones de los bancos en activo estudiados en la investigación (1-4), así como los bancos analizados anteriormente (5-10) (Rosales Hurtado, 2011) y que en la actualidad están explotados e inactivos. En la Figura 5 se puede observar que los bancos de esta investigación (1-4) se encuentran más alejados de la ciudad respecto a los bancos reportados (5-10). De hecho, en general, todos los bancos reportados e inactivos (5-10), se encuentran actualmente dentro de la ciudad de Querétaro (5-10).

En la Figura 6 se observa el tipo de suelo desde el punto de vista edafológico que está asociado a la ubicación de cada banco, de acuerdo al INEGI. Se puede observar también que el suelo predominante es el Planosol para todos los bancos (Tabla 2). El término Planosol deriva del vocablo latino *planus* que significa ‘llano’, haciendo alusión a su presencia en zonas llanas, estacionalmente inundadas. Se caracterizan por un horizonte eluvial degradado que sobreyace abruptamente sobre un denso subsuelo. El material lo constituyen depósitos aluviales o coluviales arcillosos. Se asocian a terrenos llanos, estacionales o periódicamente inundados, de regiones subtropicales, templadas, semiáridas y subhúmedas con vegetación de bosque caro o pradera (FAO, 2022). Esta descripción se ajusta perfectamente al suelo de este trabajo.

Caracterización de los materiales de los bancos y clasificación de suelos según SUCS

Se realizó el análisis granulométrico a cada una de las muestras de los bancos analizados, con los cuales se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3. La granulometría fue utilizada para realizar la clasificación SUCS de los suelos y, con base en la distribución de tamaños, se clasificaron como arenas (S), ya que es el tamaño que predomina (2 mm a 0.150 mm) en todos los bancos. Los bancos que tienen pocos finos (1-3% aproximadamente) quedaron como SW (arenas

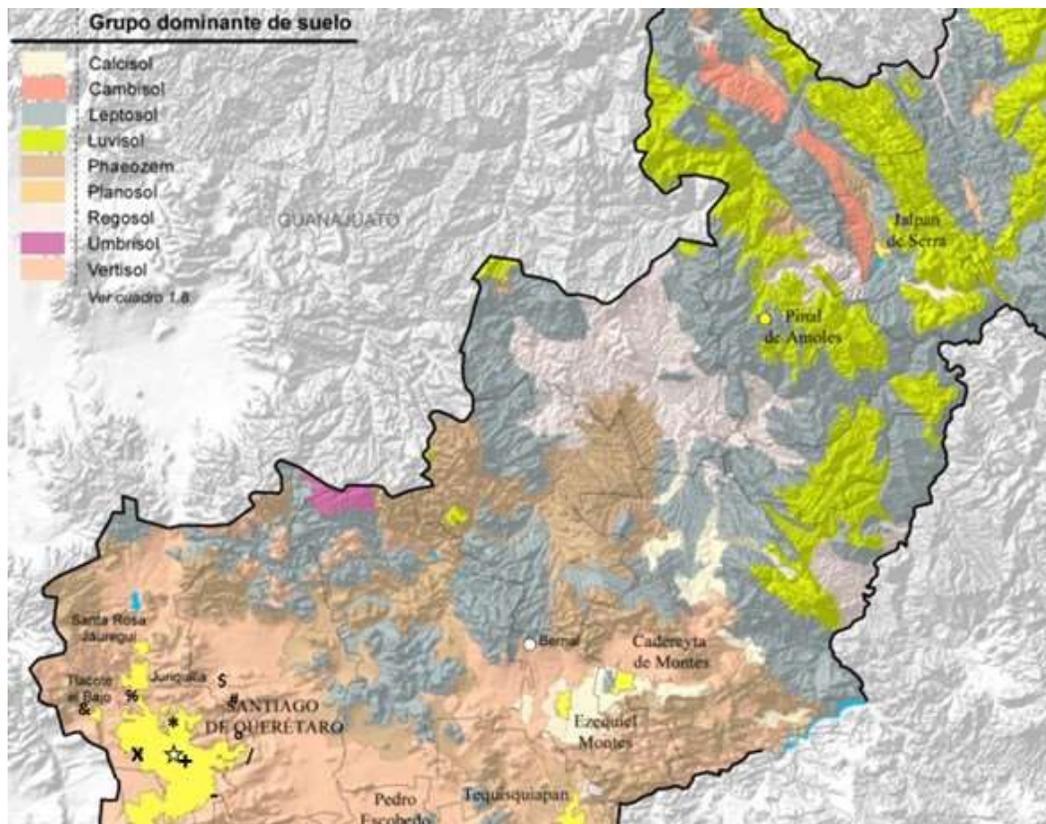


Figura 6. Tipos de suelos asociados a la ubicación de los bancos.

bien graduadas) y los bancos con mayor cantidad de finos (14-27% aproximadamente) quedaron como SM (arenas limosas). La diferencia entre ambas clasificaciones es la cantidad de finos.

Tabla 2.

Tipos de suelo desde el punto de vista edafológico asociado a la ubicación de cada banco.

Ubicación	Símbolo	Banco
1	&	Tlacote
2	%	Mckey
3	#	Alpher
4	\$	Zaquia
5	x	T3
6	*	J1
7	+	J2
8	-	C1
9	°	C2
10	/	C3

Lo anterior puede estar asociado a que los materiales de los bancos 1-4 están más alejados de la ciudad y, aunque el origen es el mismo, el material que se encuentra dentro de la ciudad muestra más finos debido, probablemente, a que la ciudad de Querétaro estuvo en algún momento bajo un lago, siendo la

Tabla 3

Resultados del análisis granulométrico de las muestras de los bancos.

Ubicación	Banco	% de grava	% de arena	% de fino	SUCS
1	Tlacote	25.86	72.81	1.32	SW
2	Mckey	12.47	85.34	2.17	SW
3	Alpher	13.11	85.83	1.045	SW
4	Zaquia	31.26	65.87	2.86	SW
5	T3	3.280	82.400	14.320	SM
6	J1	9.130	70.100	20.720	SM
7	J2	10.200	69.130	20.670	SM
8	C1	16.352	66.613	17.035	SM
9	C2	1.793	71.099	27.107	SM
10	C3	5.254	76.515	18.232	SM

parte más baja los finos producto de la intemperización física y química, transportados por aire y agua, depositados en campo, pudiéndose observar una gran diversidad de suelos entre los que destacan los residuales, transportados (del tipo lacustre, fluvial) y de precipitación química. Sus orígenes y propiedades les dan comportamientos tan peculiares como el caso de las arcillas de alta plasticidad, potencialmente expansivas y los limos, latentemente colapsables (Manilla Aceves *et al.*, 2022).

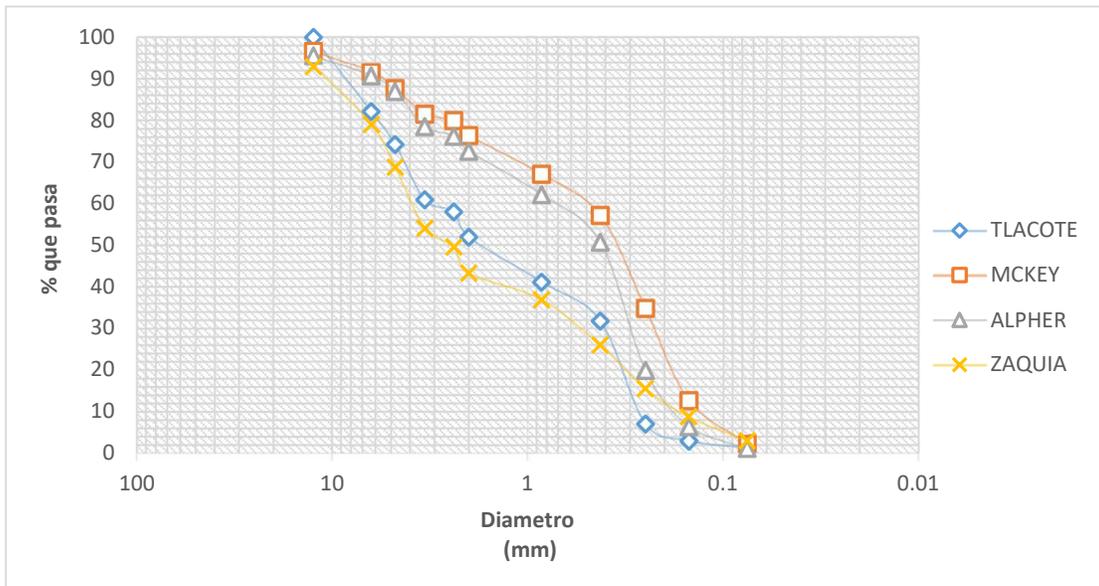


Figura 7. Curvas granulométricas para los bancos 1 a 4.

En la Figura 7 se muestran las curvas granulométricas propias del presente trabajo, en la Figura 8 se muestran las curvas granulométricas de los bancos estudiados en la investigación base (Rosales Hurtado, 2011) y, finalmente, en la Figura 9 se muestra un concentrado de las curvas granulométricas de ambos estudios, en las cuales se observa el comportamiento de cada uno de los suelos de los bancos.

En la Figura 7 se muestra que los bancos tienen granulometrías similares para el banco Mckey y Alpher, así como para el Zaquia y Tlacote, aun cuando son

bancos que se encuentran alejados entre sí, con rangos de diferencias entre 18.79% en gravas, 19.96% en arenas y finos 1.815%, tomando de referencia el máximo respecto al mínimo.

En la Figura 8 se muestra que todos los bancos tienen granulometrías parecidas con un pequeño rango de diferencia en los porcentajes que pasan: gravas 29.467%, arenas 15.78% y finos 12.787%, tomando como referencia el máximo respecto al mínimo porcentaje.

En la Figura 9 se graficaron todas las granulometrías de los bancos y se observa que el banco Mckey y

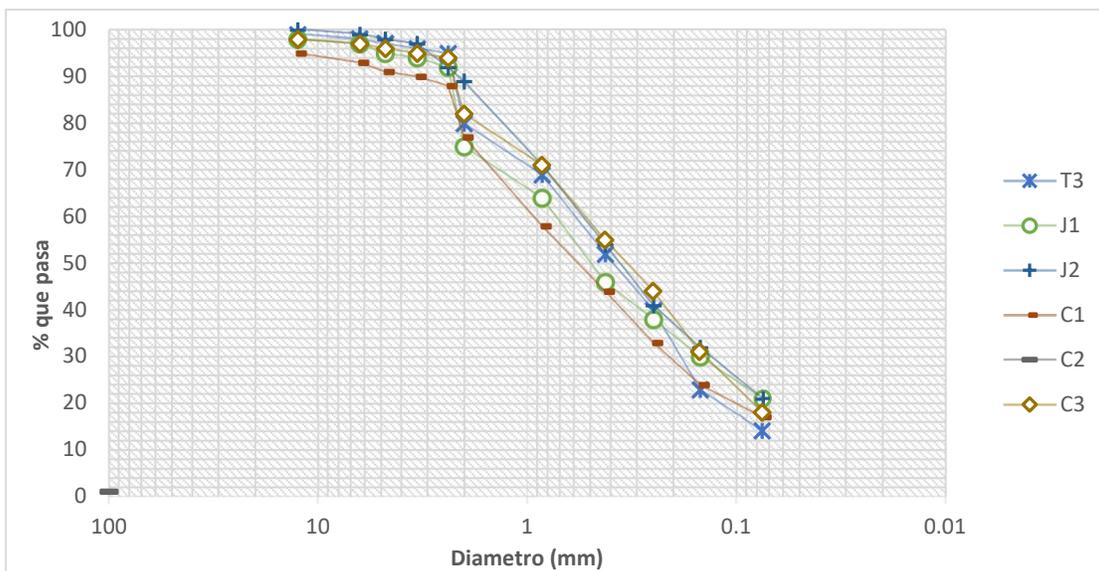


Figura 8. Curvas granulométricas para los bancos 5 a 10.

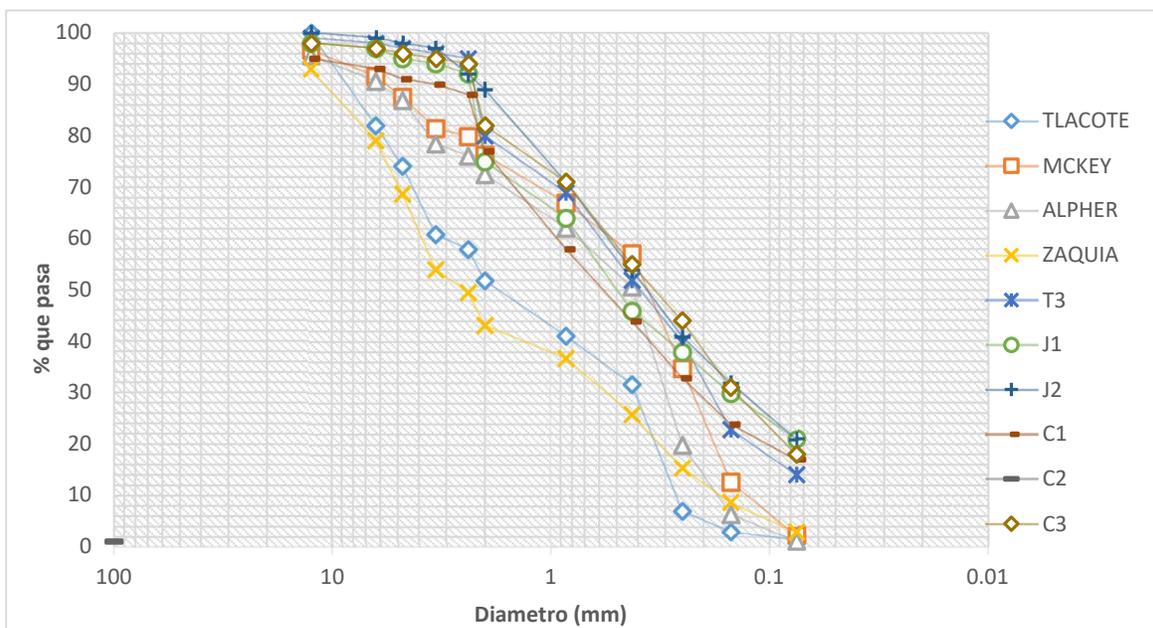


Figura 9. Curvas granulométricas para todos los bancos.

Alpher tienen granulometrías similares a los bancos reportados, mientras que los bancos de Zaquia y Tlacote se separan en sus porcentajes que pasan.

Lo anterior muestra que los materiales de los bancos que se están explotando actualmente, tienen mayor cantidad de arenas y poca cantidad de finos porque están más lejos de la ciudad, lo cual se explica porque no estuvieron expuestos al agua del valle de Querétaro. En la práctica de la construcción, los tepetates son mejor recibidos cuando la cantidad de finos es mínima, como el caso de los bancos 1-4, es decir, que los

bancos alejados del valle de Querétaro tendrán menos finos, por lo tanto, serán aptos para la construcción.

Plasticidad

La Tabla 4 muestra los límites líquidos —también llamados límites de Atterberg— obtenidos mediante la copa de Casagrande, los límites plásticos y los índices plásticos. En esta tabla se muestra que solo en los bancos 1-4 existe plasticidad, mientras que en los bancos 5-10 no se pudo medir porque se cerraban inme-

Tabla 4
Límites líquidos, plásticos e índices plásticos para todos los bancos.

Ubicación	Banco	Limite liquido	Limite plástico	Índice de plasticidad
1	Tlacote	36.085	27.13	8.955
2	Mckey	41.729	32.46	9.26
3	Alpher	40.466	30.59	9.876
4	Zaquia	34.219	26.42	7.799
5	T3	NP	NP	NP
6	J1	NP	NP	NP
7	J2	NP	NP	NP
8	C1	NP	NP	NP
9	C2	NP	NP	NP
10	C3	NP	NP	NP
NP= No hay plasticidad.				

diatamente en la copa de Casagrande para el límite líquido y para el límite plástico, el suelo no formaba rollos de 10 cm de longitud y 3 mm diámetro sin romperse; haber logrado estos rollos nos habría indicado el contenido de agua correspondiente al límite plástico. Lo anterior indica que aunque se trata del mismo suelo, los volcánicos extraídos del valle de Querétaro (5-10), prácticamente se encuentran lavados (sin arcilla) por el antecedente de que estos suelos estuvieron cubiertos por agua; mientras que en los bancos 1-4, que se encuentran más lejos de la ciudad, se observa que tienen arcilla en su contenido por la plasticidad presentada, lo que significa que estos materiales no alcanzaron a estar cubiertos por agua.

La plasticidad presentada en los bancos 1-4 indica arcilla presente, pero no necesariamente proviene de la cantidad de finos de las muestras de suelos de los bancos, ya que es muy baja (1-3% aproximadamente), por lo que se concluye que esta plasticidad viene de arcilla adherida a las arenas. Este hallazgo es muy importante porque puede estar relacionado, probablemente, a la característica de colapso que presentan estos suelos, debido a las grandes cantidades de arena mezcladas con arcilla (detectada con la plasticidad) que hace la función de unir los agregados; cuando ingresa agua, se deshacen dichas uniones. Por otro lado, las granulometrías presentadas se asocian a las observadas en suelos con características de colapso, los cuales suelen ser limo-arenosos de naturaleza metaestable. De hecho, una característica importante es

que el suelo tiene muy pocos finos (1-3%) y, aun así, presenta plasticidad (Marín López *et al.*, 2022).

La Figura 10 muestra la carta de plasticidad de los suelos de los bancos 1-4, en donde se observa que se clasifican como ML (limo de baja plasticidad). Aunque los bancos 1-4 tienen en su mayoría arenas y fueron clasificados como SW (arena bien graduada) —y precisamente porque la cantidad de finos es muy baja (1-3% aproximadamente)—, se agregó la carta de plasticidad para observar el grado de plasticidad de la arcilla presente, observándose que es baja (L), lo que indica que puede ser arcilla expansiva en poca cantidad o bien mayor cantidad de arcilla con poca expansión.

Conclusiones

El “tepetate”, que se utiliza frecuentemente en construcción para relleno de plataformas o bien para sustitución de suelos expansivos en la región central de México, se caracteriza por tener en su mayoría un alto porcentaje de arenas con limos, resultado que fue corroborado con la clasificación del SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de suelos); de hecho, los limos se confirmaron aún más con las pruebas de plasticidad, puesto que no mostraron valor alguno.

Es interesante observar que los bancos reportados anteriormente se encontraban dentro de la ciudad, o por lo menos muy cerca de ella; hecho que puede explicar el mayor contenido de finos en los suelos, debido al antecedente de que la ciudad de Querétaro es

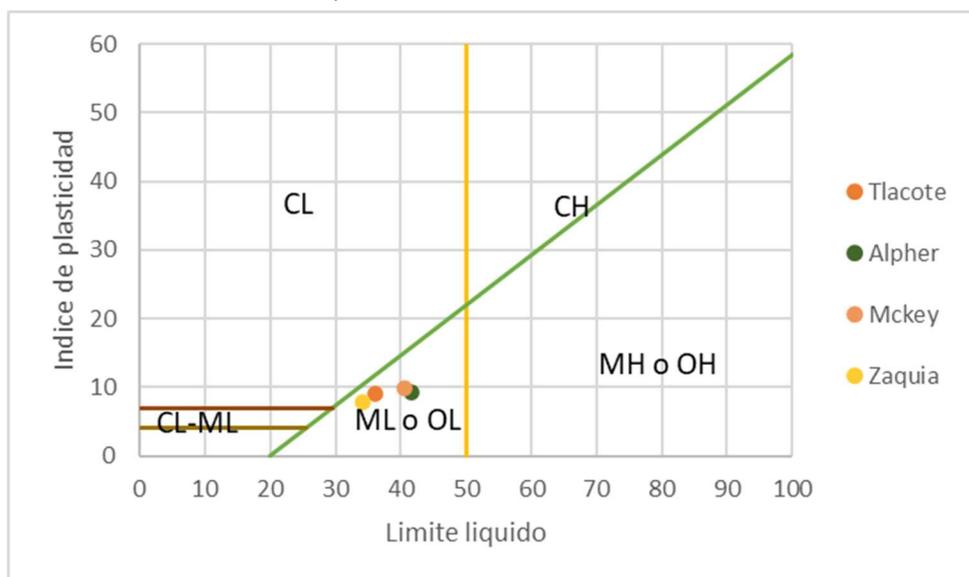


Figura 10. Carta de plasticidad de los suelos de los bancos 1 a 4.

un valle que en algún momento estuvo lleno de agua, lo que justifica la mayor cantidad de finos (14-17% aproximadamente). En cambio, los bancos muestreados en esta investigación se encuentran más alejados de la ciudad, por lo que los suelos presentaron muy bajas cantidades de finos (1-3% aproximadamente), lo que muestra que no estuvieron bajo el agua. Por lo tanto, los bancos más alejados de la ciudad tienden a tener menor cantidad de finos, lo que los hace cumplir con granulometrías que requiere la práctica de la construcción.

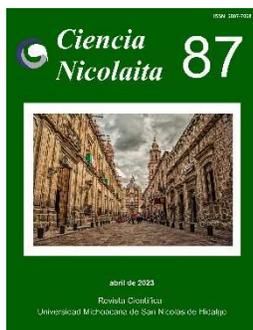
Respecto a la plasticidad, es importante mencionar que aun cuando se trata del mismo suelo, los bancos 1-4 están lejos del valle de Querétaro, lo que permite que presenten plasticidad porque no alcanzaron a estar inundados. Por su parte, los bancos 5-10 se encuentran prácticamente en el valle, por lo que muy probablemente no presenten plasticidad por estar "lavados".

Lo anterior es muy significativo porque la granulometría de los suelos presentada (mayor cantidad de arenas y pocos finos de 1-3%), así como la presencia de plasticidad, indican que existe arcilla que no se encuentra precisamente en la cantidad de finos reportada debido a que es muy baja (1-3%), sino que más bien se encuentra adherida en las arenas. Esta descripción concuerda con suelos reportados en la ciudad de Querétaro con características colapsables que tienen 100% de arenas y 0% de finos con presencia de plasticidad (Marín López *et al.*, 2022), por lo que es importante tenerlo en cuenta en los rellenos y en la sustitución de este tipo de suelos que se hacen frecuentemente en la construcción.

Referencias

ASTM, 2015, ASTM C136-06. *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*.
 Barbara Zetina, F., 1979, Materiales y procedimientos de construcción. Vol. II: *México, Herrero S.A.*
 Blight, G.E., 1997, Mechanics of residual soils: *Rotterdam Balkema*. ISBN 90-5410-696-4
 Comisión Federal de Electricidad, 1993, Manual de diseño de obras civiles: *México, Instituto de Investigaciones Eléctricas*.
 Gama Castro, J., 2007, Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista Morelos: *Boletín de la Sociedad Geológica*

Mexicana, (59)1.
<https://doi.org/10.18268/bsgm2007v59n1a11>
 Healan, D., 1989, Tula of the Toltecs: Excavations and survey: *Iowa City, Estados Unidos, University of Iowa Press*. ISBN 0-87745-209-1.
 López Lara, T., Hernández Zaragoza, J., Horta Rangel, J., González Rojas, E., Rosales Hurtado, C. and López Cajún, D., 2013, Tepetate as Construction Material: *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(11).
 Manilla Aceves, A., Martínez Peña, G., Pérez Salazar, A. and Vázquez Paulino, J., 2002, Caracterización de suelos y control espacial por medio de los sistemas de información geográfica; caso valle de Querétaro: *México, Secretaría de Transporte y Comunicaciones, Instituto Mexicano del Transporte*. ISSN 0188-7297. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt203.pdf>
 ONNCE, 2018, Industria de la Construcción-Agregados para concreto hidráulico-Especificaciones y métodos de ensayo: *México, Secretaría de Gobierno*.
 ONNCE, 2003, Industria de la construcción-muestreo de estructuras térreas y métodos de prueba: *México, Secretaría de Gobierno*.
 Rico Rodríguez, A., 1982, La ingeniería de suelos en las vías terrestres. Vol. II: *México, Limusa*.
 Rodríguez, M., 2006, Compressed-earth-block walls in Mexico and Honduras: *Hous. Constr. Innovat.*, 18-20.
 Rosales Hurtado, D., 2011, Caracterización de los "Tepetates" usados como material de sustitución en la ciudad de Querétaro: Tesis de licenciatura, *Universidad Autónoma de Querétaro, México*.
 SEMARNAT, 2008, Suelos de México: *México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*.
 Williams, B., 1972, Tepetate in the Valley of Mexico: *Annals of the Association of American Geographers*, 62(4), 618-626. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1972.tb00890.x>
 Zepeda, A., 2004, Mecánica de suelos no saturados: *México, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*.



Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Pilas helicoidales en suelos expansivos: caso de aplicación

Helical piles in expansive soils: application case

Andrea Berenice Medina Ramírez,* Teresa López Lara, Jaime Moisés Horta Rangel, Juan Bosco Hernández Zaragoza y Erika Elaine Bernal Dauben

Para citar este artículo: Medina Ramírez Andrea Berenice,* López Lara Teresa, Horta Rangel Jaime Moisés, Hernández Zaragoza Juan Bosco y Bernal Dauben Erika Elaine, 2023. Pilas helicoidales en suelos expansivos: caso de aplicación. Ciencia Nicolaita no. 87, 159-174. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.668>



Historial del artículo:

Recibido: 26 de mayo de 2022
Aceptado: 26 de septiembre de 2022
Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: andrea.medram22@gmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Pilas helicoidales en suelos expansivos: caso de aplicación

Helical piles in expansive soils: application case

Andrea Berenice Medina Ramírez,* Teresa López Lara, Jaime Moisés Horta Rangel, Juan Bosco Hernández Zaragoza y Erika Elaine Bernal Dauben

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado

Resumen

Este documento tiene como objetivo presentar una metodología de diseño e instalación de pilotes helicoidales en un suelo expansivo de Juriquilla, Querétaro. Este proceso es para trabajos de remediación de una estructura que presenta daños por cambio de volumen en el suelo, para lo cual se buscó hacer un proceso de recimentación a través de un sistema de pilas helicoidales, el cual ya tiene tiempo en el mercado, pero su uso no es tan común si se compara con otros (micropilotes). Se considera un sistema confiable que transmite las cargas al suelo, su procedimiento de colocación es rápido y es un método que genera pocos cambios en la estructura del suelo. Este procedimiento se recomienda para la reparación de cimentaciones y para la construcción de estructuras pequeñas. Se hicieron estudios geofísicos para conocer qué tipo de suelo era el que estaba generando los daños, determinándose que se trataba de un suelo expansivo que tenía filtraciones de agua. En este proyecto se favoreció el uso pilotes de gran capacidad para reducir la cantidad de piezas y evitar el posible daño a las líneas de instalación y así también alcanzar el torque de diseño requerido a menor profundidad. Esta aplicación tuvo un resultado positivo ya que ayudó a que la estructura tuviera un mejor soporte y que el cambio de volumen del suelo generado por las infiltraciones de agua de la zona, no originara más problemas en la construcción.

Palabras clave: recimentación, micropilote, hélice, tornillo

Abstract

This document aims to present a design and installation methodology of helical piles in an expansive soil located in Juriquilla, Queretaro. This process is for the remediation work of a structure suffering from soil volume change and its underpinning by means of a helical piles system. Helical piles have been present on the market for some time, but their use is not as common when compared with similar solutions (micropiles), it is a very reliable system for load transfer to competent soil, a very fast installation procedure and it is a method that generates few changes into the soil's structure. This procedure is very good for foundation underpinning and the construction of small structures. Geophysical studies were performed to identify the problematic soil type, determining it to be an expansive soil with water infiltrations. This project was favored in the use of great capacity



piles to reduce their quantity, avoid any possible damage to underground utility lines and achieve the required design torque at lower depths. This application had a positive result as the helical piles helped the structure have a better support and avoid any further problems with the soil volume changes generated by the water infiltration.

Keywords: foundation, micropile, helix, screw

Introducción

Los suelos expansivos suelen producir daños severos a distintos tipos de estructuras que se encuentren sobre ellos. La causa de la expansión del suelo puede entenderse de diversas formas, pero aún en la actualidad no se comprende totalmente este fenómeno que, a pesar de no ser un riesgo de vida preocupante como los desastres naturales, sí son causantes de grandes costos económicos (Jones & Jones, 1987).

El comportamiento que se desea, y con ello el éxito de una cimentación, se logra por medio de la interacción suelo-cimentación-estructura. Para que ello se logre, se requiere contar con el conocimiento de la estratigrafía y las propiedades mecánicas del subsuelo en el sitio de interés, así como el apego a los fundamentos y principios aplicados de la ingeniería civil para lograr que las cargas de la estructura se transfieran a la cimentación que le da soporte.

En Querétaro existe la problemática de que los suelos expansivos dañan las construcciones, siendo la principal causa de este problema el acelerado crecimiento de la mancha urbana y la inexistencia de medidas preventivas detalladas para el suelo que hay en esta área.

Debido a la constante demanda para reducir tiempos en la construcción, se han inventado varios tipos de procedimientos para evitar daños en las estructuras. Existen diversos métodos constructivos para impedir el contacto de la estructura con el suelo, con lo cual se busca proporcionar mayor estabilidad y durabilidad en las construcciones. De los métodos más usados en remediación de estructuras dañadas se encuentran los micropilotes, un tipo de estructura que presenta dimensiones menores a 0.30 metros de diámetro, comúnmente armado con acero de refuerzo e inyectado o colado con lechada de concreto (Sabatini *et al.*, 2005) y su colocación es mucho más fácil y rápida en construcciones ya existentes.

En el caso específico de este trabajo, se utilizaron pilas helicoidales que son muy parecidas a los micropilotes y que se encuentran aceptadas por el Código Internacional de Construcción desde el año 2009 (ICC, 2015). Las pilas helicoidales son utilizadas hoy en día como estructuras confiables para la transmisión de cargas al suelo, tanto a tracción como a compresión y son comúnmente usadas en Estados Unidos y Europa, en zonas de arenas y arcillas (Perko & Wiley, 2009).

Las pilas helicoidales fueron inventadas en 1836 por el ingeniero civil Alexander Mitchell, quien durante mucho tiempo tuvo problemas con las cimentaciones que realizaba en el mar, ya que en estos lugares se encuentran suelos débiles como las arenas. Mitchell, a los 52 años, encontró la solución: enterrar en el suelo la hélice de un barco como si fuera un tornillo. En 1833, patentó en Londres su invento con el nombre "screw pile" (pila de tornillo) (Pack, 2000). Otra de las primeras patentes fue realizada por T.W.H. Moseley (Figura 1), en la que describe secciones de tubos unidas que terminan en la punta con una espiral (Perko & Wiley, 2009).

Las pilas helicoidales son usualmente utilizadas por su facilidad y rapidez de instalación; además, también cuentan con características que las hacen llamativas, como la baja vibración y ruido a la hora de instalarlas, lo cual evita incomodidad para los habitantes de las construcciones vecinas (GBC Cimentaciones, 2015).

Alcance

El alcance de este proyecto consiste en evitar que los cambios de volumen en el suelo continúen dañando una construcción ubicada en Juriquilla, Querétaro, utilizando para ello pilas helicoidales donde la estructura posará para evitar el contacto con el estrato activo. Como objetivo principal se busca reforzar la cimentación de la estructura que fue dañada por la presencia de arcilla expansiva y por la constante filtración de agua en el subsuelo.

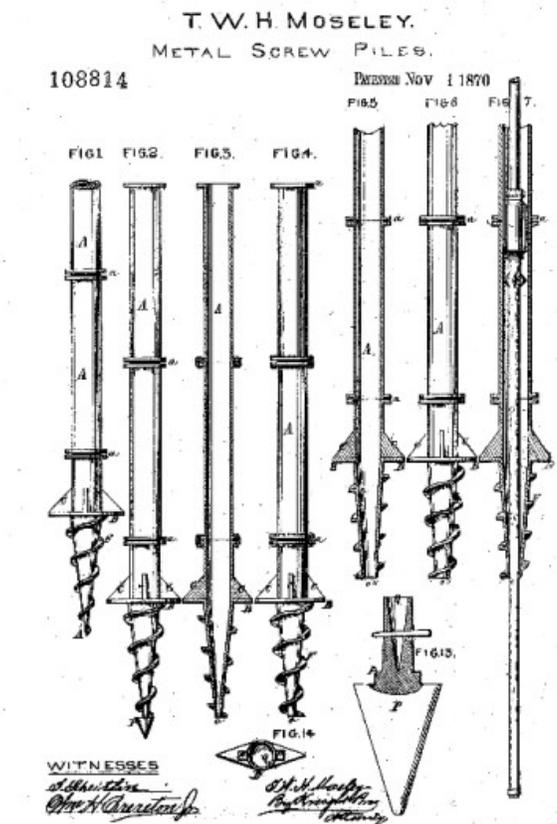


Figura 1. Patente de T.W.H. Moseley de pilas helicoidales.

Metodología

Localización e inventario de daños en la estructura

El edificio se encuentra en Juriquilla, Querétaro. Se hizo un recorrido por sus instalaciones para revisar, principalmente, dónde se encontraban los daños más severos para determinar los lugares que requerían con mayor prioridad la colocación de los pilotes helicoidales.

Estudios correspondientes para conocer el subsuelo y el asentamiento diferencial en la estructura

Se realizaron los estudios para revisar la estratigrafía del subsuelo y verificar la presencia de estratos saturados. Por lo antes mencionado, y con la finalidad de verificar las condiciones litológicas y estructurales del subsuelo, se llevaron a cabo los estudios geofísicos de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), así como un estudio de hidrología de la zona.

Para el estudio de TRE, el equipo que se utilizó para obtener los datos en campo fue un resistímetro Supersting marca Advanced Geosciences, Inc., modelo R-8, mientras que para el estudio de SEV el equipo utilizado para obtener los datos en campo fue un resistímetro GEOELEC, modelo Explorer 15. Finalmente, la investigación hidrológica y climatológica de la región se basó en datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y de otras dependencias públicas.

Diseño de pilas helicoidales

Para el diseño de pilas helicoidales se realizó una pila de prueba, la cual nos dio los resultados del torque y de la carga que se necesitaba en cada zona dañada de la estructura.

Instalación de pilotes helicoidales

Para la instalación se optó por usar una retroexcavadora CAT a la cual se le colocó un brazo con la pila helicoidal para hacer la perforación y después poder unir la pila con la cimentación; finalmente, se hicieron los trabajos de relleno para dejar las áreas a nivel de la losa.

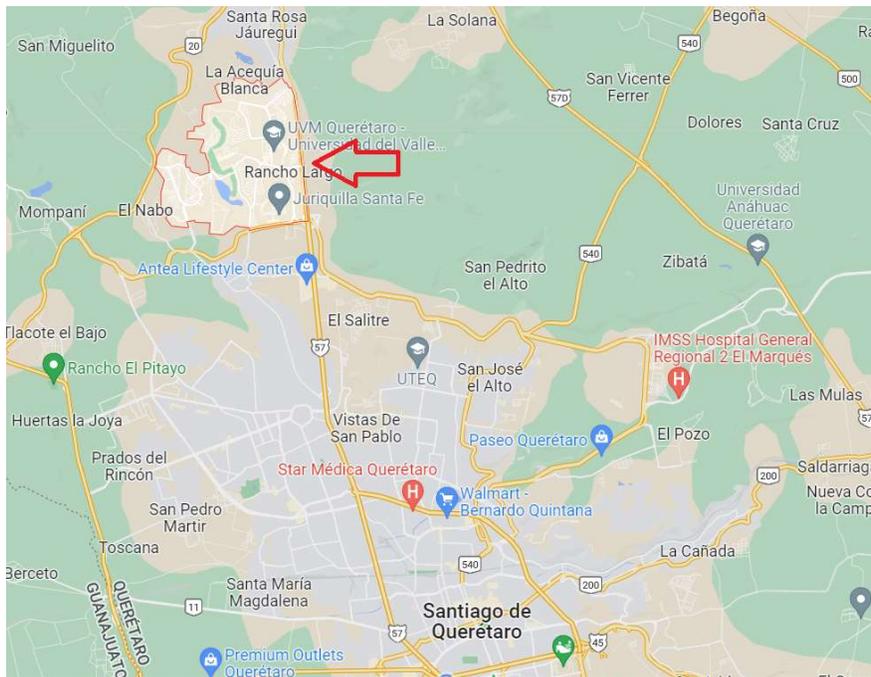


Figura 2. Mapa de zona de estudio e instalación para remediación de estructura con pilas helicoidales.

Resultados

Zona donde se encuentra el área de estudio

La zona donde se realizó la remediación se encuentra en Juriquilla, Querétaro (Figura 2), lugar en el que es muy común encontrar suelos expansivos.

Inventario de daños

En el recorrido que se hizo se observaron diferentes tipos de grietas en columnas, losas y muros, así como daño a cancelería. Como hemos mencionado,

esto se debe a los cambios de volumen en el suelo generados por la introducción de agua en el terreno (Figuras 3, 4, 5).

Con el resultado del inventario de daños se propuso hacer un estudio de suelos más a fondo. Si bien es cierto que no se sabía con exactitud qué tipo de suelo había, con los daños observados se podía inferir que se trataba de un suelo expansivo.



Figura 3. Grieta en columna por efecto de expansión del suelo.

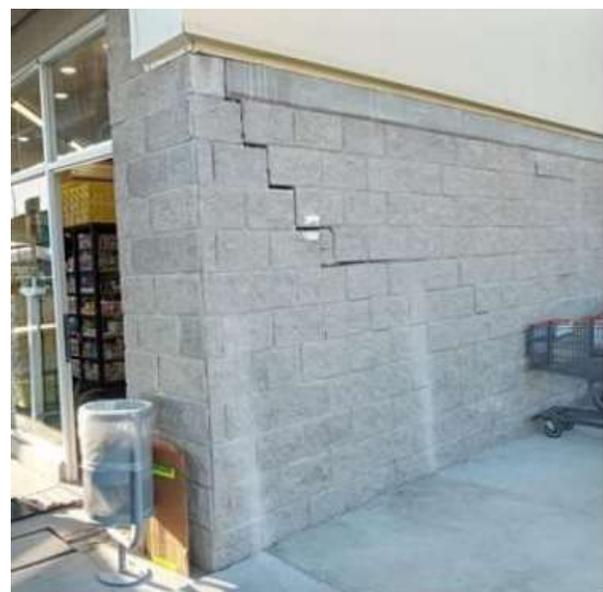


Figura 4. Efecto del cambio de volumen, daño en el muro de block con separación de 5.0 cm.



Figura 5. Deformación de la cancelería debido al efecto de cambio de volumen en el suelo.

Resultados de sondeos profundos (estudio geofísico e hidrológico)

Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

A partir del procesamiento e interpretación de los datos levantados en campo con el método de TRE — utilizando la técnica dipolo-dipolo, método de alta resolución que alcanzó profundidades de investigación de 11.4 a 13.8 m—, se obtuvieron varios perfiles de resistividad eléctrica (Figuras 6, 7, 8), los cuales permiten visualizar de manera objetiva la distribución y la estructura de los diferentes materiales geológicos que integran el subsuelo.

En el perfil 1 (Figura 6) se aprecia la presencia de agua en el subsuelo, lo que ocasionó el cambio de volumen y el daño a la estructura.

En los perfiles 2 y 3 (Figuras 7, 8) se detecta que el material más abundante es la arcilla y, debido a la humedad que se encuentra en el terreno, esta se expande y daña la construcción.

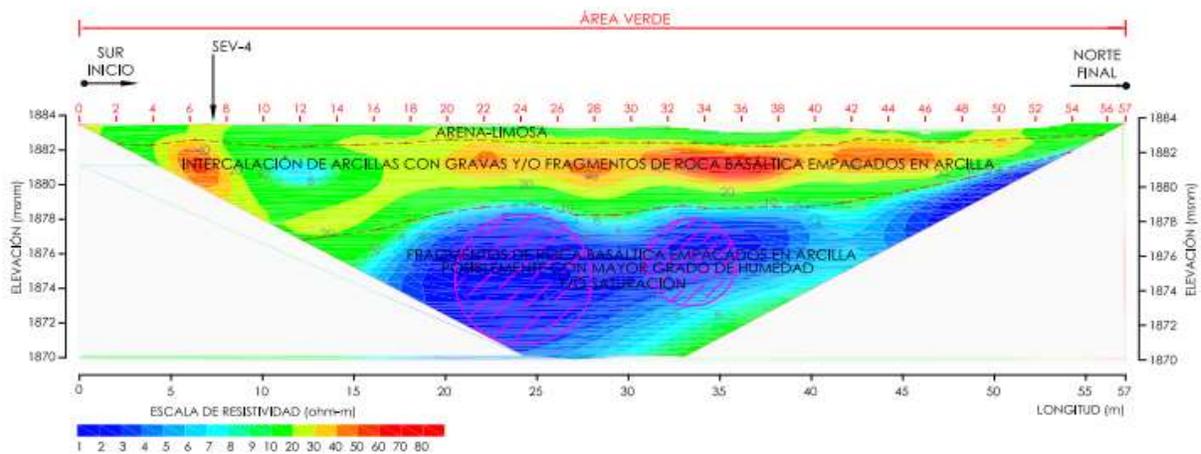


Figura 6. Perfil estratigráfico 1 (TRE).

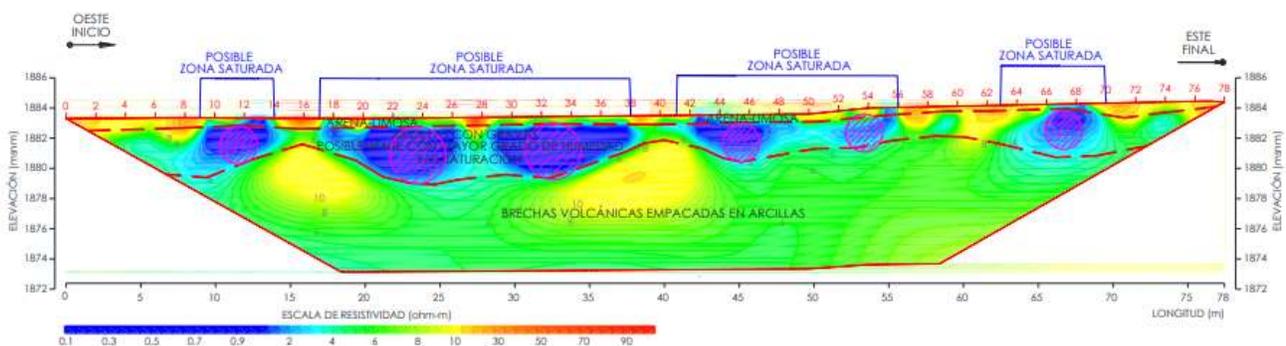


Figura 7. Perfil estratigráfico 2 (TRE).

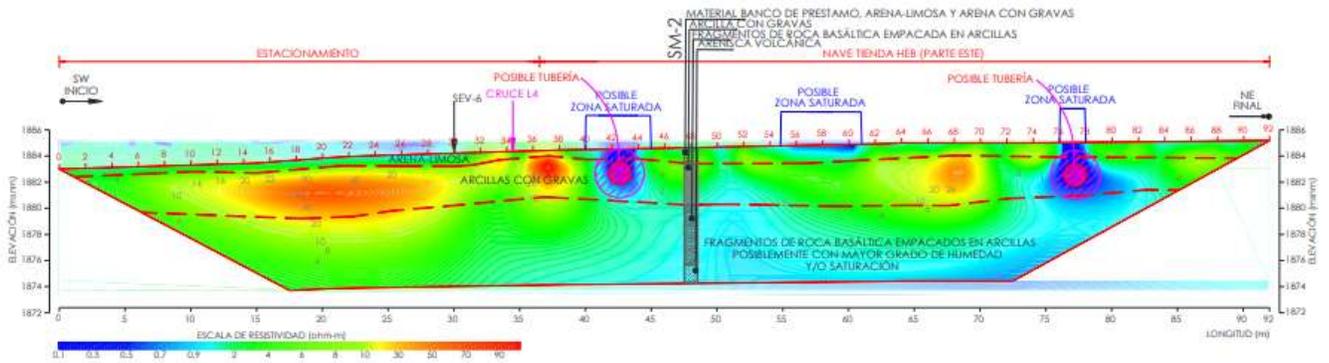


Figura 8. Perfil estratigráfico 3 (TRE).

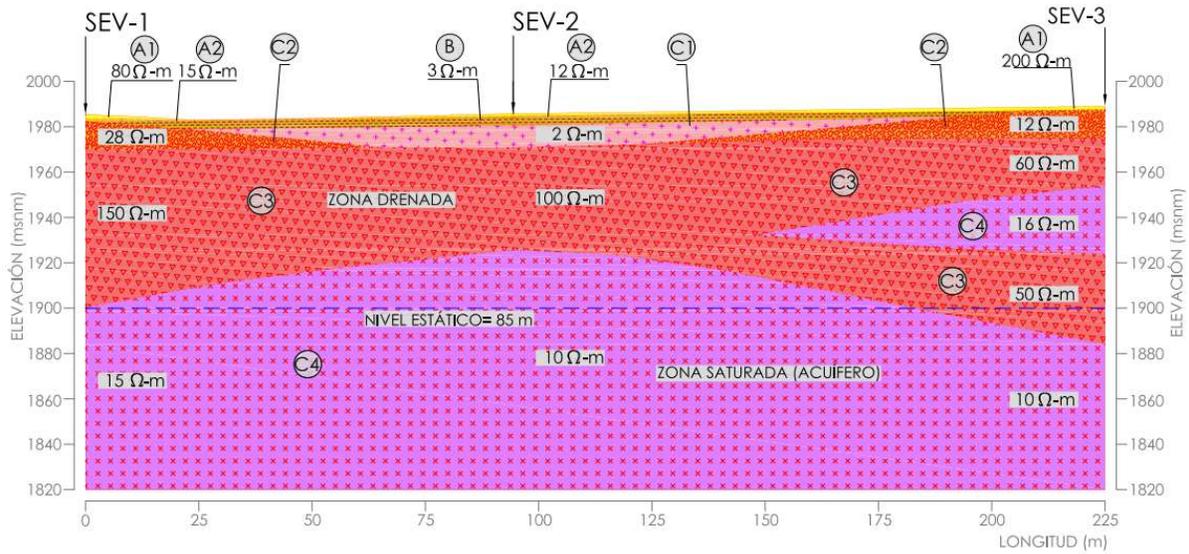


Figura 9. Perfil estratigráfico 1 (SEV).

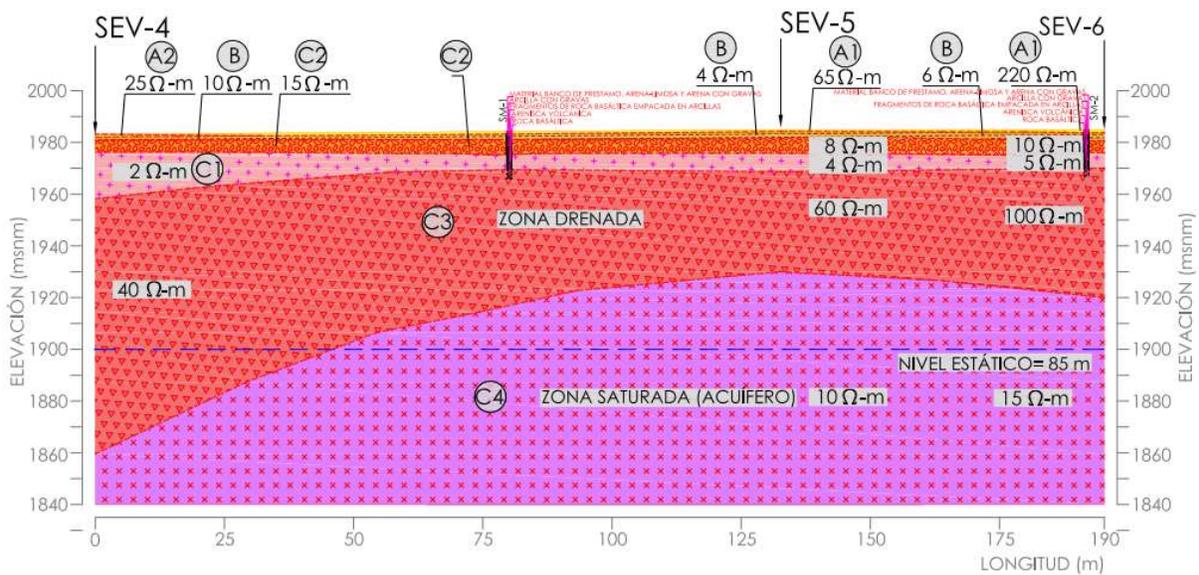


Figura 10. Perfil estratigráfico 2 (SEV).

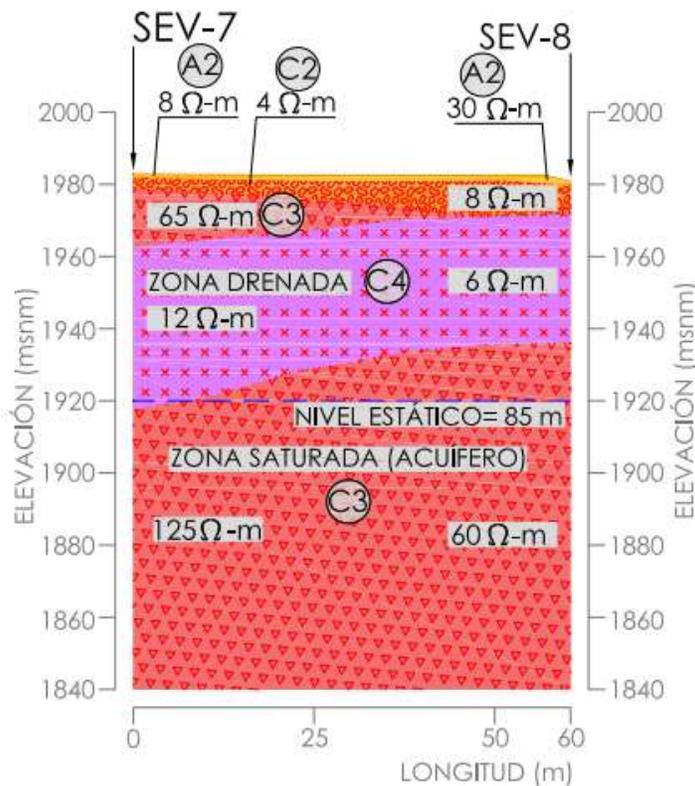


Figura 11. Perfil estratigráfico 3 (SEV).

En general, los estudios nos dan tres tipos de litografías:

1. Colores verde-amarillo. Materiales de relleno (generalmente de banco para mejorar el suelo), arenas con gravas y arenas con arcillas (profundidad de 0 a 1 m).
2. Colores amarillo-naranja-rojo. Arcillas con gravas y fragmentos de roca basáltica con empaques de arcillas (profundidad de 1 a 6 m).
3. Colores azul-cian. Fragmentos de roca basáltica con arcilla y cierto grado de saturación (inclusión de agua) y arenisca volcánica (profundidad de 2 a 10 m).

Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

Mediante la interpretación cuantitativa de los ocho SEV, se realizaron tres modelos conceptuales denominados secciones geofísicas o geoeléctricas, aplicando el arreglo Schlumberger y aberturas de electrodos AB máximas de 400 m, donde se obtuvieron las propiedades de las diferentes capas y sus característi-

cas geohidrológicas a una profundidad de 160 m, obteniéndose los perfiles que se muestran en las figuras 9, 10 y 11.

En los perfiles 1, 2 y 3 (Figuras 9, 10, 11) se puede distinguir que en la parte de superior se encuentra una combinación de arenas con cierto porcentaje de arcillas, en las capas que le siguen se puede detectar un porcentaje más significativo de arcillas, mientras que en la parte más baja se encuentra una zona totalmente saturada que se puede considerar como acuífero.

Los estudios arrojaron la siguiente clasificación:

1. A1 y A2. Material de banco y/o depósito arenolimoso y arenas con arcillas.
2. B. Depósito de arcillas con gravas.
3. C1. Areniscas volcánicas.
4. C2. Brechas volcánicas empacadas en una matriz arcillosa.
5. C3. Basaltos con diferente grado de fracturamiento.
6. C4. Tobas riolíticas.



Tabla 1
Estaciones climatológicas.

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Periodo de registro	Precipitación media (mm)
22-045	Juriquilla.	20°42'15.84"N	100°27'33.84"O	1979-2018	532.1
22-013	Querétaro.	20°34'59.88"N	100°22'10.92"O	1968-2017	474.3

Hidrología

Las aguas superficiales del estado de Querétaro están distribuidas en dos regiones hidrológicas: RH12 "Lerma-Santiago" y RH26 "Pánuco". La Región Hidrológica RH12 "Lerma-Santiago" cubre el 21.52% de la superficie estatal, drenando las aguas del suroeste de la entidad hacia el río Lerma, para posteriormente verter sus aguas al Océano Pacífico. Las cuencas de esta región hidrológica y la porción del territorio estatal que cobijan son: río Laja (19.42%) y río Lerma-Toluca (1.78%).

La región presenta un escurrimiento medio anual entre 50 y 100 mm, de acuerdo a las cartas hidrológicas del INEGI. En cuanto a las corrientes y cuerpos de agua, no existen cuerpos de agua naturales de consideración en la zona.

En la parte climatológica, como primera etapa, se obtuvo la información de las diferentes instancias pertenecientes a la CONAGUA, a través de sus medios de información disponibles, sitios y portales, así como de la Coordinación General del Servicio Meteorológico. Cabe mencionar que actualmente los portales electrónicos ofrecen información validada por los organismos correspondientes, por lo que se da preferencia a su utilización por su rapidez y grado de certidumbre.

En la Tabla 1 se observa la precipitación anual del estado de Querétaro, más específicamente de Juriquilla (datos otorgados por las dependencias públicas del estado).

Después de analizar los resultados de los estudios anteriores, se comprobó que se trataba de un suelo expansivo por los elevados cambios de volumen, lo que originó el daño en la cimentación de la construcción objeto de estudio. De igual forma, se pudo determinar que la introducción de agua en el terreno era lo que realmente estaba creando el problema, generándose el movimiento del suelo, mejor conocido como zona activa.

Diseño de pilas

Pilotes helicoidales

La capacidad del elemento de pilote helicoidal depende de la resistencia del suelo, del área proyectada de la placa de la hélice y de la profundidad de la misma por debajo del subsuelo. La resistencia del suelo puede evaluarse usando diversas técnicas de campo y laboratorio, mientras que el área proyectada es controlada por el tamaño y el número de las hélices.

Los pilotes helicoidales pueden usarse para diversas aplicaciones que involucran carga de tensión (anclajes helicoidales) y carga de compresión (pilotes helicoidales). Los pilotes y las anclas helicoidales se clasifican generalmente como "superficial" o "profunda", dependiendo de la profundidad de la instalación de la hélice superior por debajo de la superficie del suelo, usualmente con respecto al diámetro de la hélice. Hay situaciones en las que la instalación podría considerarse el camino medio entre "superficial" y "profundo", o "intermedia".

En la Figura 12 se muestra un resumen de los escenarios más comunes de diseño que involucran pilotes y anclajes helicoidales.

Metodología del cálculo

El método de soporte de placa individual establece que la capacidad para un ancla/pilote de hélice sencilla o multi-hélice, se determina sumando la capacidad de soporte de los elementos de la placa de hélice individual que son específicos para un pilote determinado (Ecuación 1):

$$Q_t = \sum Q_h \quad (1)$$

Donde:

Q_t Capacidad total final del ancla/pilote multi-hélice.

Q_h Capacidad de la hélice individual.

Se determina la capacidad de soporte final de una hélice individual conforme a la Ecuación 2. Un límite

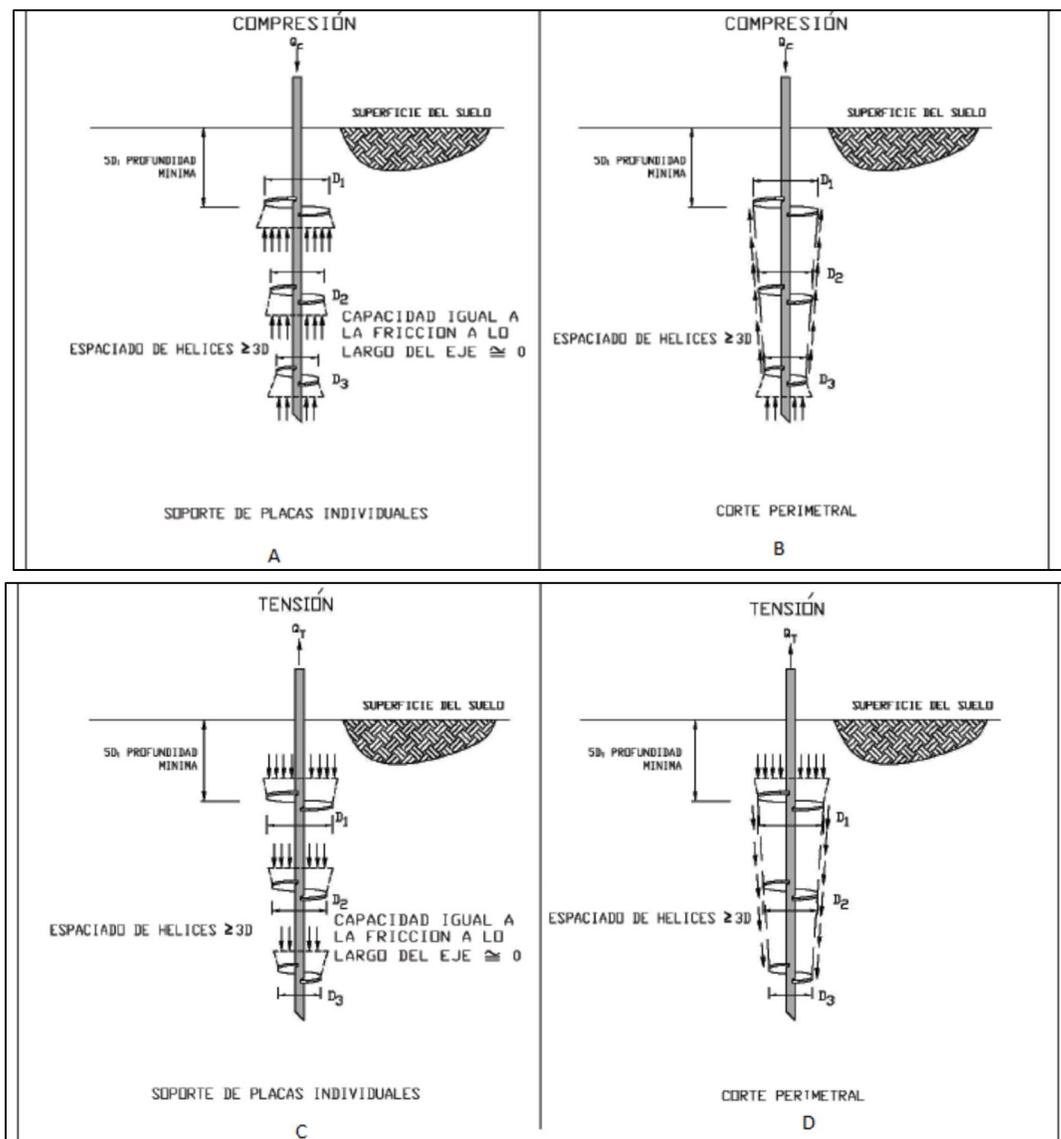


Figura 12. Diseños típicos para el modelado de pilas helicoidales.

superior para esta capacidad de carga se basa en la resistencia de la hélice que puede obtenerse del fabricante.

$$Q_h = A_h (cN_c + q'N_q) \leq Q_s \quad (2)$$

Donde:

Q_h Capacidad de carga última.

A_h Área proyectada para la hélice.

Q_s Límite superior de capacidad, determinado por la resistencia mecánica de la hélice.

N_c y N_q Factores de capacidad de carga.

q' Esfuerzo efectivo a la profundidad de desplante.

c Cohesión del suelo.

Para suelos cohesivos de granos finos: $\phi' = 0$; $c' > 0$

Se determina la capacidad de carga final en un suelo cohesivo o de grano fino con la Ecuación 3. El factor N_c es 9, asumiendo que la profundidad de la instalación está por debajo del nivel brocal que es mayor que cinco veces el diámetro de la hélice superior.

$$Q_h = A_h c N_c = A H 9 s_u \quad (3)$$

Donde:

H = Altura

A_h = Área proyectada de la hélice

c = "cohesión"; para $\phi' = 0$; c = Resistencia de corte no drenado = s_u



N_c = Factor de capacidad de soporte para Fallas Profundas = 9 (Profundidad mínima $\geq 5D$)

En caso de que los valores de cohesión o de resistencia de corte no drenado no estén disponibles, se usa la metodología del diseño presentado en la Ecuación 4.

$$c \text{ (ksf)} = N / 8 \text{ or } = 0.125(N) \quad (4)$$

$$c \text{ (kPa)} = 6N;$$

Donde:

c = "cohesión"; para $\phi' = 0$; c = resistencia de corte no drenado = s_u

N = Valor del número de golpes conforme a la Prueba de Penetración Estándar (ASTM D 1586).

Obtención del peso volumétrico

Para obtener los valores estimados empleando los valores de golpes de las pruebas de Penetración Estándar (ASTM D 1586), se usan las siguientes ecuaciones:

Suelos cohesivos:

$N = 0$	$\gamma = 65$ (libra/pie ³)
$N > 0 \ \& \ N \leq 7$	$\gamma = 60 + 5N$ (libra/ pie ³)
$N \geq 8 \ \& \ N \leq 10$	$\gamma = 100$ (libra/ pie ³)
$N \geq 11 \ \& \ N < 50$	$\gamma = 90 + N$ (libra/ pie ³)
$N \geq 50$	$\gamma = 140$ (libra/ pie ³)

Resultado del análisis

Tomando los datos anteriores y el pilote prueba, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. Longitud del pilote = 4.00 m.
2. Torque mínimo de instalación = 3514 N-m (2592 ft-lb)
3. Capacidad de carga última (compresión) = 10.25 t
4. Factor de seguridad = 2
5. Capacidad de carga admisible (compresión) = 5.13 t

Haciendo los cálculos correspondientes se pudo sacar la capacidad de carga necesaria para cada pila, ya que inicialmente se había contemplado desplantar

los pilotes a 6.0 m; sin embargo, hubo la posibilidad de utilizar un pilote de mayor capacidad para llegar al torque requerido a menor profundidad, lo que permitió lograr mayor capacidad de carga y, al mismo tiempo, disminuir la cantidad de pilotes a instalar.

Factor de seguridad

Después de haber obtenido los valores de torque efectivo, se aplicó un factor de seguridad apropiado para determinar una carga de diseño o una carga de trabajo segura. Un factor de seguridad debe basarse en la importancia o características de la estructura o las tolerancias aceptables, así como las consecuencias de la falla. Un factor de seguridad típico para las pilas helicoidales es de dos.

Instalación de pilotes helicoidales

Para demostrar cómo se puede instalar un pilote helicoidal, se empleó un elemento con una sección de fuste cuadrado de 4.4 cm x 4.4 cm de acero macizo y de 2.00 m de longitud con hélices de 8 in (20 cm), 10 in (25 cm) y 12 in (30 cm) de diámetro, seguido por una transición de 9.00 cm de diámetro x 0.76 cm de pared x 2.00 m de largo. Se montó un motor Eskridge de torque de 12,000 ft-lb en una retroexcavadora CAT 420 para proporcionar el torque para instalar el pilote helicoidal. Un indicador de torque CHANCE midió el torque de instalación en intervalos de 1 pie (30 cm). La profundidad de instalación total osciló entre 3.0 y 4.0 m con valores de torque efectivo calculado para cada elemento instalado (torque promediado en las últimas tres lecturas en intervalos de 1 pie).

Se colocaron las pilas helicoidales en las zonas donde la estructura necesitaba más apoyo y, con base en los resultados de campo y laboratorio, fue necesario diseñar e instalar los pilotes helicoidales a una profundidad que osciló en un rango de 3.0 y 4.0m, con el fin de alcanzar la capacidad de carga mínima requerida.

Basándonos en los datos anteriores, se hicieron los siguientes diseños para la colocación de los pilotes helicoidales (Figuras 13, 14, 15, 16).

En las Figuras 13 y 14 se observa la ubicación de las pilas en un lado de la cimentación existente, mientras que en las Figuras 15 y 16 se ve la colocación en traveses y su conexión con la estructura.

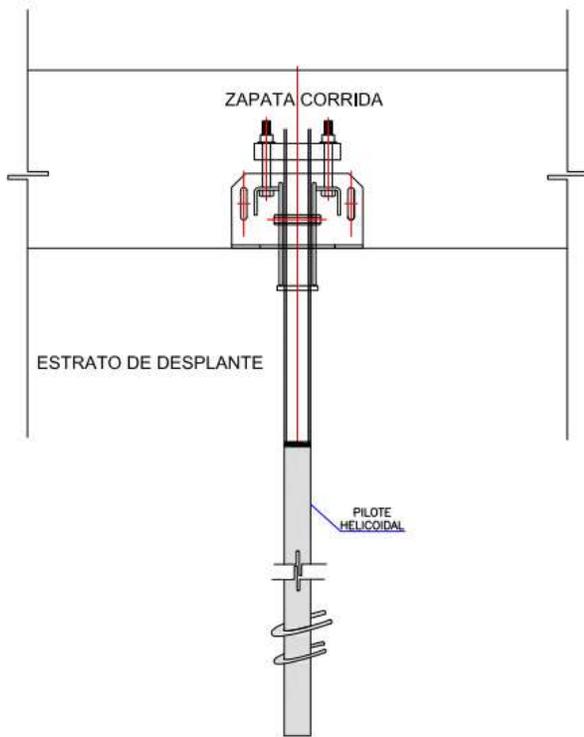


Figura 15. Detalle de recimentación en zapata corrida (Vista frontal).

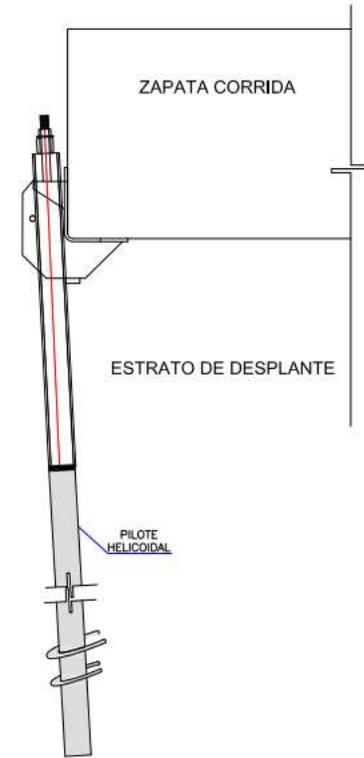


Figura 16. Detalle de re-cimentación en zapata corrida (Vista lateral).

Con los resultados de análisis obtenidos, más el factor de seguridad, podemos dar las siguientes capacidades de carga y longitud para cada pila helicoidal (Tablas 2 y 3).

Con las dimensiones necesarias para cada pilote y la localización de las zonas donde se requerían, se hizo

la instalación. Después de revisar la resistencia del suelo y hacer los cálculos, se determinó que cada pila debía resistir por lo menos 4 t. En la Tabla 2 se muestra la capacidad de carga de cada pila (con el factor de seguridad), lo cual nos indica que la capacidad de las

Tabla 2
Resumen de la capacidad de carga admisible de cada pila colocada.

Concepto	PH-1	PH-1AE	PH-1E	PH-2A	PH-2	PH-3	PH-4	PH-5	PH-6	PH-7	PH-8	PH-9	PH-10
Últimos 3 pies de torque	3.2	3.3	3.1	3.1	3	3.3	2.9	3.3	3.3	2.5	3	3.3	3.4
	3.4	3.5	3.3	3.2	3.3	3.3	3.2	3.4	3.4	3.1	3.1	3.2	3.5
	3.5	3.6	3.4	3.3	3.5	3.4	3.3	3.4	3.6	3.3	3.2	3.5	3.6
Torque promedio (ft-Kip)	3.4	3.5	3.3	3.2	3.3	3.3	3.1	3.4	3.4	3.0	3.1	3.3	3.5
Capacidad de carga última (lb)	23567	24267	22867	22400	22867	23310	21933	23567	24033	20767	21700	23333	24500
Capacidad de carga última (t)	10.7	11.0	10.4	10.2	10.4	10.6	10.0	10.7	10.9	9.4	9.9	10.6	11.1
Factor de Seguridad	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Capacidad de carga admisible (t)	5.3	5.5	5.2	5.1	5.2	5.3	5.0	5.3	5.5	4.7	4.9	5.3	5.6

Tabla 3
Profundidad de cada uno de los pilotes.

RELACIÓN DE PILOTES	
IDENTIFICACIÓN	PROF. (m)
PH-1	3.10
PH-1AE	3.20
PH-1E	3.00
PH-2A	3.00
PH-2	3.30
PH-3	3.20
PH-4	3.00
PH-5	3.60
PH-6	3.40
PH-7	3.00
PH-8	3.00
PH-9	3.30
PH-10	3.30
PH-11	3.40

pilas instaladas está arriba de la requerida en el proyecto. En la Tabla 3 se muestra la profundidad de instalación, dándonos en total 14 pilas colocadas.

Para la instalación, en primer lugar, se hizo una pequeña excavación para colocar la retroexcavadora con el brazo y el pilote helicoidal; seguidamente, se inició con la perforación, la cual se hizo de forma casi vertical pegado a la cimentación. En cuanto se terminó de perforar, se hicieron las conexiones con la estructura para que tanto el pilote como la cimentación estuvie-



Figura 17. Instalación de pila helicoidal pegado a una trabe.

ran enlazadas. Finalmente, se hizo un relleno para dejar todo a nivel de la losa. En las Figuras 17, 18 y 19 se puede ver la instalación de cada pila.

Procedimiento de relleno

Para los trabajos de relleno de las zanjas sobre el lado de la trabe donde se instalaron los pilotes, se rellenan los espacios abiertos con mortero o concreto



Figura 18. Perforación con pila helicoidal.



Figura 19. Conexión de la pila helicoidal con la estructura.

fluido hasta el nivel deseado en función de los requisitos del proyecto en cuanto al espesor de la losa de concreto y al nivel de proyecto terminado. Es importante mencionar que antes de este proceso, se ejecutaron los trabajos de aplicación del “grout” o mortero a los “brackets”.

Este procedimiento es una buena opción para todos los tipos de suelo, sobre todo para los expansivos como es en este caso, ya que da buen soporte a la cimentación y ayuda a que el movimiento generado por los cambios de volumen del suelo, se refleje menos en la estructura y no genere daños.

Conclusiones

El resultado de los daños en la estructura hizo suponer que se trataba de un suelo expansivo, aunque no se sabía con exactitud; en esa zona ya se habían reportado daños y, generalmente, era como consecuencia de este tipo de suelos.

Después de analizar a profundidad los estudios geofísicos e hidrológicos que mostraron la presencia de agua y en su mayoría de los estratos la existencia de arcilla, se comprobó que se trataba de un suelo expansivo y que lo que realmente estaba generando los daños en la estructura de la construcción era la filtración de agua en el terreno, pues eso estaba ocasionando cambios de volumen.

Revisando la resistencia del suelo y haciendo los cálculos correspondientes de acuerdo con las cargas críticas esperadas en este tipo de estructura, se asume que la carga uniformemente distribuida no será mayor a 2 t/m, lo que implicaría una carga de 4 t por pilote, la cual estaría muy por debajo del promedio de 5.2 t (capacidad de carga admisible con el $FS=2$). Con base en lo mencionado, es importante resaltar que se llevó a cabo una distribución de elementos de pilotes helicoidales a lo largo de la zona afectada empleando una distancia de 2 m.

Uno de los puntos relevantes de esta colocación es que se trata de un procedimiento rápido comparado con otros y, además, funciona muy bien para la remediación de estructuras dañadas y para pequeñas estructuras nuevas (no es apta para grandes construcciones), teniendo resultados positivos.

Es importante conocer el tipo de suelo en el que se está construyendo, ya que siempre se da por hecho que cambiando una capa superior por otro material

más estable el problema no resurgirá, pero no es así (no en todos los casos), hay estratos que son muy profundos y constantemente pueden sufrir cambios de volumen (suelo expansivo), por eso es importante tener un estudio de suelo detallado para así construir una cimentación adecuada y que posteriormente esto no genere daños a la estructura.

Referencias

- Arcos Álvarez, J.L., Justo, J.L., De Justo Moscardo, E., Vázquez Boza, M., Durand Neyra, P., Morales-Esteban, A., Gil, R. and Martín, F., 2016, Refuerzo del contacto entre un pilote prefabricado y un terreno duro mediante su extensión con un micropilote interior coaxial: *Reconocimiento, tratamiento y mejora del terreno: 10º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica*, A Coruña, 19, 20 y 21 de octubre de 2016, 651-658.
- Arango Sarmiento, M., 2016, Propiedades mecánicas de las pilas helicoidales en suelos residuales, específicamente en los suelos residuales de la EIA, Sede Palmas: Tesis de Licenciatura, *Universidad EIA, Ingeniería Civil Envisado*.
- ASTM, Designation D 1586-84, reapproved 1992, “Standard Test Method for Penetration Test and Split Barrel Sampling of Soils”.
- Castellanos Guerrero, W.M. and Rodríguez Rincón, E., 2021, Inclusión de micropilotes como elementos recuperadores de carga en cimentaciones: revisión del estado del conocimiento: *Revista Ingeniería*, 27(2). <https://doi.org/10.14483/23448393.16984>
- Chapoñan, P. and Justi, F., 2017, Alternativa de fundación con micropilotes helicoidales para torres de telecomunicación en suelos granulares: Tesis de Licenciatura, *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas*.
- GBC Cimentaciones, 2015, “GBC Cimentaciones. Retrieved from”. <http://www.cimentacionesgbc.com.mx/>
- Gómez, J.E. and Robinson, H.D., 2022, Capacity of connections between micropiles and existing footings: *5º Simposio Internacional de Cimentaciones Profundas*, Ciudad de México, 12 de mayo.
- ICC, 2015, “International code council. Retrieved from”. http://www.iccsafe.org/search_gcse/?q=SearchHere
- Jones, D.E. and Jones, K.A., 1987, Treating expansive soils: *Civil Engineering—ASCE*, 57(8), 62-65.
- Mendoza López, M.J., 2022, Conferencia magistral: Perspectivas actuales sobre el diseño de cimentaciones

profundas en la Ciudad de México: 5° *Simposio Internacional de Cimentaciones Profundas*, Ciudad de México, 12 de mayo.

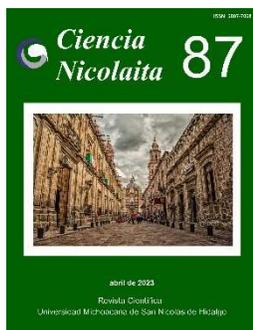
Nolasco, M., Aguirre, J.L., De la Fuente, H., 2022, Columnas/Pilas de Agregado Compactado para el apoyo de muros mecánicamente estabilizados (MME) para el Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles: 5° *Simposio Internacional de Cimentaciones Profundas*, Ciudad de México, 13 de mayo.

Pack, J.S., 2000, Design of Helical Piles for Heavily Loaded Structures: *Conference: New Technological and Design Developments in Deep Foundations*, Denver, Colorado.

Perko, H.A. and Wiley, J., 2009, Helical Piles. A Practical Guide to Design and Installation: *New Jersey, I. John Wiley & Sons, Ed.*

Sabatini, P.J., Tanyu, B., Armour, T., Groneck, P. and Keeley, J., 2005, Micropile design and construction: *Washington, D.C., US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-NHI-05-03.*

Talamantes Carrillo, P.L., Rojas González, E., Verdín Montes, C.I. and Robles Marrón, D.B., 2022, Ensayos de resistencia a la tensión en micropilotes: 5° *Simposio Internacional de Cimentaciones Profundas*, Ciudad de México, 12 de mayo.



Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Estrategias de eficiencia energética en un edificio privado en clima cálido subhúmedo

Energy efficiency strategies in a private building in warm subhumid climate

Andrea Palacios De Paz,* Raúl Pavel Ruiz Torres, Heydi Gómez Barranco, y Eddy González García.

Para citar este artículo: Palacios De Paz Andrea, Ruiz Torres Raúl Pavel, Gómez Barranco Heydi, y González García Eddy, 2023. Estrategias de eficiencia energética en un edificio privado en clima cálido subhúmedo. Ciencia Nicolaita no. 87, 175-196. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.670>



Historial del artículo:

Recibido: 28 de mayo de 2022

Aceptado: 9 de noviembre de 2022

Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: andydepaz95@gmail.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Estrategias de eficiencia energética en un edificio privado en clima cálido subhúmedo

Energy efficiency strategies in a private building in warm subhumid climate

Andrea Palacios De Paz,^{1*} Raúl Pavel Ruiz Torres,¹ Heydi Gómez Barranco,¹ y Eddy González García.²

¹Universidad Autónoma “Benito Juárez” de Oaxaca, Facultad de Arquitectura

²Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Arquitectura

Resumen

Se presenta la evaluación energética de un edificio privado destinado a servicios especializados en apoyo a la reproducción humana, ubicado en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez en el estado de Chiapas, donde se tiene un clima cálido subhúmedo. El edificio, diseñado por el despacho AYB Arquitectos, no cuenta con estrategias bioclimáticas.

El objetivo principal fue determinar cuali-cuantitativamente el impacto de la aplicación de estrategias bioclimáticas en la clínica CREARH-ART, evaluando el factor energético para poder reducir los gastos energéticos que presenta. La clínica tiene una orientación sur poniente y una configuración compacta. Las estrategias aplicadas a la clínica constan de protección solar tipo *persianas* en la fachada principal (la más crítica), que comprende un ventanal ubicado al sur, así como aislamiento térmico en losa de azotea, específicamente un techo verde semi-intensivo. La evaluación se realizó por medio experimental y por simulación térmica en el periodo cálido.

La metodología propuesta para encontrar las estrategias se basa en el Sistema de Gestión de la Energía que consta de cinco etapas y se diseña considerando los requerimientos de la NC-ISO 50001: 2011 (CONUEE, n.d.). En consecuencia, el diseño del experimento fue basado en la metodología PHVA de mejora continua (planificar-hacer-verificar-actuar), la cual es una metodología cuali-cuantitativa, ya que se realizaron visitas a la clínica para obtener datos duros sobre el funcionamiento energético del edificio, esto mediante encuestas y entrevistas con los encargados de la clínica, y de manera experimental, por medio de monitoreo longitudinal en el periodo cálido. El monitoreo se realizó con sensores de temperatura del aire y humedad relativa al interior de la clínica. Para los *louvers* en el ventanal de la fachada principal, se instalaron sensores en la entrada de radiación solar al interior de la clínica, mientras que para el aislamiento térmico por losa de azotea, se instalaron en el tercer nivel de dicha clínica. Para la simulación térmica se comparó la clínica sin las estrategias y con estrategias; el software utilizado para la simulación fue *Design Builder*.

Los resultados demostraron que en un día típico del mes de diciembre con cielo despejado, la temperatura interior en el primer y segundo nivel resultó 7 °C por debajo de la temperatura exterior, que fue de 35 °C, mientras que en el tercer nivel resultó 6 °C menor que en el exterior; también se observó una disminución de la oscilación térmica en el interior. En la simulación energética, resalta



un ahorro de 49% de consumo energético al utilizar aire acondicionado en todas las zonas del edificio, sin contar los baños y las áreas de espera entre el modelo con estrategias y el modelo sin estrategias.

Palabras clave: evaluación térmica, eficiencia energética, estrategias bioclimáticas y edificio privado

Abstract

The energy evaluation of a private building called CREARH-ART regional center specialized in human reproductive support, Clinic located in the city of Tuxtla Gutierrez in the state of Chiapas, where it has a warm sub-humid climate, this building is a product of design of the architectural firm AYB Architects that does not have bioclimatic strategies since its conception.

The main objective was to determine qualitatively and quantitatively the impact of the application of bioclimatic strategies in the CREARH-ART clinic, evaluating the energy factor in order to reduce energy costs. The clinic has a south-west orientation (260 °N) and compact configuration, the strategies applied to the clinic consist of solar protection type louvers on the main facade (the most critical) consisting of a window and is located to the south and thermal insulation on the roof slab specifically a semi-intensive green roof. The evaluation was carried out experimentally and by thermal simulation in the warm period.

The methodology proposed to find the strategies is based on the Energy Management System that consists of five stages and is designed taking into account the requirements of the NC-ISO 50001: 2011. (CONUEE, n.d.) consequently the design of the experiment was based on the PHVA methodology of continuous improvement (plan-do-check-act) this is a quali-quantitative methodology since visits were made to the clinic to obtain hard data on the energy performance of the building this through surveys and interviews with those in charge of the clinic and experimentally through longitudinal monitoring in the warm period. The monitoring was done with air temperature and relative humidity sensors inside the clinic. For the louvers in the window of the main façade, sensors were installed at the entrance of solar radiation inside the clinic, and for the thermal insulation by roof slab, it was installed on the third level of the clinic. For the thermal simulation, the clinic was compared without the strategies and with strategies; the software used for the simulation was Design Builder. The results showed that on a typical day in December with a clear sky, the indoor temperature on the first and second levels was 7 °C below the outdoor temperature, being 35 °C outside, and on the third level it was 6 °C lower than outside, and a decrease in the indoor thermal oscillation was also observed. The energy simulation showed a 26% saving in energy consumption when using air conditioning in all areas of the building, excluding restrooms and waiting areas, between the model with strategies and the model without strategies.

Keywords: thermal assessment, energy efficiency, bioclimatic strategies and private building

Introducción

Los edificios hospitalarios (clínicas, hospitales y centros de salud) son unos de los mayores consumidores de energía, ya que el uso es continuo los 365 días del año, las 24 horas, además, los requerimientos de confort y servicios médicos específicos, tales como equipamiento médico, calidad del aire, etc., los convierte en una tipología arquitectónica altamente intensiva (Szklo *et al.*, 2004; López Cristlà, 2011).

Mientras los hospitales se equipen con nuevas tecnologías, tenderán a aumentar el consumo energético, reflejando un aumento significativo de los costos de funcionamiento, por lo cual la eficiencia energética se ha convertido en uno de los temas de preocupación a nivel mundial en los hospitales (Lee & Rajagopalan, 2008). Además, el conocido incremento en los índices de dióxido de carbono (CO₂) que provocan el calenta-

miento global, incentiva y crea una necesidad por implementar nuevos sistemas o estrategias para aumentar la eficiencia energética en las instituciones hospitalarias, como la implementación de la NTC- ISO 50001, que se enfoca en la identificación del consumo energético en los equipos, sistemas o procesos de una organización. La gestión energética integrada en todos los procesos de la organización, es la estrategia de la norma para alcanzar un aumento en la productividad y una disminución en el impacto ambiental (CONUEE, n.d.). Todo lo anterior se enfoca en la importancia de la reducción de costos energéticos en los edificios del sector salud sin perder calidad de servicios y tomando en cuenta la reducción de la contaminación ambiental.

Los principales impulsores para incorporar la gestión de la energía como parte de la política pública son, principalmente, la seguridad energética, el desarrollo económico y la competitividad, el cambio climático y la salud pública (SENER-CONUEE-GIZ, 2016). Entre las principales estrategias de eficiencia energética en edificaciones, podemos mencionar la reducción de consumo de energía eléctrica por acondicionamiento del ambiente, mejorar el aislamiento térmico en las construcciones y promocionar mejores prácticas en edificaciones.

En este contexto, el presente trabajo se centra en evaluar el comportamiento térmico y el consumo energético de la clínica CREARH-ART en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, con estrategias bioclimáticas, entre las que destacan: protección solar tipo *Louvers* y uso de aislamiento térmico por losa. Cabe destacar que la clínica fue diseñada con ventilación mixta, es decir, en ciertos horarios y meses se pretendía usar la ventilación natural y en otros periodos el aire acondicionado en ciertas zonas, pero este diseño poco ha funcionado. Se realizó un monitoreo de las temperaturas del aire al interior en diferentes zonas de la clínica, y para conocer el impacto de la aplicación de las estrategias en el consumo energético, se realizó una simulación térmica y energética con el software *Design Builder*, simulando el edificio sin estrategias y con estrategias.

Becerra y Riquetti (2015) desarrollaron en Ecuador proyectos enfocados a mejorar la eficiencia energética en el sector público hospitalario. Es importante comenzar a plantear soluciones energéticas que brin-

den los mismos servicios, pero con un menor consumo energético. Los esfuerzos que se implementen en función de lograr la eficiencia y uso racional de la energía, son factores decisivos para alcanzar mejores niveles de progreso económico y social en el país. En el trabajo se determinó los requerimientos energéticos, para ello se analizó toda la infraestructura del hospital: locales, servicios que brinda, equipos de los que dispone, tiempo que los emplea y el tipo de energía que requiere; una vez establecido el consumo energético, se calcularon los índices de consumo energéticos, tanto eléctricos como térmicos. Los índices calculados tienen como objetivo comparar el consumo energético del hospital con estándares internacionales, tanto en la etapa de realización del estudio, como en la propuesta (Becerra & Riquetti, 2015).

Por otra parte, Edwin Nestor Castañeda Ramírez (2003), realizó la tesis "Propuestas para uso eficiente de energía en la red de hospitales públicos del Gran San Salvador", donde planteó una solución realista al problema del alto consumo energético que se tiene actualmente en la red de hospitales públicos del Gran San Salvador. La problemática se trató desde el punto de vista de la eficiencia energética que puede lograrse por concepto de iluminación y cargas instalada de aires acondicionados, para lo cual se escogió específicamente dos grandes áreas en las que existen mayores posibilidades de ahorro, gracias a la tecnología que hoy en día pone a nuestra disposición instrumentos que resultan mucho más eficientes en cuanto al aprovechamiento de la energía (Castañeda Ramírez, 2003).

El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y el Comité Español de Iluminación (CEI), establecieron una serie de pautas y recomendaciones para ayudar a los técnicos responsables de proyectar o redactar especificaciones técnicas de las instalaciones de iluminación de hospitales y otros centros relacionados con la salud, en su tarea de establecer los criterios de calidad a satisfacer en las mismas, seleccionando los sistemas de iluminación, luminarias, lámparas, equipos auxiliares de encendido y sistemas de regulación y control, así como los criterios básicos de diseño de dichas instalaciones, con la finalidad de racionalizar el uso de la energía con instalaciones de la mayor eficiencia energética posible. Para ello se estableció un procedimiento a seguir por el técnico en las fases de diseño, cálculo, selección de equipos y estudio energético y económico de alternativas,



al igual que para los aspectos de mantenimiento y explotación de la instalación, desde el punto de vista de la eficiencia y el ahorro energético (Mi Ciencia y Tecnología, 2001).

Marco teórico

En este trabajo fue necesario incluir estrategias de diseño bioclimático en el edificio, para lo cual fue importante contar con referencias que nos ayudaran a evaluar las variables climáticas que se generan al interior de un espacio. En este sentido, consideramos el enfoque adaptativo para determinar el rango de confort. Algunos investigadores, como Humphreys y Nicol, han abogado por establecer modelos de confort diferenciados con el tipo de funcionamiento térmico de los edificios. Particularmente los investigadores mencionados, han publicado varios modelos estadísticos de confort, el modelo con edificios pasivos, con sistemas de climatización y otro cuyo funcionamiento es desconocido. Bajo esta premisa, se utilizó el siguiente modelo de confort de Nicol para determinar la temperatura neutral de confort y la zona de confort para el clima en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Al valor de la T_n se le sumará y restará 2.5 k, siendo un rango de confort de 5k.

$$T_n = 17 + 0.38 * T_m$$

Ecuación 1. Ecuación para calcular la temperatura neutral de confort. Fuente: Gómez *et al.*, 2007.

Otra presuposición al realizar una evaluación térmica y energética, es considerar la idea principal del desempeño térmico y energético del edificio que explica de manera cuantificable qué tan bien un edificio y sus sistemas proporcionan las tareas y funciones que se esperan de ese edificio (Wilde, 2017).

En el desempeño energético, la referencia es el consumo de electricidad, siendo el ahorro del consumo el punto a evaluar, obtenido de la simulación presentada en Watts y Watts por metro cuadrado (W/m^2).

Metodología

Está basada en tres fases generales que engloban la metodología PHVA de mejora continua (planear-hacer-verificar-actuar). La primera es la fase teórica

donde damos a conocer la síntesis del estado actual energético del edificio, la síntesis arquitectónica y el marco teórico; la segunda es la fase experimental (equipos y monitoreo); y la tercera fase corresponde a la evaluación con software especializado (proceso de simulación térmica-energética).

El texto se encuentra estructurado de la siguiente manera:

1. Localización y clima: se describe la localización, condiciones del clima de Tuxtla Gutiérrez donde se encuentra la clínica y las estrategias bioclimáticas que se tomaron en cuenta para el proyecto de investigación.
2. Descripción del proyecto (caso de estudio): se describe la idea arquitectónica del proyecto actual y su configuración energética.
3. Equipos y monitoreo: descripción del equipo de monitoreo experimental.
4. Proceso de simulación térmica-energética: se describe el proceso de la simulación utilizando (*Design Builder*), materiales, áreas y detalles de las estrategias bioclimáticas implementadas.
5. Resultados: se presentan los resultados en gráficas y tablas, considerando los parámetros de evaluación térmica y energética.
6. Conclusiones: se describen los hallazgos más relevantes comprobando la hipótesis planteada y los alcances logrados.

1. Localización y clima

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez, capital del estado de Chiapas, se ubica en latitud norte 16.75 y longitud oeste de 93.13, tiene una altitud de 570 msnm, con temperatura promedio de máxima anual de 32 °C, temperatura media anual de 25.8 °C y temperatura promedio mínima anual de 19.5 °C, con una humedad relativa anual de 65.0% (Normales Climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional, 1981-2010).

En la Figura 1 se observa que Tuxtla Gutiérrez tiene un clima cálido subhúmedo. De acuerdo a la carta psicrométrica de Givoni, se da a conocer que las estrategias de diseño bioclimático para este tipo de clima son: ventilación natural, enfriamiento de la envolvente del edificio y protección solar, esta viene implícita porque no se considera como ganancia térmica.

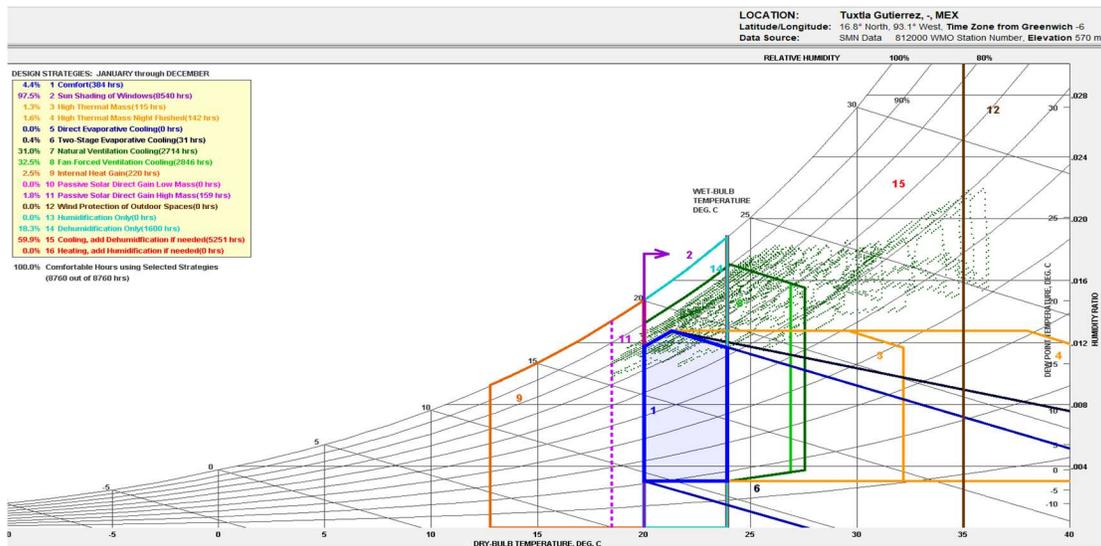


Figura 1. Carta psicrométrica con estrategias de Givoni para Tuxtla Gutiérrez.
Fuente: Elaboración propia (EPW en *Climate Consultant 6.0*).

La orientación de la fachada principal de la clínica se encuentra en el surponiente.

De acuerdo a la tabla de estrategias de diseño de Givoni, las más importantes son:

- 97.5% Sombreado en ventanas.
- 31.0% Ventilación natural.
- 32.4% Ventilación forzada.
- 60.7% Enfriamiento.

A partir del análisis bioclimático se sintetizaron las siguientes estrategias que fueron aplicadas al edificio en la simulación:

- Sombreado en ventanas a la luz del sol. No existe protección solar en el proyecto, pero se cuenta con volados que por diseño están en la volumetría del proyecto; sin embargo, por la radiación solar se necesita protección solar en

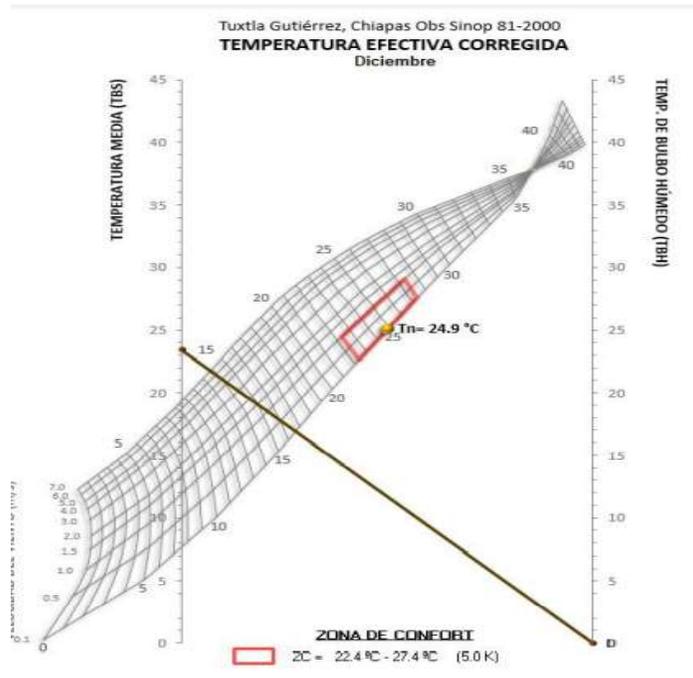


Figura 2. Umbral de confort. Fuente: Elaborado a partir del BAT (*Bioclimatic Analysis Tool*/herramienta).



Figura 3. Vista aérea de la clínica.

la envolvente, por ello, se aplicó el uso del sistema de *persianas* con una inclinación exacta para evitar la radiación solar en la fachada principal de la simulación con estrategias.

- Enfriamiento. Se propone que mediante el aislamiento térmico en techos (losa de azotea) del edificio se reduzcan las ganancias y pérdidas de calor.

En la Figura 2 se hizo uso del BAT, donde se introdujeron variables y datos ya determinados de temperaturas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, para obtener distintas tablas y gráficos que nos ayudaron a ahondar más en la Información. Dicho esto, podemos observar que el BAT nos arrojó un umbral del confort

de 24.9 °C, valor que fue nuestra variable de confort y que representa la medida de temperatura a la que nos tenemos que acercar para lograr reducir las temperaturas interiores en la clínica.

2. Descripción del proyecto

La descripción del proyecto engloba la geometría realizada en *Design Builder*. El caso de estudio es un edificio ya construido, específicamente, una clínica privada (Figura 3).

Como podemos observar en la Figura 4, actualmente la clínica tiene un ventanal de dos niveles en la fachada principal donde la radiación solar entra de

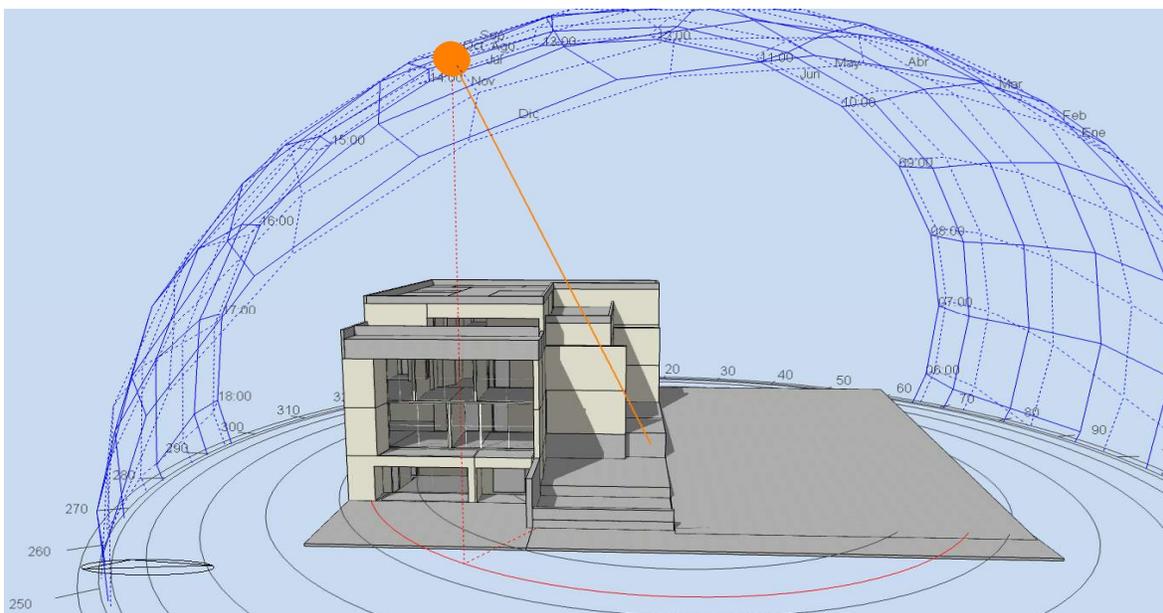


Figura 4. Clínica CREARH-ART (montea solar).

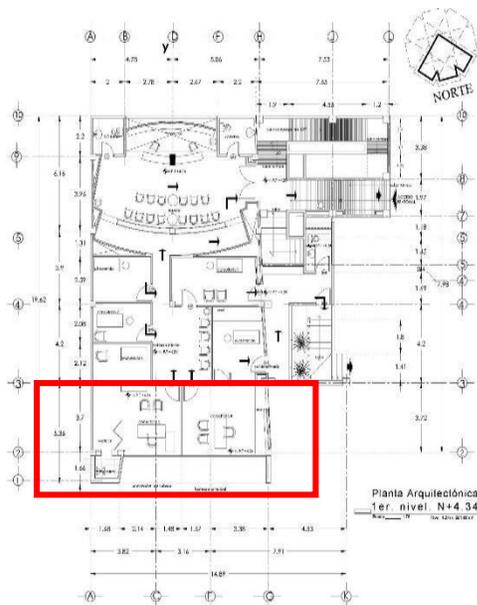


Figura 5. Planta arquitectónica del primer nivel.
Fuente: Dibujo arquitectónico obtenido por el despacho.

manera crítica, ya que cuenta con orientación sur poniente. Un punto importante es la configuración energética que tiene el edificio actual, es decir, qué aparatos eléctricos posee, cuántas personas usan el edificio, cómo se refrigeran los espacios, etc. Para esto se llevaron a cabo diferentes visitas con el objetivo de realizar una auditoría energética y con ello ampliar el contexto energético del edificio.

El edificio tiene cuatro áreas, a saber: en planta de sótano se encuentran los espacios de análisis de sangre y estudios; en el primer nivel está el área de consultas; en el segundo nivel están los quirófanos; y en el tercer nivel se encuentran las habitaciones de recuperación. Es importante recalcar que las áreas más afectadas por la radiación solar son los espacios del segundo y tercer nivel (Figura 5).

El aislamiento térmico en losa se implementará en el tercer nivel del edificio, ya que es donde se encuentra la losa de azotea; con este aislamiento reduciremos la conductividad térmica. Por otra parte, la configuración energética del edificio fue desglosada por medio de una pequeña auditoría energética a la clínica, la cual consistió en tomar datos generales de la clínica y datos de aparatos electrónicos que se encuentran en ella, tales como, computadoras, ventiladores, televisores y luminaria. Se concluye en este apartado que los aparatos electrónicos son los necesarios para su uso, pero los usuarios no tienen una cultura de ahorro energético y, por otra parte, la ventilación de los espacios no es la correcta en cuanto a cargas de refrigeración, a lo que se suma el uso excesivo de los aparatos de ventilación, tales como, aire acondicionado y ventiladores.

3. Equipos y monitoreo

Para medir la temperatura de bulbo seco del aire interior (TBS), se utilizó el HOBO U12-012 que posee las siguientes especificaciones: rango de medición de temperatura (-20 °C a 70 °C), Humedad Relativa (RH): 5% a 95% RH. La calibración de los equipos se realizó comparando con un equipo previamente calibrado por un laboratorio de ensayo. Se usaron cuatro equipos para las áreas de cada nivel, siendo protegidos de la radiación solar directa de ventanas. Se colocaron en una altura y posición intermedia en el espacio. Los sensores se colocaron de acuerdo a la Tabla 1.

El periodo de medición fue de julio a diciembre, considerando mayo el mes más crítico, ha sido utilizado para las comparaciones. Las zonas con temperaturas internas más altas, fueron el primer nivel donde se encuentran los consultorios 3 y 4, así como tercer nivel donde se ubica la cafetería; estos dos niveles se

Tabla 1
Equipos utilizados.

Sensor	Medición
1-Hobo U12	Primer nivel-zona de los consultorios 3 y 4.
2-Hobo U12-012	Primer nivel-zona de espera para consultas.
3-Hobo U12-012	Segundo nivel-zona de quirófanos.
4-Hobo U12-012	Tercer nivel-zona de cafetería.

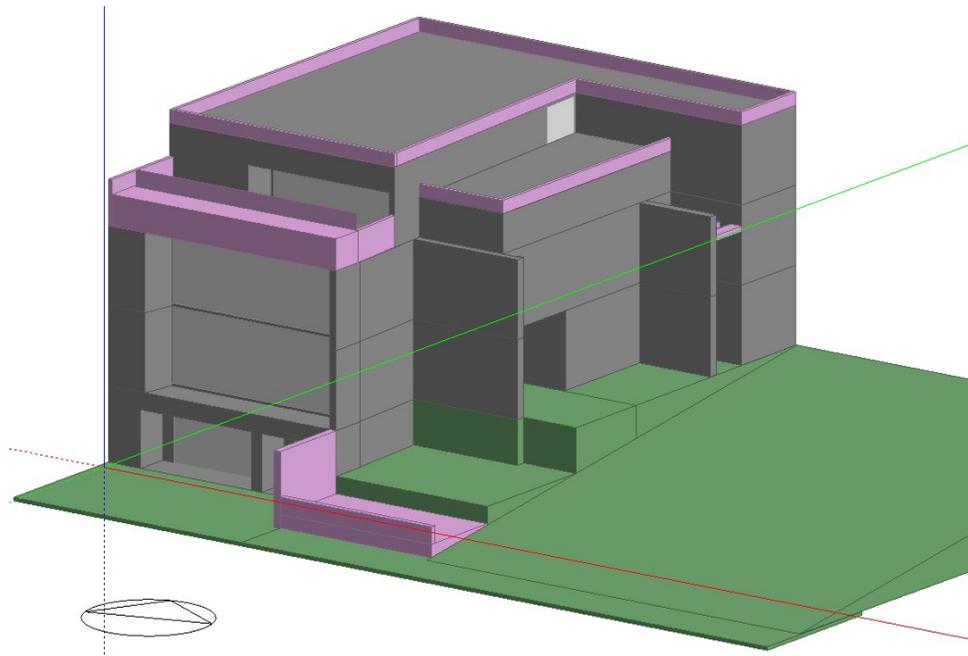


Figura 6. Modelo geométrico de la simulación térmica de la clínica.

convierten en un foco de gran importancia, ya que están generando mayor temperatura interna que externa. Esta variable fue la primera en ser detectada.

4. Proceso de simulación térmica-energética

Se realizó la simulación térmica con el software *Design Builder*. El primer paso fue la modelación del edi-

ficio mediante los planos arquitectónicos que nos fueron entregados por los arquitectos diseñadores de la clínica. La modelación fue realizada en el mismo programa de simulación (Figura 6).

Un paso importante en el proceso de modelación fue establecer los datos precisos de los materiales de construcción utilizados. El programa nos genera un modelo volumétrico donde podemos observar los materiales con diferentes colores para identificarlos de mejor manera (Figura 7). Todos los muros del edificio

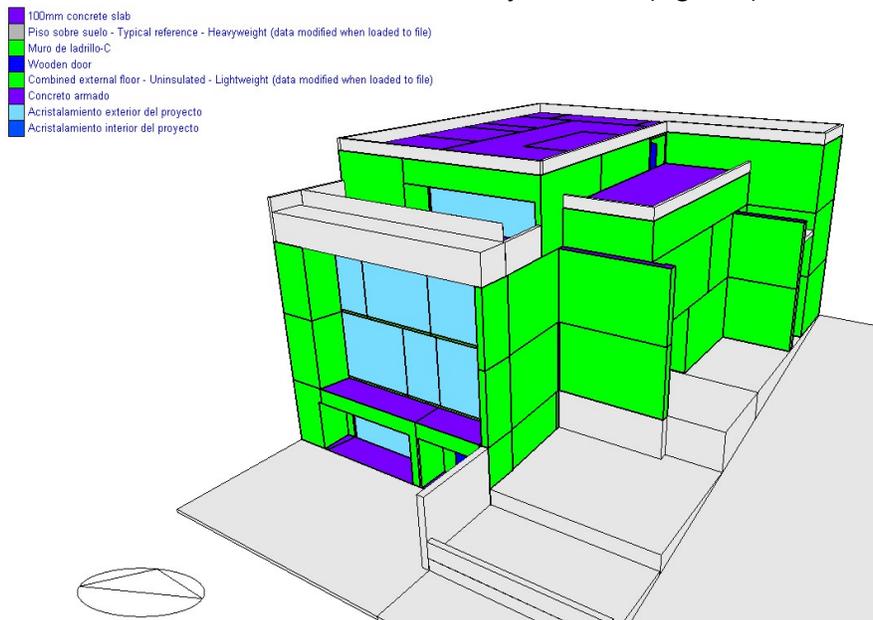


Figura 7. Visualización del modelo con los materiales.

Tabla 2
Materiales utilizados en la envolvente de la clínica para la simulación con estrategias y sin estrategias.

Código material	Tipo	Material	Espe-sor (m)	Conductividad tér-mica (W/(m·K)	Densidad (Kg/m ³)	Calor especí-fico (J/Kg·K)
MCA	Mate-riales opa-cos	Mortero cemento arena	0.020	0.72	1860	840
L		Ladrillo	0.130	0.814	1800	921
CA		Concreto armado	0.100	1.75	2300	920
T		Tierra	0.25	0.52	2050	-
MG		Membrana geotextil	0.01	0.036	2400	710
MD		Membrana con hue-cos drenantes	0.07	0.040	1500	1400
IB		Impermeabilizante blanco	0.001	0.35	1500	1300
LC		Loseta cerámica	0.009	1.300	2300	840
CC	Trans-pa-ren-tes	Cristal claro	0.003	Conductividad tér-mica (W/(m·K) 0.9	Transmisión so-lar total 0.861	Transmisión solar directa 0.837

Fuente: Elaboración propia a partir de la CTE (2010).

Tabla 3
Componentes constructivos CLI-E y CLI-SE.

Tipo	Componentes constructivos	Materiales (Capas exterior a interior)
Vivienda sin Estra-tegias	Muro exterior e interior	MCA+L+MCA
	Losa de concreto armado	IB+CA+MCA
	Entrepiso	LC+CA+MCA
	Ventanas	CC
Vivienda con Estra-tegias	Muro exterior e interior	MCA+LA+MCA
	Losa de concreto armado aislante térmico (techo verde semi intensivo)	T+MG+MD+MG+IB+CA+MCA
	Entrepiso	LC+CA+MCA
	Ventanas	CC

están contruidos de ladrillo, siendo esta el caparazón de la clínica, dichos muros tienen un recubrimiento de mortero cemento-arena, las losas son de concreto armado con un espesor de 10 cm, la losa de azotea tiene un impermeabilizante blanco, los pisos sobre suelo y entrepisos están constituidos por concreto armado y tienen losetas cerámicas, los materiales transparentes utilizados son de cristal claro.

Los datos de dichos materiales se presentan en la Tabla 2, donde damos a conocer el código de cada material, tipo, material, espesor en metros, conductividad térmica de cada material, densidad y calor específico. Estos datos están referenciados al Catálogo de

elementos constructivos del Código Técnico de Edificación (CTE, 2010).

Los componentes constructivos fueron introducidos como se indica en la Tabla 3, donde se presentan dos filas principales: clínica con estrategias (CLI-E) y clínica sin estrategias (CLI-SE). En la primera columna observamos los componentes constructivos y en la segunda los materiales con sus capas de exterior a interior, así como las consideraciones en las simulaciones realizadas. Como podemos observar, en la clínica con estrategias se le añadió a la losa de concreto cinco capas más, ya que se incluye el aislante térmico en losa con un techo verde semi intensivo.



Tabla 4
Parámetros relevantes introducidos en las simulaciones.

Parámetros de simulación	Valores agregados	
	CLI-SE	CLI-E
Periodo de simulación	1º de enero a 31 de diciembre	
Archivo climático	EPW desarrollado a partir de meteonorm y editado de acuerdo a la estación 07165 de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, de la normal climática 1981-2010 del SMN	

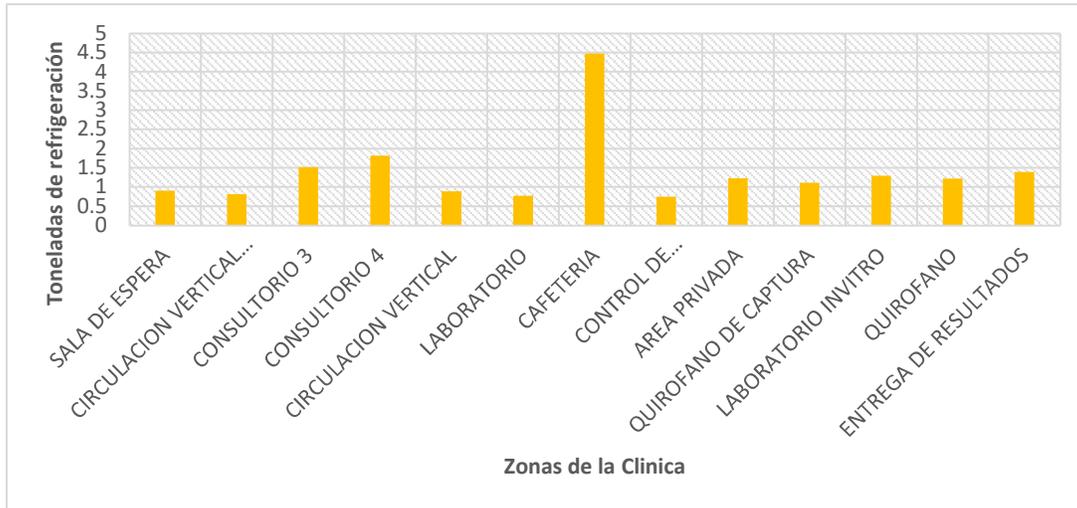


Gráfico 1. Toneladas de refrigeración necesarias para la climatización de la clínica (edificio sin estrategias).

A continuación se presentan los parámetros de simulación, aspectos del archivo climático EPW (*Energypus Weather File*), que nos servirán para analizar de manera precisa los datos climáticos del lugar donde se encuentra la edificación (Tabla 4). El *Design Builder* permite obtener un sinnúmero de variables, en este caso, nos centramos en la Temperatura de

Bulbo Seco (TBS) para poder comparar con la medición experimental. La simulación con *Design Builder* permitió obtener el consumo energético utilizando aire acondicionado en toda la clínica y como resultado obtuvimos los kWh/m² o toneladas de refrigeración de cada espacio (Gráfico 1).

Las toneladas de refrigeración generan el dato para acondicionar los espacios, es decir, los aparatos

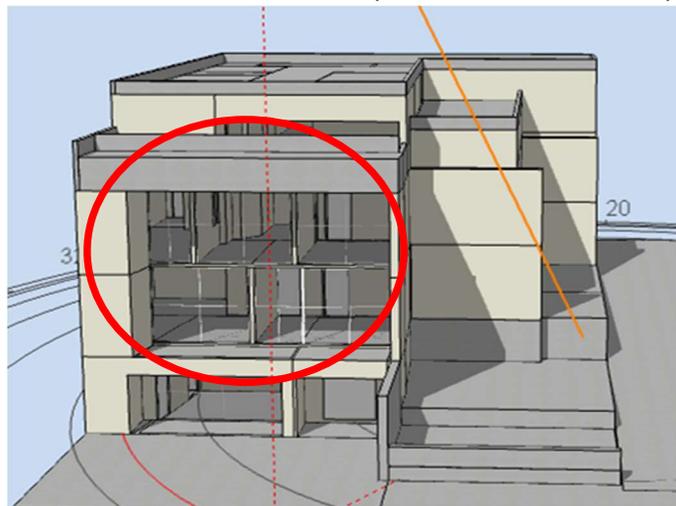


Figura 8. Visualización del modelo (fachada sur crítica).

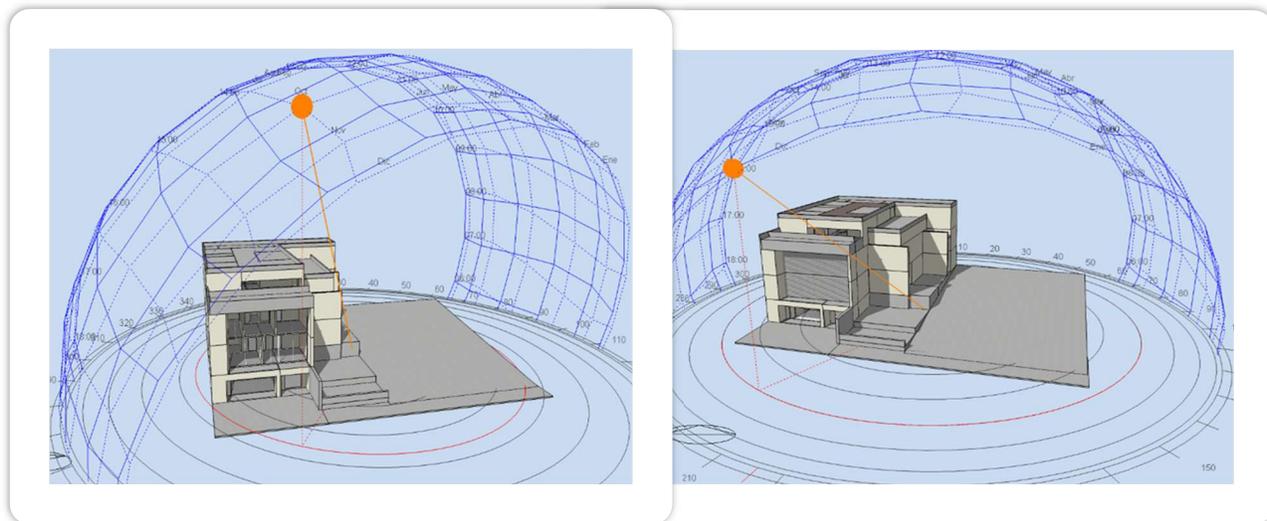


Figura 9. Geometría de la modelación en *Design Builder*.

de aire acondicionados exactos para que las áreas no tengan que usar en exceso estos aparatos, que es justamente lo que sucede actualmente, generándose una carga energética mayor. Los espacios en los que más se usa el aire acondicionado son, como se observa en la Figura 8, los que se encuentran en la fachada principal donde está el ventanal, esto debido a la radiación solar y a la losa de azotea, y donde se encuentra la cafetería que, como observamos en la Tabla 5, es la que mayor refrigeración ocupa por la transferencia de calor por la losa.

Análisis de la protección solar en ventanas

En la Figura 9 se hace el análisis de la geometría por medio de la modelación con el software de *Design Builder*, que es una herramienta para identificar aspectos

del comportamiento de soleamiento en la edificación. Esto nos permitirá saber si verdaderamente el uso de *louvers* en el ventanal de la fachada crítica de la clínica, ayudará a reducir las temperaturas interiores de los espacios mencionados anteriormente.

La protección solar en ventanas se hizo a partir de *louvers*, dispuestos de la siguiente manera: *louvers* de 0.20 m de profundidad con un ángulo de 30°, separados entre ellos 0.15 m (Figura 10). Se colocaron en todo el ventanal que compone la fachada principal que, cabe recalcar, es la fachada más crítica en cuanto a radiación solar. Esta estrategia de sombreado en ventanas al sur nos ayudará a reducir la entrada de radiación solar al interior de los espacios más afectados (Figura 11).

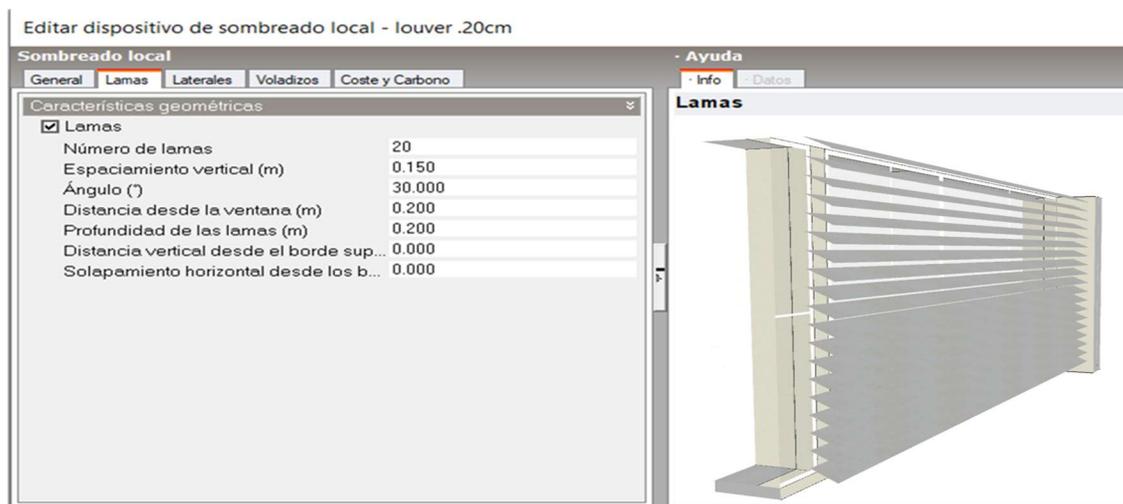


Figura 10. Estrategia de protección solar en ventanas. Parámetros para la simulación.



Figura 11. Estrategia de protección solar en ventanas.

5. Resultados

Monitoreo experimental

Para los resultados del monitoreo experimental con los HOBO, se exponen los espacios más críticos, es decir, primera y tercera planta. En la primera planta están los consultorios 3 y 4 que se encuentran en la fachada sur (la más crítica) y que, como ya se mencionó, dispone de un ventanal de cristal claro que genera radiación solar constante. En el caso del tercer piso, allí se ubica la cafetería que por losa genera transferencia de calor. Actualmente, dichos espacios tienen aire acondicionado, pero no es el correcto para generar confort, lo que provoca un uso excesivo de este equipo. Para llevar a cabo el monitoreo experimental, se seleccionó el 7 de noviembre de 2021, debido a que presentaba condiciones de cielo despejado, lo que evitaría efectos como nubes que pudieran afectar el análisis.

En la Figura 12 se presenta la TBS interior de los consultorios 3 y 4 ubicados en la primera planta, así como la TBS interior de la cafetería situada en el tercer nivel. Se seleccionó el 07 de noviembre de 2021 por dos razones: fue el mes crítico y fue el día con condiciones de cielo más despejado. La zona de confort térmico (ZCT) con el modelo adaptativo resultó de 24.3 °C como límite inferior (LI) a 29.3 °C como límite superior (LS). La TBS interior de los consultorios 3 y 4, está fuera de la zona de confort a partir de las 13:00 h y vuelve entrar a la ZCT en la madrugada. En el caso de

la cafetería, está fuera de la zona de confort a partir de las 14:00 h y vuelve a entrar en ZCT en la madrugada. La gráfica da a conocer que la temperatura externa (TBS ext) es menor que la interna, es decir, está más caluroso por dentro que por fuera.

En la Figura 13 se presenta la medición de los días críticos del mes de noviembre. Se seleccionó este mes porque la inclinación del sol para Tuxtla Gutiérrez es directa a las ventanas de la fachada principal de la clínica, tal como se observa en la gráfica de la Figura 14. La inclinación del sol al sur es directa, sobre todo en las horas críticas que son a partir de las 12:00 a las 17:00 h. Con esto justificamos el por qué usar el mes de noviembre como mes crítico.

Las simulaciones por *Design Builder* arrojaron datos importantes de la clínica con estrategias y sin estrategias. En las Figuras 15, 16, 17 y 18, observamos que el uso de protección solar en ventanas reduce 5 °C la temperatura interna en el consultorio 4; con tan solo el uso de *louvers* en el ventanal con orientación sur (la más crítica) redujimos ampliamente los niveles de temperatura interna. La línea roja (temperatura radiante interna) es la variable que podemos controlar por medio de las estrategias bioclimáticas, en este caso, los *louvers*; la línea gris (temperatura exterior) es la que no impacta a las temperaturas; la línea azul es la que concierne a la temperatura del aire; y la franja azul indica la ZCT.

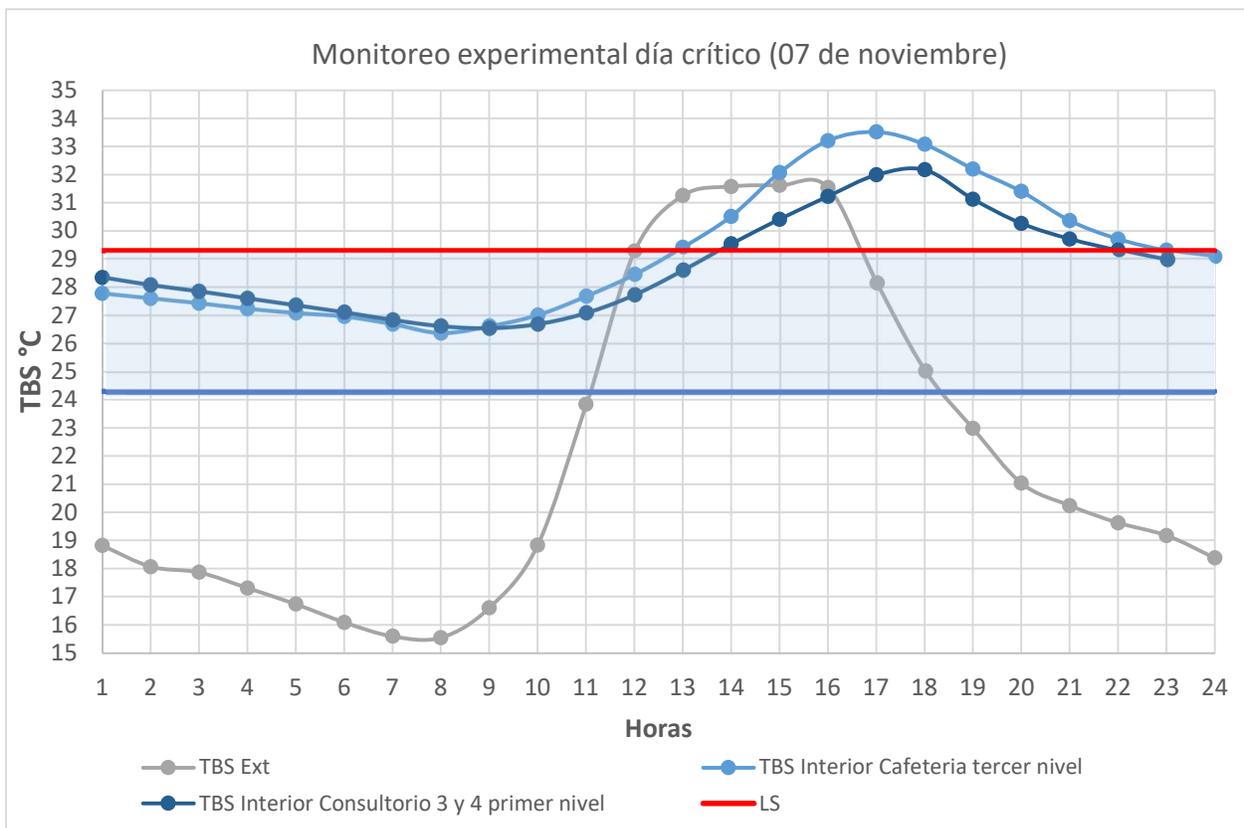


Figura 12. TBS del monitoreo experimental del 07 de noviembre de 2021.

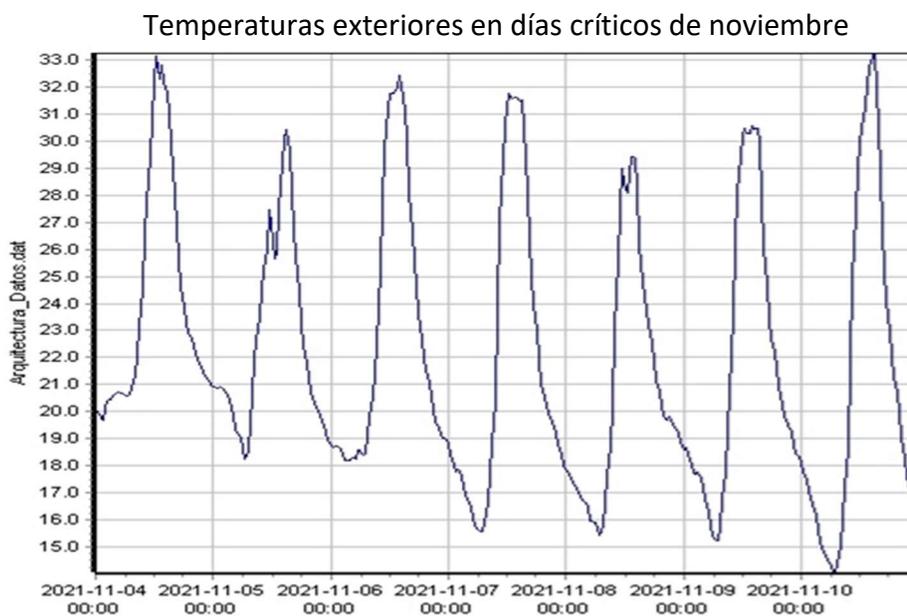


Figura 13. TBS exterior de días críticos del mes de noviembre de 2021.
Fuente: Estación fija del LNVCS-UNACH.

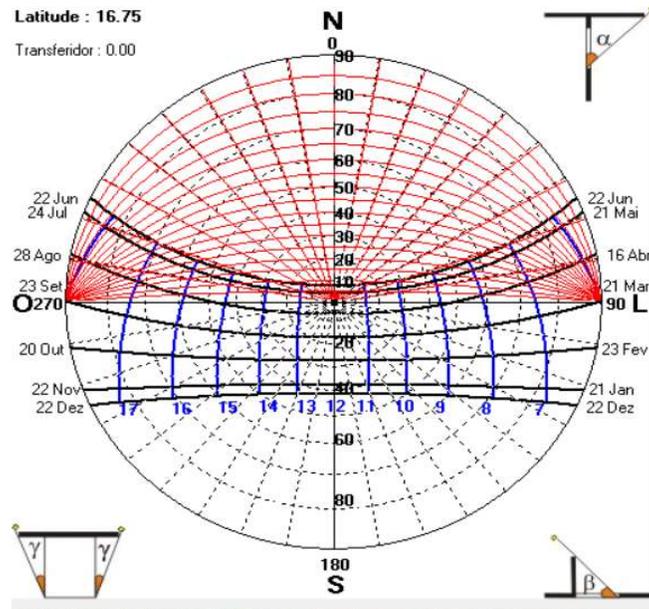


Figura 14. Gráfica solar de Tuxtla Gutiérrez. Fuente: SOL-AR.

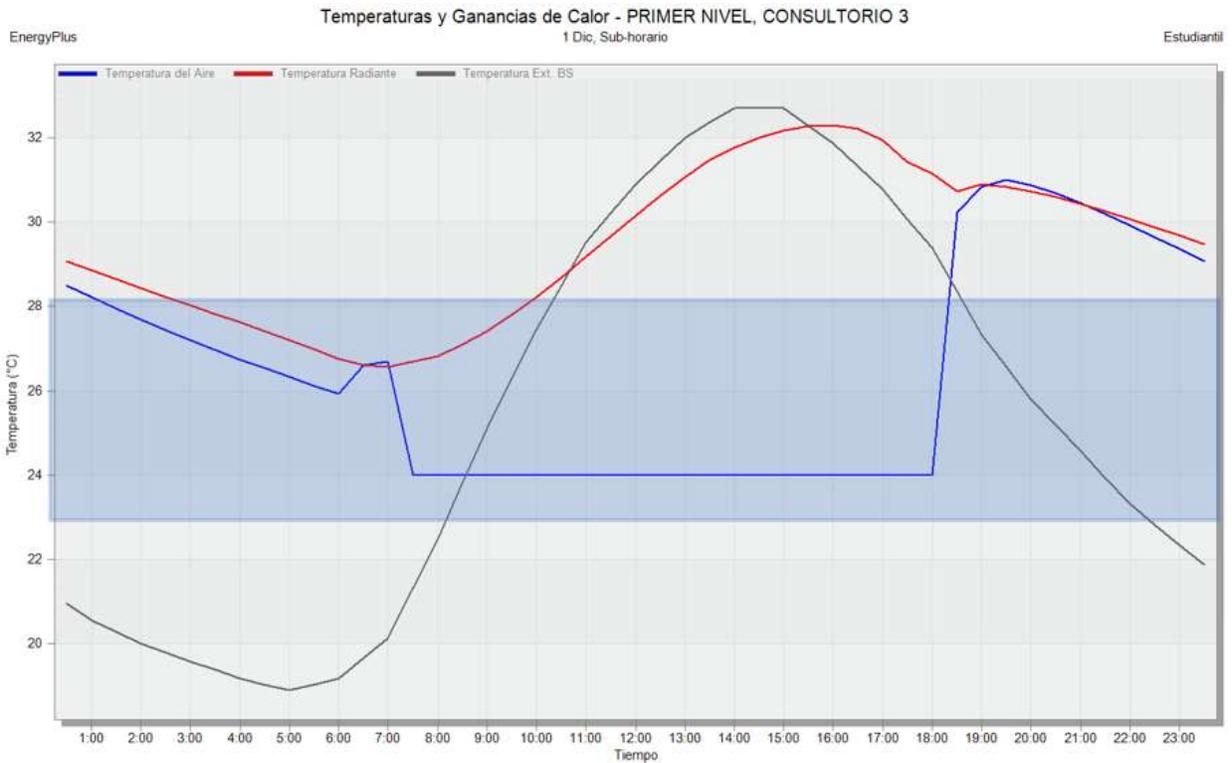


Figura 15. Temperaturas y ganancias internas de calor (consultorio 3). Sin estrategias. Con AC.

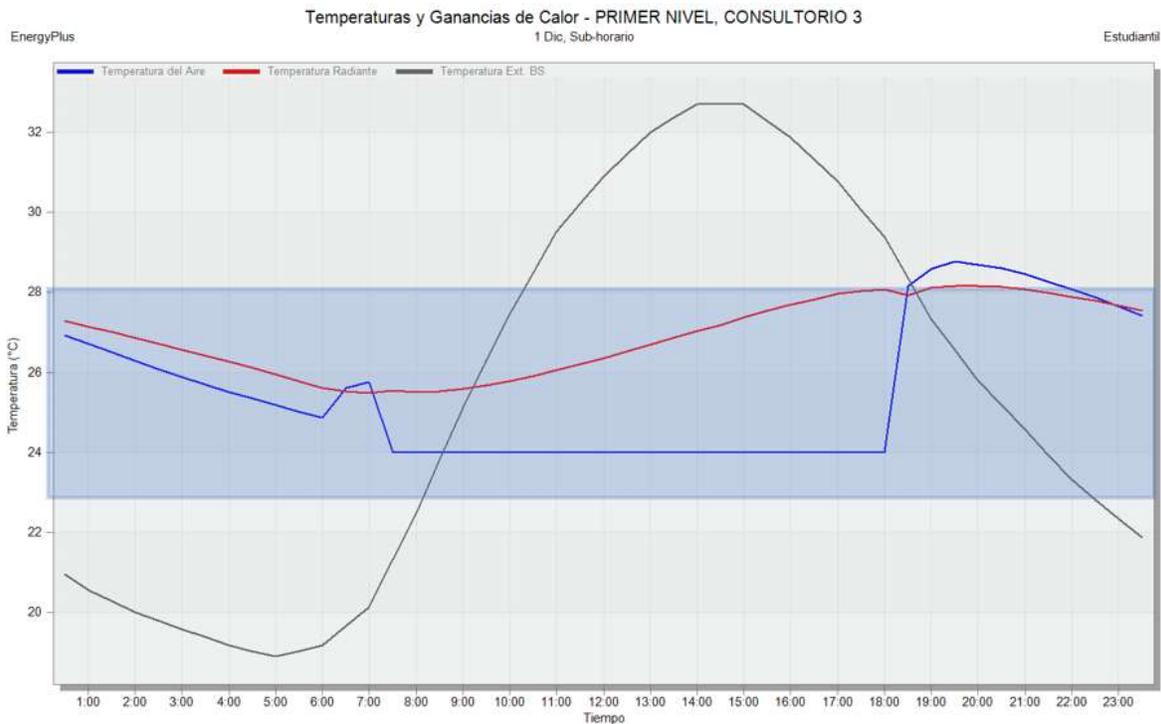


Figura 16. Temperaturas y ganancias internas de calor (consultorio 3). Con estrategias. Con AC.

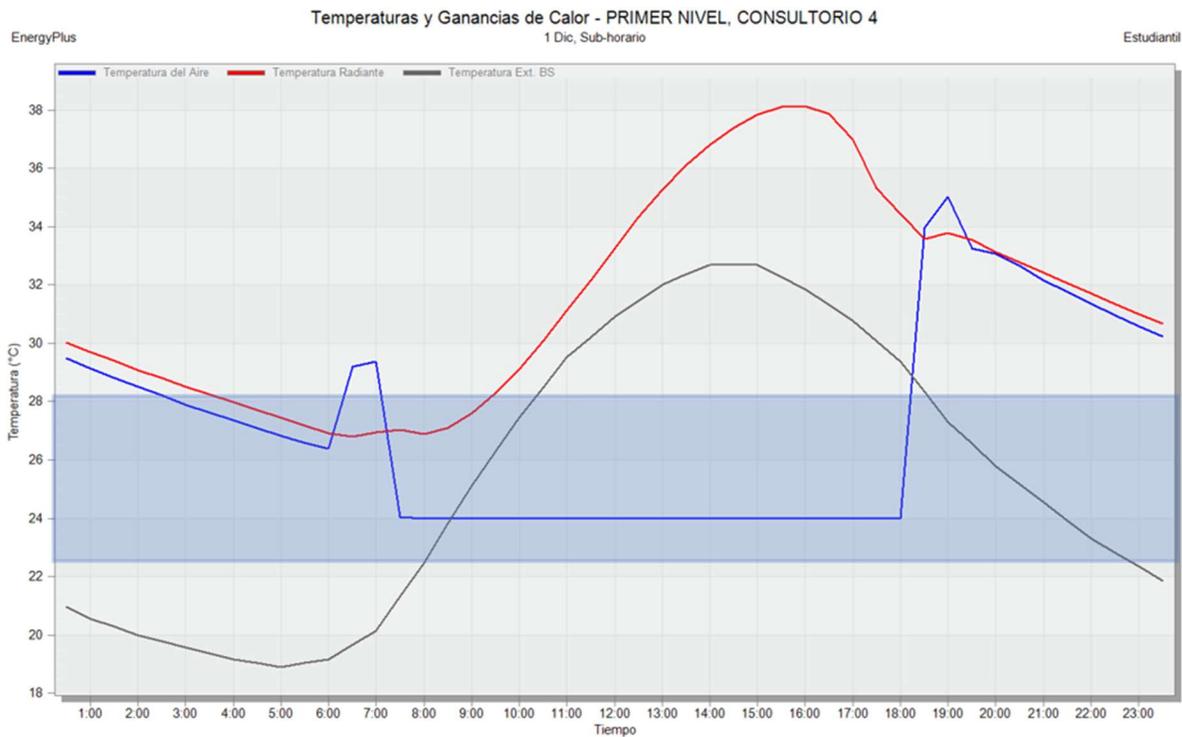


Figura 17. Temperaturas y ganancias internas de calor (consultorio 4). Sin estrategias. Con AC.

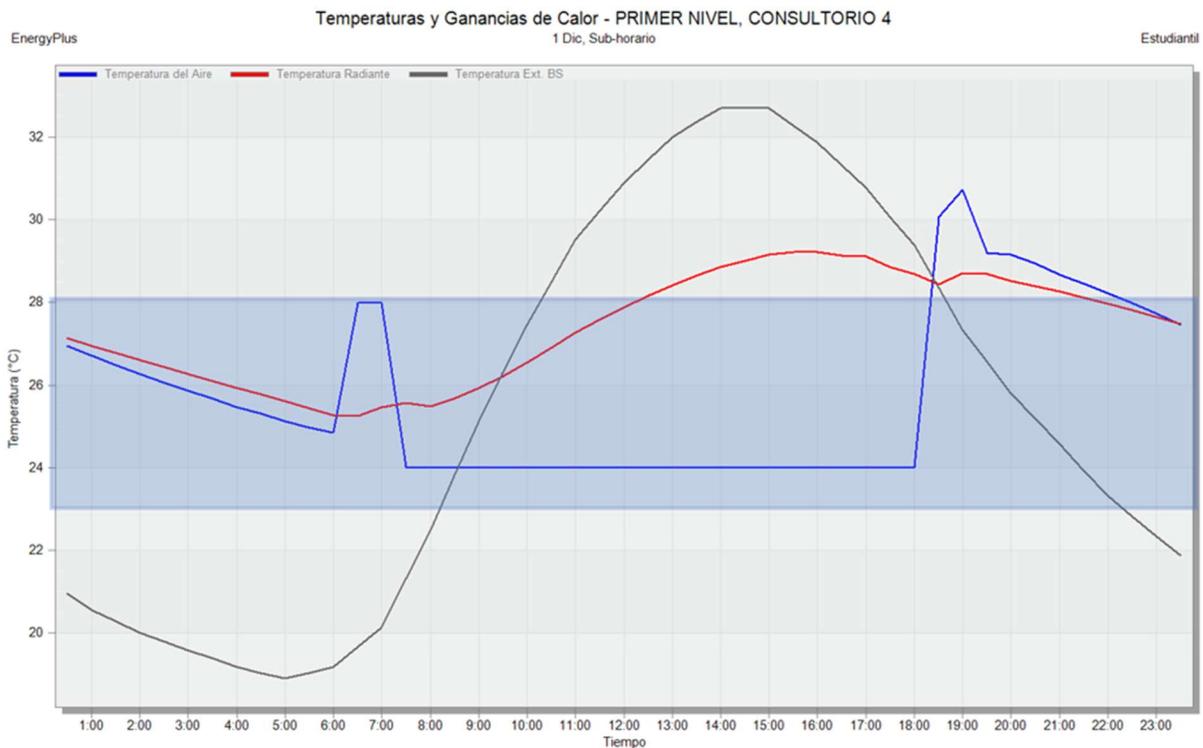


Figura 18. Temperaturas y ganancias internas de calor (consultorio 4). Con estrategias. Con AC.

En el caso de las Figuras 19 y 20, presentamos las gráficas de simulación de la cafetería ubicada en el tercer y último nivel de la clínica, cabe recalcar que para este nivel, como estrategia bioclimática, se propuso aislante térmico de techo verde semi intensivo que ayudará a reducir la transferencia de calor al último nivel del edificio. Como se observa en la Figura 18, las temperaturas internas están elevadas hasta 32 °C y se logran reducir con el aislante térmico hasta 28 °C, con lo cual ayudamos a reducir el uso excesivo del aire acondicionado.

En la Figura 20 podemos observar el cambio de temperatura en los espacios interiores con las estrategias bioclimáticas implementadas. Por su parte, en la Figura 21 observamos que no cuenta con estrategias y, por ende, tiene mucha más temperatura interna; cuando se agrega la protección solar (Figura 22), vemos el cambio de color en los espacios analizados. Esta simulación se realizó con *Design Builder*, y cabe recalcar que el tercer nivel no tiene aire acondicionado, mientras que el primer nivel sí, en los consultorios 3 y 4.

El consumo energético aproximado de la clínica no se consideró a partir de los recibos del servicio eléctrico, ya que no se obtuvo la información histórica. En

consecuencia, en este trabajo nos concentramos en el consumo energético por refrigeración, con el objetivo de reducir el uso excesivo de aire acondicionado. Para ello, se realizaron corridas de simulación de la clínica con y sin estrategias; como resultado, en la Tabla 6 se presentan los datos obtenidos, observándose el consumo energético por refrigeración total en kWh, energía por área total del edificio por refrigeración en kWh/m², así como el ahorro en % del consumo energético por refrigeración total.

Por medio de la simulación hicimos corridas dentro del programa y, como se observa en la Figura 23, el consumo eléctrico anual AC con estrategias en época de calor, es alto a pesar de que no entra directamente el sol al sur. El consumo energético total con estrategias al año fue de 163494.05 kWh, y en comparación al edificio sin estrategias en la Figura 24, podemos observar el consumo energético total de todo el edificio al año con más de los 320186.96 kWh, lo que representa una gran cantidad de consumo energético para el edificio sin estrategias, pero como vimos en la figura anterior, al usar estrategias de eficiencia energética redujimos 156692.9 kWh al año, un porcentaje de ahorro de 49% al año, casi la mitad y más de lo esperado (Figura 25).

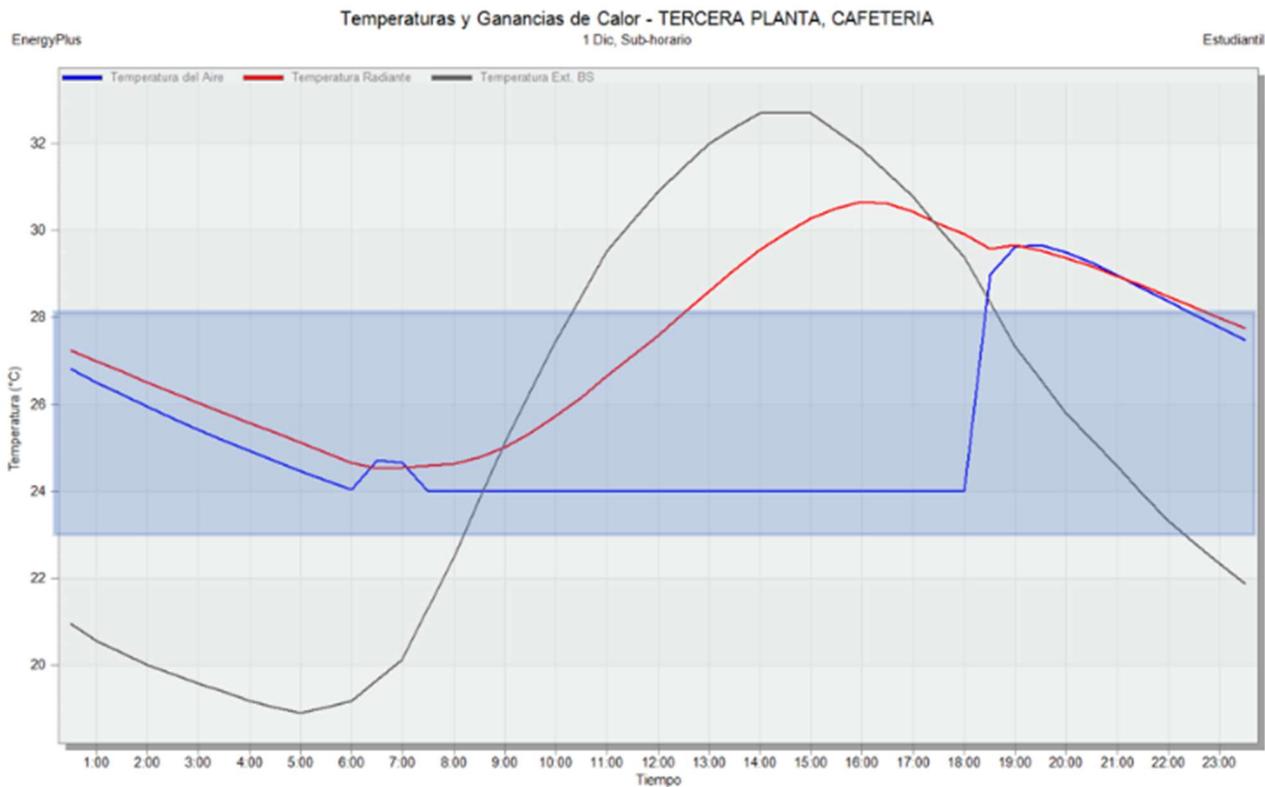


Figura 19. Temperaturas y ganancias internas de calor (cafetería). Sin estrategias. Sin AC.

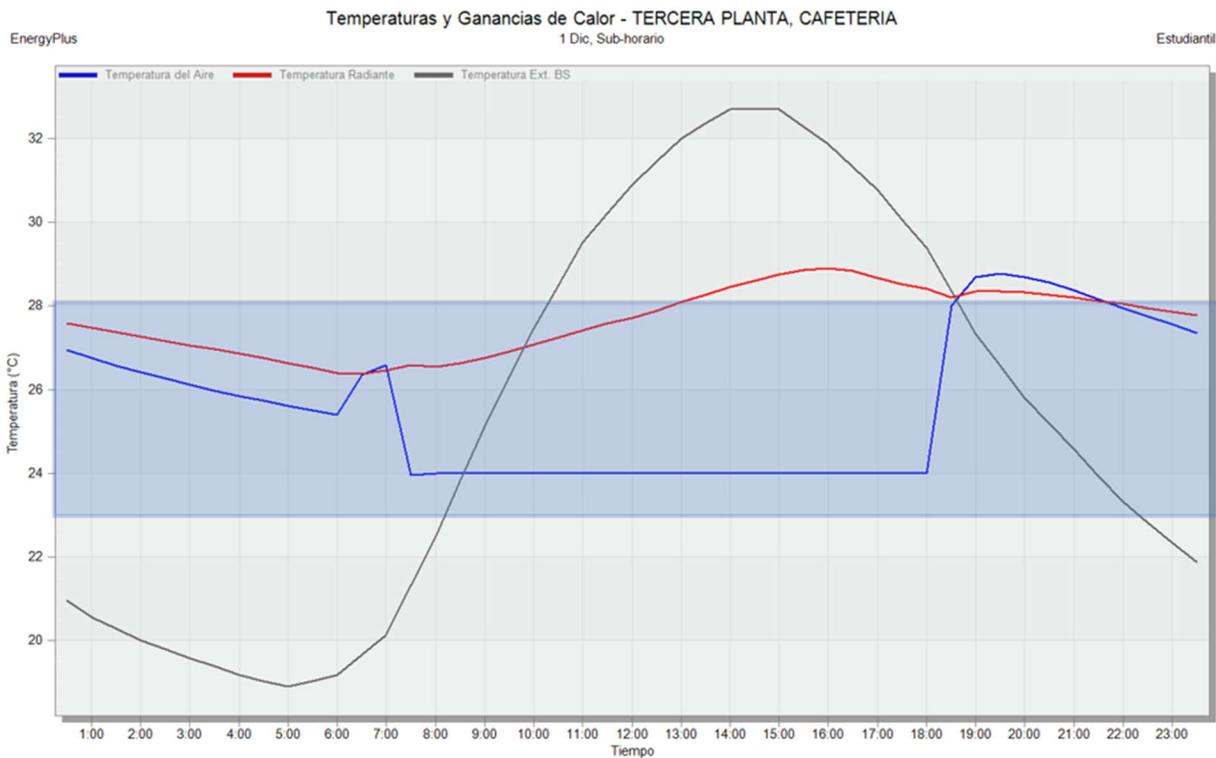


Figura 20. Temperaturas y ganancias internas de calor (cafetería). Con estrategias. Sin AC.

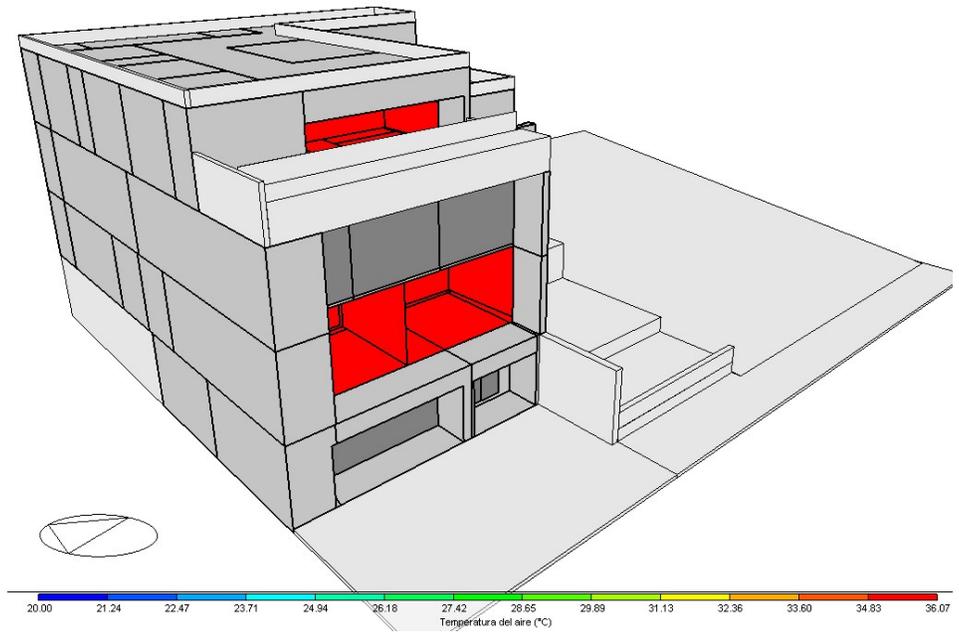


Figura 21. Temperaturas y ganancias internas de calor Clínica Crearh.

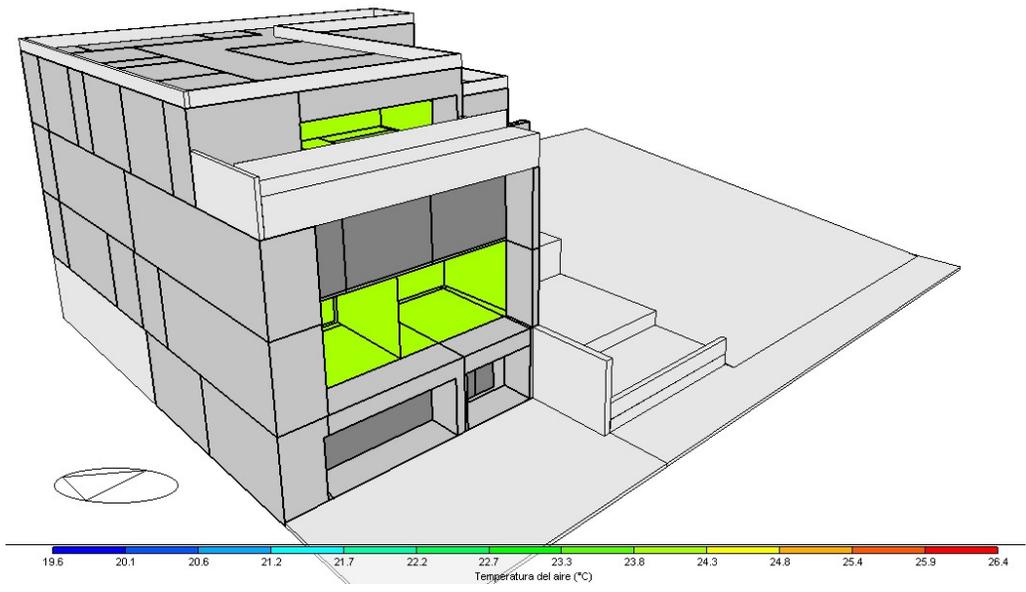


Figura 22. Temperaturas y ganancias internas de calor Clínica Crearh.

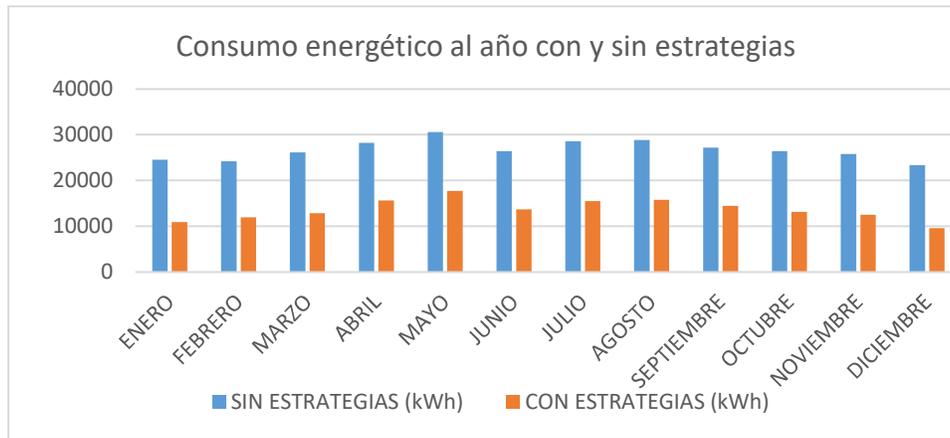


Figura 23. Consumo energético anual (kWh) con y sin estrategias.

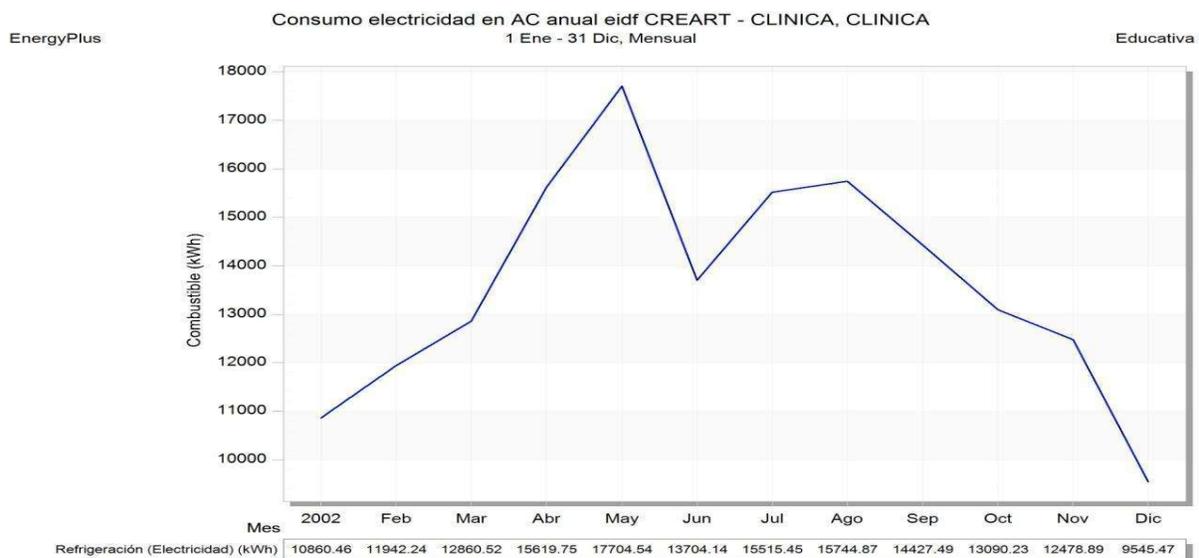


Figura 24. Consumo energético por año (kWh) con estrategias. Fuente: Elaboración en *Design Builder*.

El ahorro obtenido entre la comparación de la simulación de los modelos resultó de 49% entre la clínica con estrategias y sin estrategias, en este caso se consideró el consumo por refrigeración (Tabla 6).

6. Conclusiones

Los resultados de las evaluaciones energéticas que se presentan en este trabajo, permiten concluir que las estrategias de diseño bioclimático, tales como *Louvers* y aislamiento térmico en losa, nos ayudan a reducir las temperaturas internas del edificio de manera significativa. Por ejemplo, en el primer nivel donde se encuentran los consultorios 3 y 4, las temperaturas internas sin estrategias bioclimáticas, con mediciones

del software especializado en simulación térmica *Design Builder*, nos arrojó temperaturas internas de más de 38 °C, mientras que con la estrategia bioclimática de sombreado en ventanas con protección solar (*louver*), esta se redujo a 27 °C, es decir, más de 6 °C por espacio. Cabe recalcar que los espacios mencionados se encuentran en la fachada sur, la más crítica del edificio, lo que nos hace concluir que el uso adecuado de protección solar en ventanas, reduce de manera significativa las temperaturas interiores.

Ahora bien, al hablar de la tercera planta donde se ubica la cafetería (nuestro tercer foco de importancia en cuanto a temperaturas internas), encontramos que este espacio no tiene otro nivel que permita reducir la

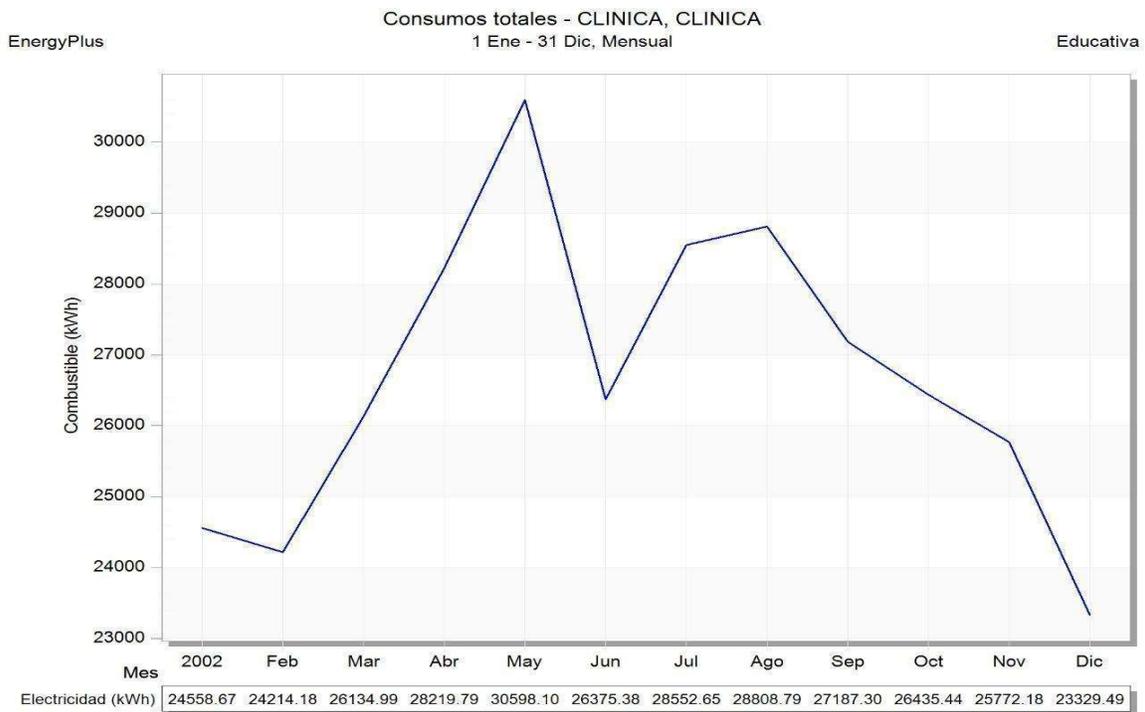


Figura 25. Consumo energético por año (kWh) sin estrategias. Fuente: Elaboración en Design Builder.

incidencia solar, por ello, nos enfocamos en el aislamiento térmico por losa para bajar la temperatura interior, la cual sin el aislamiento térmico alcanzó más de 31 °C y se logró reducir hasta los 28 °C. Cabe recalcar que la cafetería no cuenta con aire acondicionado. Es importante destacar también que al aplicar el aire acondicionado, el equipo retirará menos energía que si no se hubieran aplicado estrategias de enfriamiento o protección solar.

El consumo energético por refrigeración es un punto importante a considerar en esta evaluación, ya que la clínica estudiada tiene más de 14000 kWh al año, un consumo muy elevado, razón por la cual era de suma importancia lograr el ahorro energético, objetivo que resultó ser satisfactorio y prácticamente lo esperado.

De acuerdo a lo observado en la medición experimental, las temperaturas externas son menores a las internas, es decir, tenemos mayor temperatura dentro del edificio que fuera, por ello, es necesario aumentar el enfriamiento convectivo nocturno.

Finalmente, y coincidiendo con otros autores, es necesaria la suma de estrategias para mejorar el comportamiento térmico de una edificación, ya que, aunque no se logre el confort térmico durante todas las horas en el mes crítico, definitivamente sí se lograrían ahorros energéticos que contribuirán a lograr edificaciones más amigables con el medio ambiente, así como térmicamente confortables para las personas que lo habitan.

Se plantea una línea para dar continuidad a este trabajo, incluyendo algunas otras estrategias bioclimáticas, como enfriamiento por tubos subterráneos

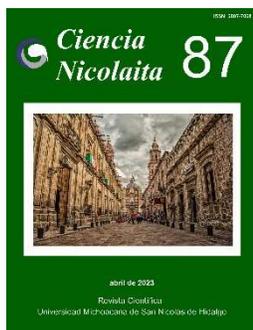
Tabla 6
Consumo energético por refrigeración obtenido de la simulación.

Modelo	Consumo energético por refrigeración Total anual (kWh)	Ahorro en % del consumo energético por refrigeración Total
CLÍNICA SIN ESTRATEGIAS (CLI-SE)	320186.96 kWh	N/A
CLÍNICA CON ESTRATEGIAS (CLI-E)	163494.05 kWh	49%

para lograr mejores temperaturas internas en la clínica.

Referencias

- Becerra, R. and Riquetti, C., 2015, Estudio y análisis de eficiencia energética en los principales sistemas energéticos del Hospital “Vicente Corral Moscoso”: Tesis de Maestría en Energías Renovables, *Ecuador, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/10931>
- Castañeda Ramírez, E.N., 2003, Propuestas para uso eficiente de energía en la red de hospitales públicos del Gran San Salvador: Tesis de Doctorado en Ingenierías, *El Salvador, Universidad de El Salvador*. <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2875>
- Código Técnico de la Edificación (CTE), 2010, Catálogo de elementos constructivos del CTE: *España, CTE, Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción*. https://www.codigotecnico.org/pdf/Programas/CEC/CAT-EC-v06.3_marzo_10.pdf
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), 2014, Manual de un Sistema de Gestión Para la Implementación de la Energía: *México, CONUEE-Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/55467/ManualGestionEnergia_V2_1.pdf
- De Wilde, P., 2017, The concept of building performance in building performance simulation – a critical review: *San Francisco, CA, USA, Proceedings of the International Building Performance Simulation Association*, 1021-1026. <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.270>
- Gómez Azpeitia, G., Bojórquez Morales, G. and Ruiz Torres, R., 2007, El confort térmico: dos enfoques teóricos enfrentados: *Palapa*, 2(1), 45-57. ISSN 1870-7483 (print). <https://www.re-dalyc.org/pdf/948/94820107.pdf>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2001, Guía técnica de eficiencia energética en iluminación. Hospitales y centros de atención primaria: *Madrid, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Comité Español de Iluminación*. https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_5573_GT_iluminacion_hospitales_01_81a4cdee.pdf
- Krstić, D., Vasov, M., Bogdanović, V., Ignjatović, M. and Randelović, D., 2019, Effect of external solar shading usage on energy consumption and thermal comfort in the student dormitory in Niš: *E3S Web of Conferences*, 111. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911103050>
- López Cristlà, M., 2011, Salamanca.
- Nicol, J.F. and Humphreys, M.A., 2002, Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings: *Energy and buildings*, 34(6), 563-572. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)
- SENER-CONUEE-GIZ, 2016, Manual para la implementación de un sistema de gestión de la energía, 2ª ed.: *México, CONUEE-GIZ*.
- World Energy Council, 2010, Eficiencia energética: una receta para el éxito. Resumen ejecutivo: *Londres, Reino Unido, World Energy Council*.
- World Energy Council, 2020, ISSUES MONITOR 2020: Decoding new signals of change: *London, United Kingdom, World Energy Council*.



Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Intensificación de procesos: alternativa sustentable para la producción de biocombustibles para el sector transporte

Intensification process: biofuels production sustainable alternative for transport sector

María de los Ángeles Olán-Acosta,* Juan Barajas-Fernández y Claudia Gutiérrez-Antonio.

Para citar este artículo: Olán-Acosta María de los Ángeles, Barajas-Fernández Juan y Gutiérrez-Antonio Claudia, 2023. Intensificación de procesos: alternativa sustentable para la producción de biocombustibles para el sector transporte. Ciencia Nicolaita no. 87, 197-207. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.675>



Historial del artículo:

Recibido: 7 de junio de 2022

Aceptado: 26 de octubre de 2022

Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: maria.olan@ujat.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Intensificación de procesos: alternativa sustentable para la producción de biocombustibles para el sector transporte

Intensification process: biofuels production sustainable alternative for transport sector

María de los Ángeles Olán-Acosta,^{1*} Juan Barajas-Fernández¹ y Claudia Gutiérrez-Antonio.²

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km 1, 86690, Cunduacán, Tabasco

²Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala, Carretera a Chichimequillas s/n km 1, 76225, El Marqués, Querétaro

Resumen

Los biocombustibles se han identificado como una estrategia que contribuye a la recuperación económica sostenible. Estos se generan a partir de biomasa y permiten generar energía eléctrica, térmica y/o motriz; esta última es de gran relevancia para el sector transporte, en el que se requieren principalmente en fase líquida. En particular, los biocombustibles líquidos para el sector transporte que se han estudiado incluyen biogasolina, biodiésel, diésel verde y bioturbosina. Su producción es factible técnicamente, pero su factibilidad financiera es aún un reto. Por ello, en este trabajo se presentan las rutas de obtención de los biocombustibles líquidos para el sector transporte, así como las estrategias de la intensificación de procesos con mayor potencial de aplicación; en estas se incluyen columnas de destilación térmicamente acopladas, destilación reactiva y extracción reactiva.

Palabras clave: intensificación de procesos, separación reactiva, procesos sustentables, recursos renovables, biocombustibles

Abstract

Biofuels have been identified as a promissory strategy that contributes to sustainable economic recovery. Biofuels are generated from biomass, and allow the generation of electrical, thermal and/or motor energy; the last one is of great relevance for the transport sector, in which liquid biofuels are mainly required. In particular, the liquid biofuels for the transport sector that have been studied include biogasoline, biodiesel, green diesel and biojet fuel. The production of these biofuels is technically feasible, but its financial feasibility is still a challenge. For this reason, this paper presents the processing routes to obtain liquid biofuels for transport sector, as well as the strategies for the intensification of processes with the greatest application potential; these include thermally coupled distillation columns, reactive distillation, as well as reactive extraction.

Keywords: process intensification, reactive separation, sustainable processes, renewable resources, biofuels

1. Introducción

Actualmente, la sociedad enfrenta grandes retos en materia ambiental, energética y de salud. En el aspecto ambiental, el problema del cambio climático ha originado alteraciones en los patrones climatológicos, lo cual afecta a los seres vivos, humanos y no humanos, de los ecosistemas. Respecto a la generación de energía, se ha evidenciado el declive progresivo en la producción de los pozos de extracción de petróleo, recurso no renovable ampliamente usado para producir combustibles y otros productos. Finalmente, en materia de salud, la sociedad enfrenta una pandemia causada por la rápida diseminación del virus SARS-CoV-2; dicha pandemia ha cambiado el mundo tal cual se conocía, debido a las medidas de aislamiento propuestas.

En este contexto, se han dado afectaciones en prácticamente todos los sectores económicos; por lo que ahora se deben enfocar los esfuerzos para la recuperación económica sostenible. Para tal fin, la Agencia Internacional de Energía, en conjunto con el Fondo Monetario Internacional, han propuesto dos escenarios: acelerado y tardío, para la recuperación económica sostenible (IEA, 2020). El escenario acelerado de recuperación considera la inversión en sectores clave relacionados con la energía (Figura 1), en el cual se incluye tanto energía eléctrica de baja huella de carbono como bioenergía, así como otras estrategias de eficiencia energética. Es importante observar que se proponen una serie de políticas en aras de alcanzar dicha recuperación económica, dado que una sola de ellas no es suficiente para satisfacer el total de la demanda energética. Una de estas alternativas está relacionada con la producción y uso de biocombustibles.

Los biocombustibles se generan a partir de la conversión de la biomasa correspondiente al ciclo corto de carbono; esto posibilita que las emisiones que se liberan durante su uso sean equivalentes a las que absorbió la biomasa como parte de su crecimiento, por ello, pueden reducir de manera significativa su huella de carbono, en comparación con los combustibles de origen fósil, siempre y cuando se generen mediante procesos eficientes de producción. Los biocombusti-

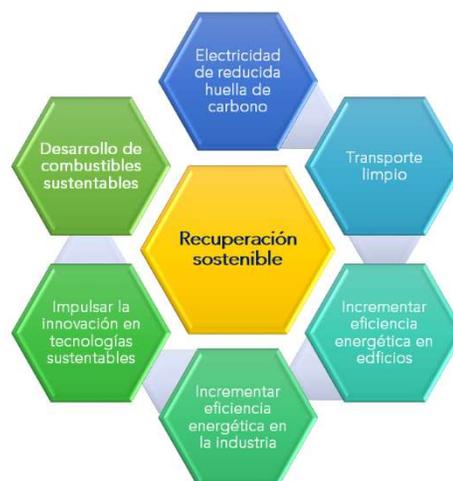


Figura 1. Sectores clave en el escenario de rápida recuperación económica sostenible.

bles pueden obtenerse en estado sólido, líquido y gaseoso, y emplearse para la generación de energía calorífica, eléctrica y/o motriz; esta última es la más relevante en el sector transporte, donde son principalmente utilizados en fase líquida.

Dentro de los que pueden emplearse en el sector transporte se encuentran la biogasolina, el biodiésel, el diésel verde y la bioturbosina, los cuales pueden generarse a partir de biomasa mediante diferentes rutas de procesamiento, es decir, desde el punto de vista técnico su producción es factible; sin embargo, el reto más importante es producirlo con viabilidad financiera. En este contexto, la intensificación de procesos es una estrategia que posibilita disminuir de manera significativa, tanto el consumo de energía como el tamaño de las plantas de producción; esto conlleva menores costos tanto de capital como de operación, por lo que, la aplicación de estrategias de intensificación de procesos en la producción de biocombustibles, permitiría reducir su impacto ambiental y su costo de producción.

En este sentido, en el presente artículo se mostrarán las estrategias de intensificación de procesos como una alternativa para reducir los costos de producción y el impacto ambiental asociado de los biocombustibles del sector transporte. El artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección dos se incluye información relacionada con la definición y procesos de producción; en la sección tres se define la intensificación de procesos y se describirán las estrategias con mayor potencial de aplicación

en la producción de los biocombustibles para el sector transporte; finalmente, se discutirán las perspectivas en torno a los avances y áreas de oportunidad en el uso de estrategias de intensificación para su producción.

2. Biocombustibles para el sector transporte

En el sector transporte se emplean combustibles para el tránsito terrestre (gasolina, diésel), marítimo (diésel) y aéreo (turbosina), tanto de personas como de mercancías; estos combustibles, que se utilizan actualmente, se derivan del petróleo. Gracias al avance de la ciencia y la tecnología, se han desarrollado procesos para producir biocombustibles; algunos de ellos pueden usarse en mezclas, mientras que otros pueden reemplazar totalmente a dichos combustibles fósiles. Estos se generan a partir de la biomasa, la cual se encuentra prácticamente en todos los rincones del planeta; no obstante, no es factible considerar que todos podrán generarse a partir de una sola materia prima. Por ello, es importante el estudio de nuevas materias primas disponibles localmente para así contar con procesos de producción donde los biocombustibles sean requeridos. En este contexto, la Tabla 1 concentra información relacionada con la composición, materias primas, máximo porcentaje al que pueden ser usados en motores, así como el poder calorífico, tanto de los combustibles de origen fósil como de los biocombustibles. En la Tabla 1 se puede observar que la biogasolina, el diésel verde y la bioturbosina poseen la misma composición química que la gasolina,

diésel y turbosina, respectivamente. Todos estos combustibles son hidrocarburos, sin importar si provienen del petróleo o de la biomasa. En contraparte, el biodiésel no está compuesto de hidrocarburos, sino de ésteres metílicos, es decir, su composición difiere significativamente respecto de la composición del diésel de origen fósil. Por eso, este último biocombustible solo puede utilizarse en mezclas con su contraparte fósil.

Una propiedad importante en los combustibles es el poder calorífico, el cual se define como la energía contenida por cada unidad de masa. De la Tabla 1 puede observarse que el poder calorífico de la biogasolina, diésel verde y bioturbosina, es igual o superior al de sus contrapartes fósiles. De hecho, la biogasolina y la gasolina deben cumplir el mismo estándar (ASTM D4814), al igual que el diésel verde y el diésel (ASTM 975). En el caso de la turbosina, esta debe cumplir con el estándar ASTM D1655, mientras que la bioturbosina debe certificarse mediante el estándar ASTM D7566; sin embargo, al mezclar la bioturbosina con la turbosina se debe cumplir con el estándar ASTM D1655 que corresponde al de la turbosina. Para el caso del biodiésel, este debe cumplir el estándar ASTM D6751. Como puede observarse, la biogasolina, el diésel verde y la bioturbosina son equivalentes en composición y propiedades a sus contrapartes fósiles, por lo cual se les conoce como combustibles equivalentes (drop-in biofuels).

Un aspecto de gran relevancia es el volumen máximo en el cual pueden ser usados los biocombustibles en motores que funcionen con gasolina, diésel o bien

Tabla 1
Principales características de los combustibles fósiles y los biocombustibles
(Límite establecido en las normas correspondientes).

Combustible	Gasolina	Biogasolina	Diésel	Diésel verde	Biodiésel	Turbosina	Bioturbosina
Composición	Hidrocarburos (C4-C11)		Hidrocarburos (C17-C28)		Ésteres metílicos	Hidrocarburos (C8-C16)	
Materias primas	Petróleo	Biomasa	Petróleo	Biomasa	Biomasa	Petróleo	Biomasa
Poder calorífico (MJ/kg)	46.0	46.0	42.7	44	38	43.8	>44.0
Temperatura de congelación (°C)	-107	-107	-34	-34	-5	-47	-57
Norma técnica	ASTM D4814	ASTM D4814	ASTM D975	ASTM D975	ASTM D6751	ASTM D1655	ASTM D7566
Uso en motores	100%	100%	100%	100%	20% máximo	100%	50% máximo



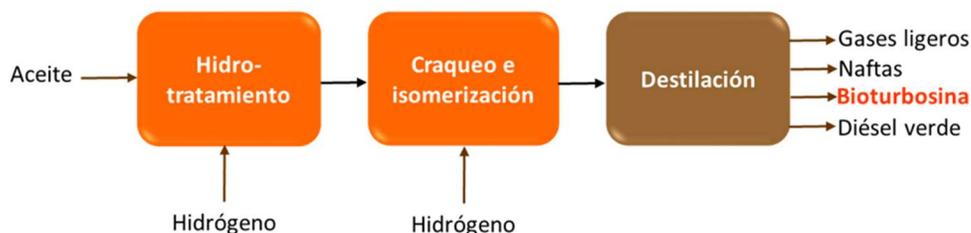
Proceso de producción de biodiésel



Proceso de producción de biogasolina



Proceso de producción de bioturbosina



Proceso de producción de diésel verde

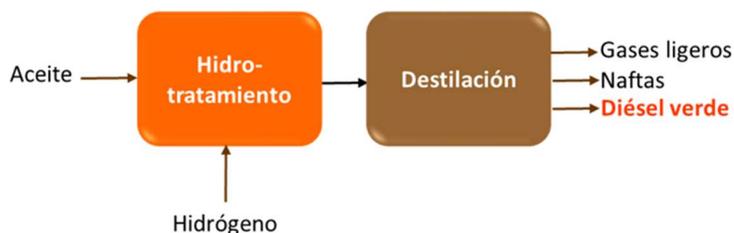


Figura 2. Procesos de producción de biocombustibles.

turbosina. Como se observa en la Tabla 1, la biogasolina puede ser usada al 100% en motores que funcionen con gasolina fósil, de acuerdo a lo establecido en el estándar; una situación similar se observa con el diésel verde. En el caso de la bioturbosina, esta puede ser usada máximo en mezclas al 50% en volumen con la turbosina; lo anterior se debe a la cantidad de compuestos aromáticos que contiene la bioturbosina, que varían en función de la materia prima y el proceso de producción empleado para obtenerla. Dado que la norma establece un mínimo valor para el contenido

de dichos compuestos, el máximo volumen que puede ser empleado depende de la cantidad de estos compuestos contenidos en la bioturbosina. En el caso del biodiésel, debido a su diferencia en composición, la norma establece su uso máximo en mezclas al 20%. Adicionalmente, es importante mencionar que tanto la biogasolina como el diésel verde, también pueden emplearse en pequeñas plantas generadoras de energía eléctrica y/o térmica. Ahora bien, la Figura 2 muestra los principales procesos de producción de los biocombustibles antes mencionados.

En la Figura 2 se observa que los aceites se pueden transformar en biodiésel, biogasolina, diésel verde y bioturbosina. En el caso del biodiésel, el aceite es transformado mediante una reacción de transesterificación junto con alcohol y un catalizador; posteriormente, se llevan a cabo operaciones de separación, entre las que se incluyen destilación y decantación para obtener con alta pureza biodiésel y glicerina, y separar el agua y recuperar el alcohol que se alimenta en exceso. Por otra parte, la conversión de aceites mediante el hidrotreamiento permite eliminar el oxígeno presente, lo cual posibilita la producción de biogasolina, diésel verde y bioturbosina. En todos los casos, la purificación de dichos combustibles se lleva a cabo mediante destilación. En general, los procesos de producción implican reacciones químicas y el uso de columnas de destilación; estas operaciones pueden intensificarse mediante algunas estrategias, las cuales se describen en la siguiente sección.

3. Intensificación de procesos

La intensificación de procesos es una de las tendencias en ingeniería de procesos que se ha impulsado gracias a los avances tecnológicos. La intensificación de procesos implica la modificación de procesos productivos con la finalidad de que estos sean más compactos, con mejores rendimientos y costos reducidos. Un ejemplo de la intensificación de procesos se puede observar en los teléfonos celulares, los cuales, inicialmente, eran más grandes (dimensiones 33 cm x 4.5 cm x 8.9 cm) que los actualmente disponibles (dimensiones 14.9 cm x 7.2 cm x 0.8 cm). Los teléfonos celulares no solo han reducido su tamaño, sino que también han disminuido su peso y tiempo de carga, a la vez que han aumentado tanto su tiempo de autonomía como sus funciones, por lo que ahora son más cómodos, prácticos, eficientes y rápidos; lo anterior fue producto de la mejora en la fabricación de piezas más delgadas y de gran capacidad. Un fenómeno similar ocurre con los equipos de procesos en una planta industrial; la mejora en los procesos se puede realizar mediante la reducción del tamaño de las unidades de proceso (equipos disruptivos), o bien en el número de equipos asociados al combinar diferentes unidades en una sola (operaciones integradas o híbridas). De esta manera, la intensificación posibilita emplear equipos

más compactos y eficientes que conduzcan a un mayor rendimiento global, con mayor eficiencia y seguridad.

En particular, dentro de las operaciones integradas o híbridas, se encuentran aquellas donde en el mismo equipo se realizan al menos dos operaciones unitarias diferentes. Dentro de ellas se incluyen las separaciones híbridas (combinación de diferentes operaciones de separación) y las separaciones reactivas (combinación de reacción con operaciones de separación) (Figura 3); en particular, los procesos de separación reactiva simplifican considerablemente el proceso de producción, reducen los costos de capital y aumentan la seguridad del proceso.

Entre los procesos con mayor factibilidad de aplicación en la producción de los biocombustibles líquidos se encuentran la destilación térmicamente acoplada, la destilación reactiva y la extracción reactiva. Este tipo de procesos constituyen el enfoque principal de este trabajo; a continuación, se brinda información sobre ellos.

3.1 Destilación térmicamente acoplada

La destilación es un proceso de separación física de una mezcla líquida homogénea formada por compuestos con diferentes temperaturas de ebullición. Esta operación se lleva a cabo en columnas que pueden tener diferentes configuraciones, considerando el número y localización de corrientes de alimentación y de productos, así como el tipo de elementos estructurales internos. Así, las columnas de destilación se pueden clasificar en convencionales (una corriente de alimentación y dos corrientes de productos) y complejas (múltiples corrientes de alimentación y de productos). Dentro de la segunda categoría se encuentran las columnas de destilación térmicamente acopladas, las cuales presentan una mayor eficiencia termodinámica, logrando minimizar el consumo de energía. Entre las configuraciones complejas se encuentran la secuencia térmicamente acoplada directa, secuencia térmicamente acoplada indirecta, secuencia Petlyuk y columna de destilación con pared divisoria (Figura 4).

Las columnas de destilación térmicamente acopladas consumen entre 30 y 50% menos energía que las columnas de destilación convencionales. Entre estas configuraciones, la columna de destilación con pared divisoria se ha implementado a escala industrial, ya

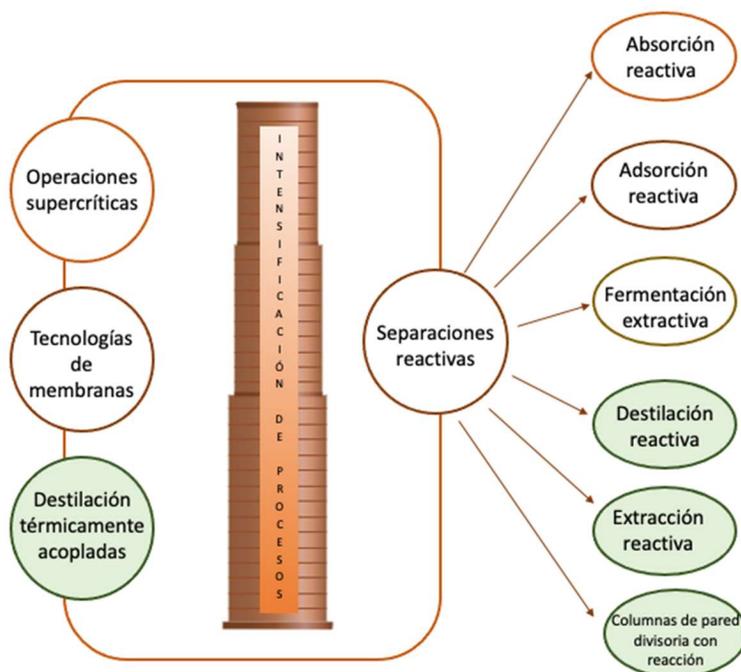


Figura 3. Diversas aplicaciones y tecnologías desarrolladas en la intensificación de procesos.

que permite disminuir de manera significativa el consumo de energía, requerimientos de espacio y costos asociados con tubería y bombeo. A su vez, este tipo de columnas intensificadas pueden acoplarse con sistemas reactivos (Figura 4). Las columnas de destilación reactiva con pared divisoria son equipos altamente integrados, los cuales pueden realizar simultáneamente la reacción y separación de mezclas multicomponentes.

En la producción de combustibles líquidos, las columnas de destilación térmicamente acopladas se han empleado para la purificación de bioetanol (Kiss y Suszwalak, 2012; Hernández-Hernández *et al.*, 2022), biobutanol (Errico *et al.*, 2016; Segovia-Hernández *et al.*, 2020), al igual que naftas, bioturbosina y diésel verde (Gutiérrez-Antonio *et al.*, 2015; Gutiérrez-Antonio *et al.*, 2021). Los resultados de estos estudios muestran que es posible reducir entre 20% y 30% de los requerimientos energéticos para la purificación de estos biocombustibles, con respecto a las secuencias de destilación convencionales. Un aspecto importante es que la reducción del consumo de energía disminuye las emisiones de dióxido de carbono asociadas, sin que ello implique problemas de controlabilidad en los esquemas intensificados (Acosta-Solórzano *et al.*, 2016).

Por otra parte, la destilación reactiva térmicamente acoplada se ha empleado principalmente en la producción de biodiésel, mediante la catálisis homogénea (Miranda-Galindo *et al.*, 2010). En particular, Cossio-Vargas *et al.* (2011) reportan que la secuencia de destilación acoplada térmicamente es factible para llevar a cabo la reacción y la separación del biodiésel. De igual manera, Nguyen y Demirel (2011) señalan que el uso de equipos intensificados de destilación reactiva disminuye las pérdidas de energía y de exergía, lo que contribuye a un ahorro energético.

3.2 Destilación reactiva

La destilación reactiva es la operación más utilizada en el campo de la intensificación de procesos. En la destilación reactiva, en una sección de la columna se lleva a cabo la reacción química, y en el resto de la misma la separación de los componentes de la mezcla. Cabe mencionar que la continua remoción de los productos de la reacción afecta el equilibrio químico, por lo que el sistema, en aras de compensar, incrementa la generación de dichos productos. Por ello, usualmente la conversión y rendimientos son mayores al emplear la destilación reactiva, en comparación con la realización de las operaciones de forma independiente. Otras ventajas de la destilación reactiva incluyen la reducción de la cantidad de catalizador para el

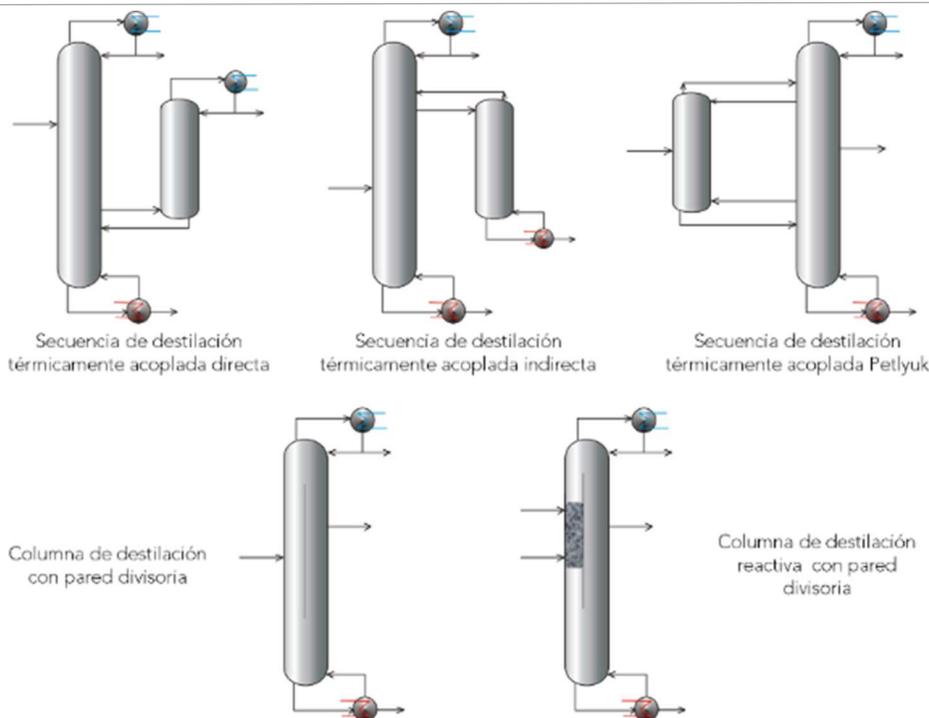


Figura 4. Secuencias de destilación térmicamente acopladas.

mismo grado de conversión, menor tiempo de residencia y mayor selectividad. Por otra parte, la destilación reactiva no solo reduce el número de equipos y de conexiones entre equipos, sino también las emisiones de gases de efecto invernadero dado que requiere menos cantidad de energía. En general, la destilación reactiva requiere menos medidas de seguridad, por lo que esta ha conseguido una rápida aceptación en su aplicación industrial.

Para la producción de biodiésel y diésel verde existe una gran variedad de trabajos, tanto experimentales como de simulación, que incluyen análisis, diseño y optimización de estos procesos. La destilación reactiva se ha aplicado en la producción de biodiésel considerando reacciones de transesterificación y esterificación tanto homogéneas como heterogéneas; en estos procesos se han empleado diversos tipos de materia prima, catalizadores y condiciones de operación (relación molar alcohol: grasa/aceite, temperatura de reacción y cantidad de catalizador). En la destilación reactiva se lleva a cabo simultáneamente la reacción de transesterificación y evaporación, condensación y recuperación del solvente que se encuentra en la corriente de producto. Una de las investigaciones que combina la simulación con la experimentación es la producción de biodiésel por dos rutas: etílica y metílica. En el estudio experimental se determinó

que la producción del biodiésel mediante destilación reactiva es tres veces más rápida respecto de los reactores discontinuos convencionales; además, en la destilación reactiva se tiene una conversión cercana al 97% y una disminución en energía para las dos rutas (Silva *et al.*, 2019).

En cuanto a la producción del diésel verde, la destilación reactiva se aplica a escala comercial en la Refinería Preem (Göteborg, Suecia), donde se utiliza la tecnología de coprocesamiento Hidroflex^{MR}. En el área de investigación, se ha reportado una columna de destilación reactiva para el hidrotreamiento de aceites vegetales y la hidrosulfuración de reacciones petróleo-diésel; los resultados muestran que el proceso es más eficiente en el uso de la energía y con un mayor rendimiento (Pérez-Cisneros *et al.*, 2017). Por otra parte, la producción de bioturbosina, diésel verde y biogasolina se realizó mediante el acoplamiento del reactor de hidrocrackeo e hidroisomerización en la primera columna de destilación del tren de purificación (Gutiérrez-Antonio *et al.*, 2018). Los resultados muestran que es posible producir los biocombustibles antes listados con mayor conversión y selectividad, así como con menores condiciones de operación respecto al proceso convencional.

Cabe mencionar que la destilación reactiva presenta algunas limitaciones, las cuales impiden que

pueda emplearse con buenos resultados en todos los procesos de producción de biocombustibles. La temperatura de reacción está limitada por la temperatura de separación, mientras que la velocidad de reacción debe ser rápida en la fase líquida, por el bajo tiempo de residencia, y las volatilidades relativas deben ser apropiadas para las condiciones de operación.

3.3 Extracción reactiva

La extracción reactiva es un proceso que integra funcionalmente la reacción y la separación de dos fases líquidas en la misma unidad. La separación de fases se puede realizar añadiendo un solvente, o bien utilizar uno de los reactivos en exceso como solvente. El equilibrio líquido-líquido se utiliza en acción conjunta con la reacción, obteniéndose una separación eficiente.

Las diversas aplicaciones de la extracción reactiva han mostrado que para sistemas con múltiples reacciones se tiene un aumento en el rendimiento y la selectividad; además, se reducen los flujos de reciclaje, la formación de residuos y facilita la purificación de productos que son difíciles de separar mediante tecnologías convencionales. La extracción reactiva se caracteriza por la baja concentración en subproductos, bajo costo de capital, fácil control de temperatura, bajo tiempo de residencia y alta conversión. Asimismo, en algunos sistemas, la aplicación de la extracción reactiva permite eliminar todas las operaciones convencionales relacionadas con el uso del catalizador, tales como su neutralización y separación, así como la eliminación de residuos.

Por la naturaleza de las reacciones, la extracción reactiva se ha empleado en la obtención de biodiésel mediante la transesterificación alcalina de oleato de metilo (trioleína), componente principal del aceite, y metanol, alcohol de cadena corta. En la configuración de la extracción reactiva se tienen dos zonas: una reactiva y otra de extracción líquido-líquido (Jurado *et al.*, 2013). Los reactivos se alimentan en contracorriente, mejorando así la separación y la formación de productos (glicerina y oleato de metilo). Parte del glicerol obtenido en la sección reactiva se utiliza como agente separador en la sección extractiva. En este proceso se puede lograr una conversión notablemente alta sin un exceso de metanol, lográndose así el ahorro de materias primas respecto de otros procesos

convencionales. El glicerol y el biodiésel (99.8 % FAME) se obtienen con alta pureza.

A pesar de que el diésel verde tiene aplicaciones industriales (Neste Oil en Europa, y UOP Honeywell en América) mediante el uso de procesos de hidrotratamiento e isomerización en equipos convencionales, la extracción reactiva no se ha utilizado. Para la implementación de la extracción reactiva hay algunos factores que deben tenerse en cuenta, por ejemplo, el catalizador juega un papel importante en el proceso reactivo y es un punto clave para optimizar el proceso. De igual manera, la simulación del proceso tiene un rol importante, ya que requiere del uso de modelos cinéticos que describan apropiadamente las reacciones químicas del hidrocraqueo, hidroisomerización e hidroxigenación; también se requieren diagramas termodinámicos que permitan visualizar la formación de fases en la misma región de operación de las reacciones químicas, por lo que no es una tarea fácil.

Mederos-Nieto *et al.* (2021) presentan una metodología para la obtención del diésel verde mediante extracción reactiva, la cual puede ser aplicada a diferentes tipos de materias primas (aceites vegetales, grasas animales, ésteres metílicos de ácidos grasos o incluso ácidos grasos libres) con diferentes esquemas de reacción y modelos cinéticos. Por ello, esta metodología permitirá generar datos útiles en la determinación de las condiciones óptimas de operación y en el desarrollo de procesos para la producción comercial de combustibles líquidos renovables mediante extracción reactiva.

4. Perspectivas

Como ya se ha mencionado, los biocombustibles que pueden emplearse en el sector transporte incluyen la biogasolina, el biodiésel, el diésel verde y la bioturbosina. Los procesos de producción son factibles desde el punto de vista técnico; sin embargo, uno de los principales retos es lograr su factibilidad financiera. En este contexto, la intensificación de procesos es una herramienta de gran potencial que posibilita disminuir los costos de operación, el impacto ambiental y el tamaño de la planta de producción. Existe un amplio catálogo de equipos intensificados que pueden emplearse en los procesos de producción; en par-

particular, para la producción de biocombustibles destacan las secuencias de destilación térmicamente acopladas, la destilación reactiva (convencional y térmicamente acoplada) y la extracción reactiva.

En el caso del biodiésel se ha propuesto y evaluado el uso de destilación reactiva, tanto en secuencias convencionales como térmicamente acopladas. De igual manera, se ha propuesto y evaluado el uso de extracción reactiva. Para este biocombustible, las condiciones nobles de procesamiento (1 atm, 60-80 °C) han permitido la aplicación de diversas tecnologías intensificadas para su obtención. En todos los casos estudiados, se ha reportado no solo la factibilidad técnica, sino también un reducido consumo de energía y, por ende, un menor impacto ambiental. En este caso, un área de oportunidad representa el uso de sonotrodo o la aplicación de campos eléctricos y/o magnéticos. Con base en resultados reportados en otros estudios, puede esperarse que el empleo de estas estrategias reduzca los tiempos de residencia y evite el uso de un reactivo en exceso.

Por otra parte, la obtención de biogasolina, diésel verde y bioturbosina se lleva a cabo mediante procesos de hidrotreamiento. Estos procesos se realizan a altas condiciones de operación (250-500 °C, 30-80 atm) utilizando altos flujos de hidrógeno (450-1500 ml H₂ NPT/ml aceite) con catalizadores metálicos soportados en zeolitas. Debido a ello, las alternativas de intensificación que han sido estudiadas incluyen el uso de columnas de destilación térmicamente acopladas en la zona de purificación de los biocombustibles. Los estudios muestran que es posible reducir hasta en un 30% el consumo de energía asociado a la purificación, con lo que también se disminuye su impacto ambiental.

Otra estrategia que se ha usado con éxito es la destilación reactiva, considerando columnas convencionales. Es importante mencionar que se ha reportado el acoplamiento de la reacción de hidrodeoxigenación con la destilación y el acoplamiento de las reacciones de hidrocrackeo e hidroisomerización con la destilación; sin embargo, aún no se ha reportado la destilación reactiva considerando el hidrotreamiento de un solo paso, es decir, llevando a cabo las reacciones de hidrodeoxigenación, hidrocrackeo e hidroisomerización acopladas en una columna de destilación. Cabe añadir que tampoco se ha explorado el uso de destilación reactiva considerando columnas de destilación térmicamente acopladas.

Respecto a la extracción reactiva, solo se tiene una metodología reportada que, si bien es valiosa, únicamente considera la reacción de hidrodeoxigenación para la producción de diésel verde. No obstante, la implementación de esta operación intensificada para la producción de bioturbosina y biogasolina, representaría un avance muy importante que posibilitaría su factibilidad financiera y la reducción del impacto ambiental.

Otra área de oportunidad es el desarrollo de catalizadores multifuncionales que no requieran hidrógeno para llevar a cabo la remoción del oxígeno y que permitan llevar a cabo las reacciones en condiciones menores de presión y temperatura.

5. Conclusiones

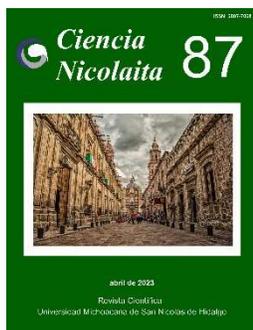
En este trabajo se revisaron las estrategias de intensificación de procesos con mayor potencial para su aplicación en la producción de biodiésel, diésel verde y biogasolina. Las estrategias de intensificación con mayor potencial de uso en la producción de estos biocombustibles incluyen la destilación térmicamente acoplada, la destilación reactiva (tanto convencional como térmicamente acoplada) y la extracción reactiva. En el caso de la producción de biodiésel, todas las operaciones antes mencionadas se han empleado con éxito; sin embargo, aún existen muchas oportunidades de mejora y exploración de nuevas configuraciones intensificadas para la producción de biodiésel. En contraparte, en el caso de la producción de biogasolina, diésel verde y bioturbosina, los estudios son relativamente escasos, aunque los resultados son alentadores. En estos biocombustibles, las condiciones del proceso de obtención dificultan la aplicación de estrategias de intensificación factibles y, justamente por ello, es importante enfocar los esfuerzos de investigación en el desarrollo de metodologías de diseño para su obtención. Así será posible producir los biocombustibles que el sector transporte requiere con factibilidad técnica, económica y ambiental, contribuyendo al desarrollo sostenible de la sociedad.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico brindado por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco a María de los Ángeles Olán Acosta para la realización de su estancia de investigación en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Referencias

- Acosta-Solórzano, A.D.A., Guerrero-Farfán, O., Ramírez-Márquez, C., Gómez-Castro, F.I., Segovia-Hernández, J.G., Hernández, S. and Gutiérrez-Antonio, C., 2016, Controllability analysis of distillation sequences for the separation of biojet fuel and Green diesel fractions: *Chemical Engineering & Technology*, 39(12), 2273-2283. <https://doi.org/10.1002/ceat.201600095>
- Cossío-Vargas, E., Hernández, S., Segovia-Hernández, J.G. and Cano-Rodríguez, M.I., 2011, Simulation study of the production of biodiesel using feedstock mixtures of fatty acids in complex reactive distillation columns: *Energy*, 36(11), 6289-6297. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.10.005>
- Errico, M., Sánchez-Ramírez, E., Quiroz-Ramírez, J.J., Segovia-Hernández, J.G. and Rong, B.-G., 2016, Synthesis and design of new hybrid configurations for biobutanol purification: *Computers & Chemical Engineering*, 84, 482-492. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.10.009>
- Gutiérrez-Antonio, C., Gómez-Castro, F.I., Hernández S. and Briones-Ramírez, A., 2015, Intensification of a hydrotreating process to produce biojet fuel using thermally coupled distillation: *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 88, 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2014.12.002>
- Gutiérrez-Antonio, C., Soria-Ornelas, M.L., Gómez-Castro, F.I. and Hernández, S., 2018, Intensification of the hydrotreating process to produce renewable aviation fuel through reactive distillation: *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 124, 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2017.12.009>
- Gutiérrez-Antonio, C., Romero-Izquierdo, A.G., Gómez-Castro, F.I. and Hernández, S., 2021, Production processes for renewable aviation fuel. Present technologies and future trends: *Amsterdam, Elsevier*. ISBN 978-0-12-819719-6.
- Hernández-Hernández, E.J., Cabrera-Ruiz, J., Hernández-Escoto, H., Gutiérrez-Antonio, C. and Hernández, S., 2022, Simulation study of the production of high purity ethanol using extractive distillation. Revisiting the use of inorganic salts: *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 170, 108670. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2021.108670>
- IEA, International Energy Agency, 2020, "Sustainable Recovery - World Energy Outlook Report". <https://www.iea.org/reports/sustainable-recovery> [consultado el 15 de septiembre de 2021].
- Jurado, M.G., Plesu, V., Ruiz, J.B., Ruiz, A.B., Tuluc, A. and Llacuna, J.L., 2013, Simulation of a hybrid reactive extraction unit. Biodiesel synthesis: *Chemical Engineering Transactions*, 35, 205-210. <https://doi.org/10.3303/CET1335034>
- Kiss, A.A., Suszwalak, D. J.-P.C., 2012, Enhanced bioethanol dehydration by extractive and azeotropic distillation in dividing-wall columns: *Separation and Purification Technology*, 86, 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.10.022>
- Mederos-Nieto, F.S., Santoyo-López, A.O., Hernández-Altamirano, R., Mena-Cervantes, V.Y., Trejo-Zárraga, F., Centeno-Nolasco, G. and Ramírez-Jiménez, E., 2021, Renewable fuels production from the hydrotreating over NiMo/γ-Al₂O₃ catalyst of castor oil methyl esters obtained by reactive extraction: *Fuel*, 285, 119168. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119168>
- Miranda-Galindo, E.Y., Segovia-Hernández, J.G., Hernández, S., Gutiérrez-Antonio, C. and Briones-Ramírez, A., 2011, Reactive Thermally Coupled Distillation Sequences: Pareto Front: *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(2), 926-938. <https://doi.org/10.1021/ie101290t>
- Nguyen, N. and Demirel, Y., 2011, Using thermally coupled reactive distillation columns in biodiesel production: *Energy*, 36(8), 4838-4847. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.05.020>
- Pérez-Cisneros, E.S., Sales-Cruz, M., Lobo-Oehmichen, R. and Viveros-García, T., 2017, A reactive distillation process for co-hydrotreating of non-edible vegetable oils and petrodiesel blends to produce green diesel fuel: *Computers and Chemical Engineering*, 105, 105-122. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.01.018>
- Segovia-Hernández, J.G., Sánchez-Ramírez, E., Alcocer-García, H., Quiroz-Ramírez, J.J., Udugama, I.A. and Mansouri, S.S., 2020, Analysis of intensified sustainable schemes for biobutanol purification: *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 147, 107737. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2019.107737>
- Silva, R.J., Tschoeke, I.C., Melo, J.C., Silva, J.P., Pacheco, J.G., Silva J.M. and Souza, T.P., 2019, Comparison between experimental and simulated results of biodiesel production by reactive distillation and energetic assessment: *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 36, 351-359. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20190361s20170266>



Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Habitar en un contexto de vulnerabilidad climática, durante una ola de calor en Torreón, Coahuila, México

Living in a context of climate vulnerability, during a heat wave in Turreon, Coahuila, Mexico

Alleck J. González Calderón*, Jaime Andrés Quiroa Herrera y Jorge Villanueva Solís

Para citar este artículo: González Calderón Alleck J., Quiroa Herrera Jaime Andrés y Villanueva Solís Jorge, 2023. Habitar en un contexto de vulnerabilidad climática, durante una ola de calor en Torreón, Coahuila, México. Ciencia Nicolaita no. 87, 208-227. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.700>



Historial del artículo:

Recibido: 19 de diciembre de 2022

Aceptado: 8 de febrero de 2023

Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: alleck.gonzalez@uadec.edu.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Habitar en un contexto de vulnerabilidad climática, durante una ola de calor en Torreón, Coahuila, México

Living in a context of climate vulnerability, during a heat wave in Torreon, Coahuila, Mexico

Alleck J. González Calderón*, Jaime Andrés Quiroa Herrera y Jorge Villanueva Solís

Escuela de Arquitectura, Unidad Torreón, Universidad Autónoma de Coahuila. Carretera Torreón - Matamoros Km. 7.5. Ciudad Universitaria. Torreón, Coahuila

Resumen

Este trabajo sintetiza una investigación exploratoria con el objetivo de conocer la habitabilidad térmica y su relación con la salubridad y las formas de adaptación de viviendas ubicadas al sur de la ciudad de Torreón, en el noreste de México, en un clima con presencia de olas de calor. Para su desarrollo, se empleó un método mixto que incluye datos cuantitativos para el análisis térmico de las viviendas, así como, cualitativos para documentar los impactos a la salud y las formas de adaptación sociales y tecnológicas. Los resultados indican que las temperaturas internas rebasan los rangos de confort térmico saludables, mientras los habitantes expresan dificultades físicas producidas por calor, en tanto que las viviendas no están constructivamente adaptadas sino dependen de sistemas de enfriamiento evaporativo.

Palabras clave: Adaptación, Comportamiento térmico, Habitabilidad térmica, Ola de calor, Salubridad.

Abstract

This work synthesizes exploratory research with the aim of knowing the thermal habitability and its relationship with health and with the shapes of adaptation of dwelling located south of the city of Torreon, in northeastern Mexico, in a climate with the presence of heat waves. To develop it, a mixed method was used that includes quantitative data for the thermal analysis of the dwellings, and qualitative data to document the impacts on health and the shapes of social and technological adaptation. The results indicate that the internal temperatures exceed the ranges of healthy thermal comfort, while the inhabitants express physical difficulties produced by heat, while the dwellings are not constructively adapted but depend on evaporative cooling systems.

Keywords: Adaptation, Thermal behavior, Thermal habitability, Heat wave, Health.

Introducción

Uno de los mayores retos que enfrenta la humanidad es la mitigación y la adaptación frente al cambio climático. Fenómeno que se ha visto incrementado por intensos procesos de industrialización, que emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero (GEI) que al concentrarse en la atmósfera incrementan el calentamiento global, teniendo como consecuencia alteraciones climáticas con impactos negativos sobre el hábitat.

Si bien, entre los GEI se encuentran el dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄), ozono (O₃), entre otros, el CO₂ es el gas con mayor acumulación en la atmósfera, por ello, se emplea como parámetro e indicador relacionado con incrementos en la temperatura global. Desde la segunda mitad del siglo XX, se predecía que para el año 2000 la concentración de CO₂ llegaría a 380 ppm (Meadows et al., 1972). Sin embargo, dicha concentración ha tenido un rápido aumento, de tal manera que en 2022 alcanzó un máximo de 418 ppm (ESRL, 2022). De continuar la tendencia de aumento de GEI, cada vez serán más recurrentes e intensos los impactos sociales, ecológicos y económicos causados por el cambio climático.

Uno de los efectos más alarmantes del cambio climático son las olas de calor, definidas como un periodo inusualmente cálido, que inicia y termina de forma abrupta, con una duración mínima de tres días. Después de la mega ola de calor que afectó 16 países de Europa en 2003, que tuvo como consecuencia 70000 muertes, quedó en evidencia el riesgo a la salud que puede generar dicho fenómeno. En América Latina y el Caribe, desde 2010 se han registrado 988 muertes causadas por olas de calor (OPS, 2019).

Por su parte, en México durante el periodo 2002 - 2010, murieron 393 personas por calor excesivo, la mayor parte en el noroeste del país, de los cuales 88.5% eran hombres entre 18 y 65 años, y el 62.1% no tenía acceso a servicios de salud (Díaz, Castro y Aranda, 2014). Datos recientes indican el número de defunciones causadas por temperaturas extremas durante la temporada de calor en México: 30 en 2018, 44 en 2019, 37 en 2020 (Gobierno de México, 2021). En tres años se registraron 111 defunciones.

Es evidente que las altas temperaturas pueden generar graves impactos sociales entre los grupos más vulnerables como los recién nacidos, niños, mujeres embarazadas, ancianos y personas con enfermedades crónicas. No obstante, la mortalidad en personas pobres es más frecuente en áreas urbanas donde ocurren de manera simultánea los fenómenos de ola de calor y de isla de calor (OPS, 2019). Aunque a menudo se indica que las altas temperaturas exteriores generan impactos negativos en la salud de las personas, también el exceso de calor en espacios interiores y su duración en horas puede afectar la calidad de vida.

Debido a que la vivienda es la edificación donde las personas permanecen por más tiempo, es indispensable contar con un planteamiento formal y constructivo que les permita adaptarse a contextos áridos y semiáridos, caracterizados por climas muy cálidos. Empero, en México de un total de 35.2 millones de viviendas, solo el 6% cuenta con aislamiento térmico para adaptarse a condiciones climáticas de frío o de calor (INEGI, 2020).

Por su parte, en julio de 2018 en Coahuila se registraron 24 días con temperaturas mayores de 40 °C (CONAGUA, 2018 b). En el mismo año, en la ciudad de Torreón se registró una temperatura máxima de 43.2 °C durante el mes de mayo (CONAGUA, 2018 a).

Sin embargo, los registros de temperatura superficial de la vivienda en Torreón están en un rango de 49 °C a 54 °C, superando hasta por más de 10 °C a los de la temperatura externa. En la Figura 1, se indica en color rojo las zonas con temperaturas superficiales más elevadas, que en su mayoría corresponden con viviendas ubicadas al sur y oriente de la ciudad (Villanueva, 2020).

Con base en lo anterior, se puede suponer que algunos sectores de Torreón, con presencia de viviendas sociales y autoconstruidas, pueden experimentar condiciones térmicas adversas y de insalubridad, por exposición a altas temperaturas interiores. De manera simultánea, también podrían existir formas de adaptación sociales y tecnológicas para mitigar los efectos de una ola de calor. Por ello, se plantearon los siguientes objetivos: 1) determinar la habitabilidad térmica de la vivienda; 2) identificar afectaciones a la salud de los habitantes; 3) documentar formas de adaptación, sociales y tecnológicas.

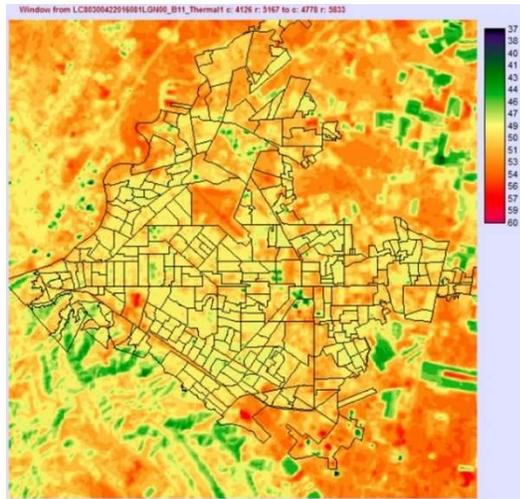


Figura 1: Temperaturas superficiales en Torreón, Coahuila.
Fuente: Villanueva, 2020.

Habitabilidad térmica, salubridad y adaptación

La habitabilidad, en el caso de la vivienda, se entiende como el ambiente óptimo para el desarrollo humano, que tanto en sus dimensiones físico-espacial, sociocultural y socioeconómica, satisface integralmente las necesidades de los habitantes (Mena, 2011). En tanto, la habitabilidad térmica se define como un periodo de tiempo, medido en horas, en que la vivienda presenta condiciones de confort térmico durante el día y la noche, principalmente en las estaciones de invierno y verano (Sarmiento y Hormazábal, 2003).

Estudios pioneros sobre confort térmico sugieren que el humano prefiere permanecer en espacios donde la temperatura se encuentra entre el frío que puede soportar sin estar demasiado incómodo y el calor que puede tolerar sin comprometer su sistema circulatorio y de secreción. Incluso, en trabajos realizados con animales se afirma que algunos eligen permanecer en espacios con temperaturas de 21 °C, en la zona media entre los puntos que exigen un mayor gasto energético de adaptación al ambiente (Olgay, 1998).

Algunos datos señalan que el rango de bienestar térmico se encuentra a los 18 °C como mínimo para invierno, si la humedad relativa es de 70% y de 28 °C como máximo para verano, si la humedad relativa es

de 40% (ASHRAE, 1993). También se indica que las temperaturas entre 21 °C y 26 °C se consideran dentro del rango de confort óptimo (Fuentes, 2002). Mientras, temperaturas entre 18 °C y 30 °C podrían considerarse dentro de un rango de confort aceptable (Auliciems y Szokolay, 2007; Rahman y Kojima, 2018). Para el caso de Torreón, con base en la aplicación del modelo de confort adaptativo de ASHRAE 55-2010, se establece como rango de confort las temperaturas entre un valor mínimo de 19.6 °C y máximo de 29.7 °C (Quiroa, 2022)¹.

Esto quiere decir que las temperaturas en espacios interiores mayores de 30 °C podrían considerarse fuera de rangos de confort térmico aceptables y generar disconfort, estrés térmico y en el peor de los casos problemas de salud y defunciones.

En situaciones de calor intenso y prolongado los lactantes, niños pequeños y ancianos tienen mayor probabilidad de morir o de sufrir hipertermia porque no tienen la capacidad óptima de regular su temperatura corporal (UNICEF, 2015). El calor corporal elevado y la deshidratación leve puede afectar el cerebro y generar confusión o pérdida de conciencia. Una deshidratación aguda puede ocasionar la generación de coágulos que pueden afectar distintos órganos e incrementar el riesgo de accidentes cerebrovasculares (OPS, 2019). El calor excesivo también puede generar alergias cutáneas, diabetes, insomnio, cataratas, estrés térmico, agotamiento, así como, enfermedades renales, infecciosas, respiratorias, cardiovasculares y neurológicas (Rocque et al., 2021).

Un aspecto importante para considerar es la duración de las altas temperaturas, ya que un golpe de calor aparece con frecuencia entre las primeras 24 y 48 horas de una ola de calor, cuando aún no se han puesto en marcha los mecanismos de aclimatación, sobre todo si las temperaturas ambientales superan los 30 °C y la humedad es superior al 60% (Morales et al., 2005).

Durante la grave ola de calor que azotó Europa en el verano de 2003 se evidenció la vulnerabilidad de la población ante este tipo de eventos climáticos. En Francia se cuantificaron 14802 decesos entre el 4 y el 13 de agosto del mismo año, cuando veintisiete estaciones climáticas registraron temperaturas máximas

¹ El rango de confort adaptativo para el caso de Torreón se calculó en el marco del proyecto de investigación PRODEP-

UACOA-CA-141. Documentado en el segundo capítulo del informe técnico del proyecto realizado por los autores.

superiores a 35 °C y temperaturas mínimas superiores a 20 °C (Díaz y Linares, 2005). Al analizar dicho fenómeno, se dedujo que a partir de 34 °C de temperatura máxima diaria comienza a aumentar la mortalidad por ola de calor de forma estadísticamente significativa (Linares et al., 2017).

Por ello, es indispensable mejorar las condiciones de habitabilidad de la vivienda para prevenir enfermedades y mejorar la calidad de vida, así como, ayudar a mitigar el cambio climático y contribuir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con la salud y las ciudades sostenibles (OMS, 2018).

No obstante, de manera histórica la humanidad ha sabido adaptarse social y tecnológicamente a climas adversos como los áridos para configurar su hábitat, dotándolo de condiciones de habitabilidad. Entre las formas de adaptación sociales, algunas se relacionan con la alimentación y la vestimenta, entre otras costumbres, que pueden ser estrategias individuales o colectivas. También existen ejemplos de adaptación tecnológica en climas áridos donde es tradicional el uso de la tierra para edificar, ya que de manera empírica y científica se sabe que dicho material tiene un bajo coeficiente de conductividad térmica, es decir, su uso reduce los efectos de la radiación solar hacia los espacios interiores.

En la actualidad, existen normas y recomendaciones para la adaptación de viviendas en climas cálidos. Algunas indican que la envolvente, conformada por techos y muros, sean de materiales que permitan retrasar la entrada de calor, implementando componentes y materiales de baja conductividad térmica.

La conductividad térmica de muros de tierra, con bloques de adobe, es menor que la de muros de concreto y de ladrillo. La resistencia térmica de un muro de adobe de 30 cm de espesor es de 0.65 m² K/W, mientras, para un muro de concreto del mismo espesor la resistencia es de 0.18 m² K/W. Si se pretendiera tener una resistencia similar a la del muro de adobe, sería necesario trabajar con un muro de concreto con un espesor aproximado a 106 cm, es decir, casi tres veces más espesor (Cuitiño, Esteves, Maldonado y Rondaro, 2015).

En algunos experimentos se destacan el uso de tierra como material de construcción en climas semiáridos. La incorporación de muros de adobe y techos con entramados de madera-tierra, tienen mejor adapta-

ción a las condiciones climáticas cálidas ya que la temperatura interior puede tener una diferencia de hasta 5 °C menos que la temperatura registrada en sistemas constructivos de concreto (Quiroa, Villanueva, González y Retana, 2020).

Debido a que las olas de calor generadas por el cambio climático son un fenómeno que será cada vez más frecuente e intenso, en distintas partes del mundo, es urgente conocer cuáles son los impactos negativos en la salud de las personas, así como, analizar las distintas formas de adaptación tecnológicas, tradicionales y contemporáneas. Dado que la mitigación del cambio climático es algo que se plantea a largo plazo, es necesario desarrollar estrategias de adaptación a corto y mediano plazo, de tal manera que las viviendas urbanas y rurales ofrezcan condiciones de habitabilidad térmica y salubridad, y con ello reducir la vulnerabilidad climática relacionada con altas temperaturas.

Metodología

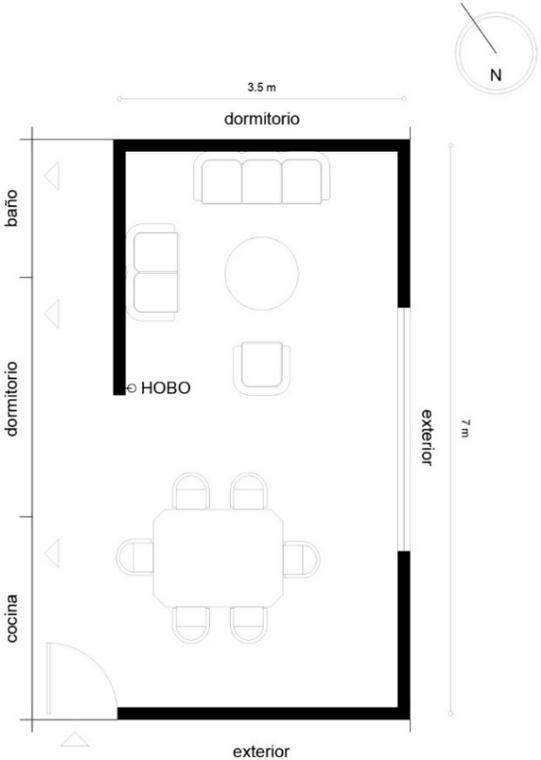
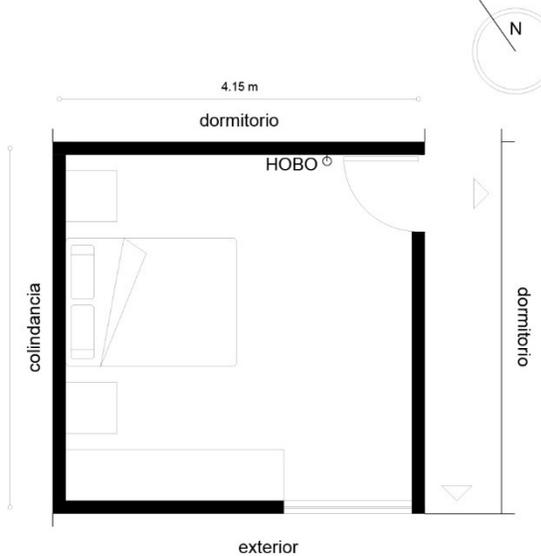
El trabajo se desarrolló con base en un método mixto que tiene como objetivo conocer las condiciones de habitabilidad térmica y su relación con la salubridad y con las formas de adaptación de viviendas ubicadas al sur de la ciudad de Torreón, en un contexto climático semiárido, con presencia de olas de calor. La justificación de los métodos mixtos es dar explicación de un fenómeno cuando un solo enfoque teórico-metodológico no alcanza para resolver un problema de investigación. Por ejemplo, cuando se intenta resolver un objetivo cualitativo dentro de un estudio primariamente cuantitativo, o viceversa, cuando se pretende desarrollar un estudio cualitativo con introducción de elementos cuantitativos (Guerrero, Do Prado y Ojeda, 2016).

En primera instancia, se seleccionaron ocho viviendas ubicadas al sur de Torreón, zona caracterizada por altas temperaturas superficiales, entre un rango de 49 °C a 54 °C (Villanueva, 2020). La elección de los casos se realizó con base en la cooperación de alumnos de la Escuela de Arquitectura, Unidad Torreón, de la Universidad Autónoma de Coahuila quienes aportaron datos de sus viviendas y familias. En la Figura 2, se observa la ubicación de las viviendas en la ciudad y una perspectiva del contexto urbano en un clima semiárido. En la Tabla 1, se describen las características espaciales y constructivas de las ocho viviendas analizadas.

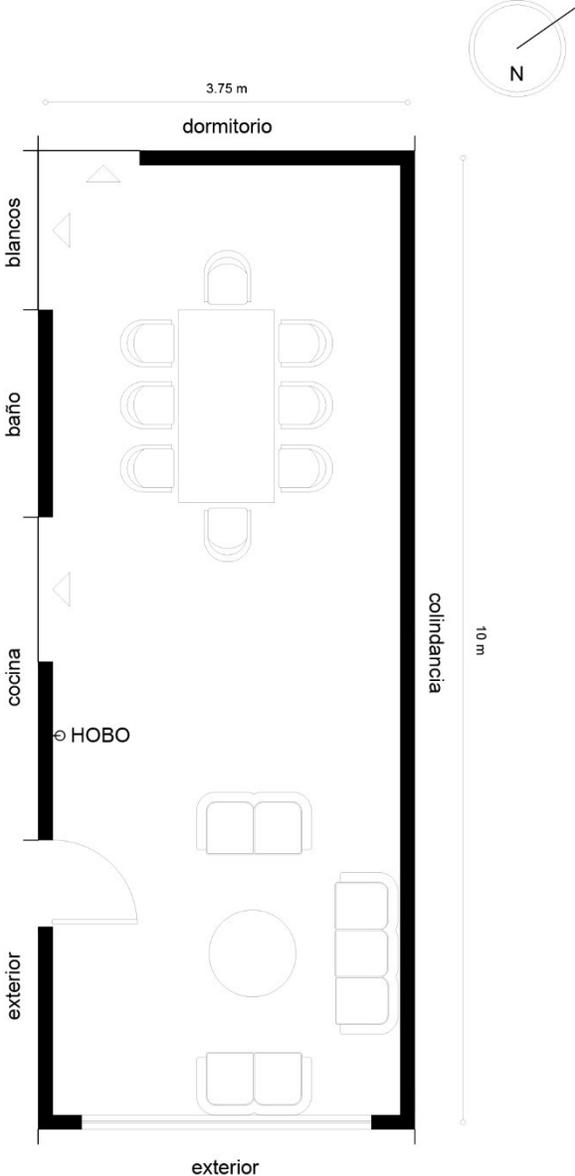


Figura 2: Ubicación de las viviendas analizadas y panorámica de la ciudad de Torreón, Coahuila, México.
Fuente: De los autores, con base en Google Maps.

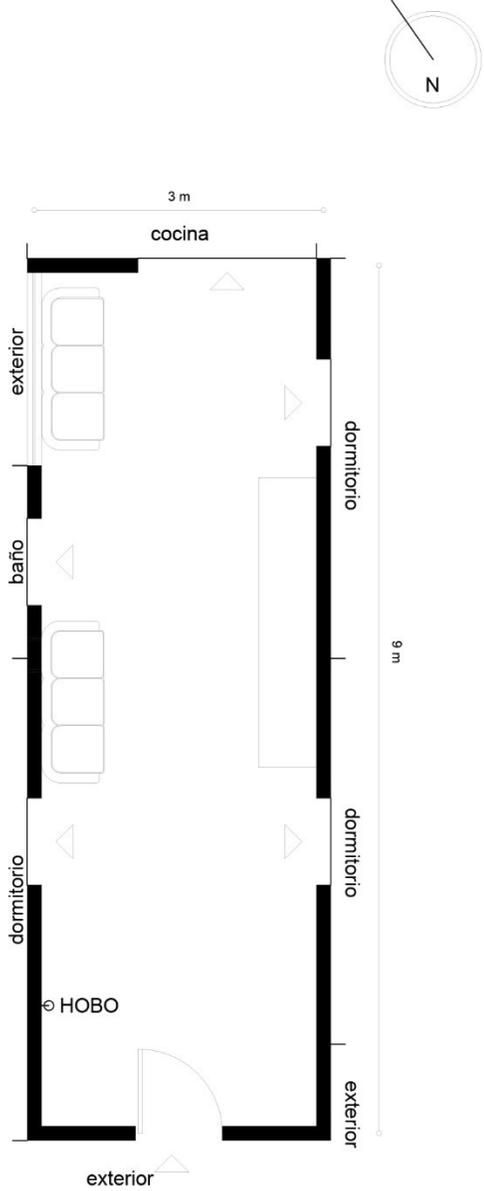
Tabla 1
 Características espaciales y constructivas de las ocho viviendas analizadas. Fuente: De los autores.

Vivienda	Características constructivas	Características espaciales
1	<p>De un nivel con 3 m de altura y techo plano. Muros de block hueco de concreto y losa maciza de concreto armado.</p> 	
2	<p>De un nivel con 3 m de altura y techo plano. Muros de block hueco de concreto y losa maciza de concreto armado.</p> <p>Nota: por sugerencia del habitante, en este caso el sensor se colocó dentro de una habitación.</p> 	

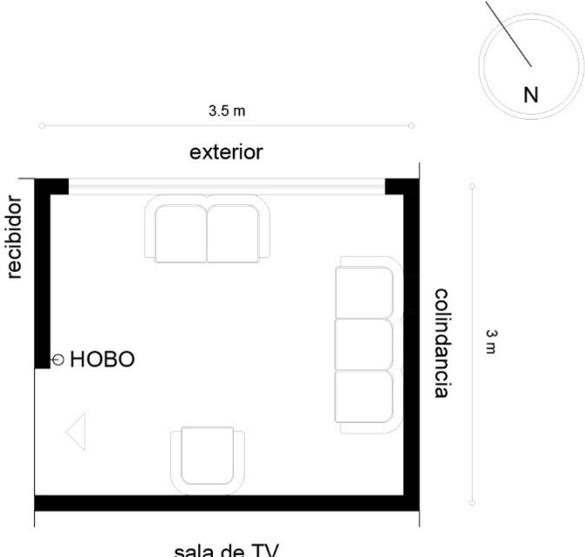
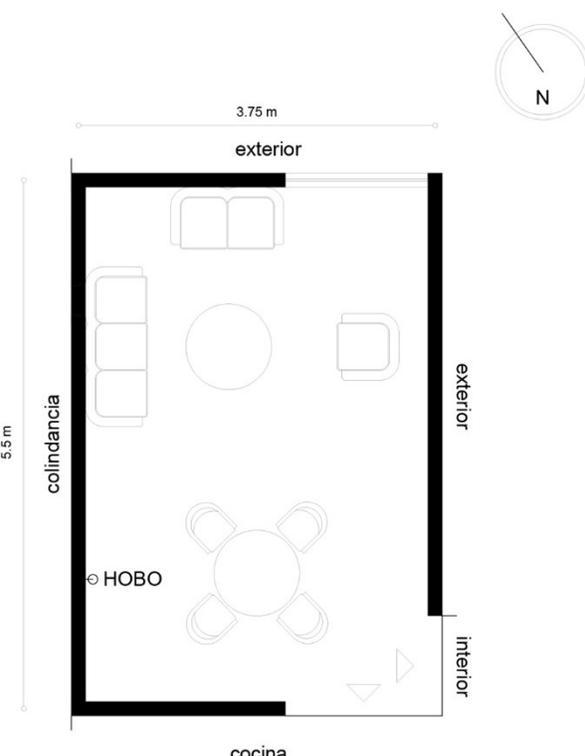
Continua Tabla 1. Características espaciales y constructivas de las ocho viviendas analizadas.
Fuente: De los autores.

Vivienda	Características constructivas	Características espaciales
<p>3</p>	<p>De dos niveles con 5.4 m de altura y techo plano. Muros de block hueco de concreto y losa maciza de concreto armado.</p> 	

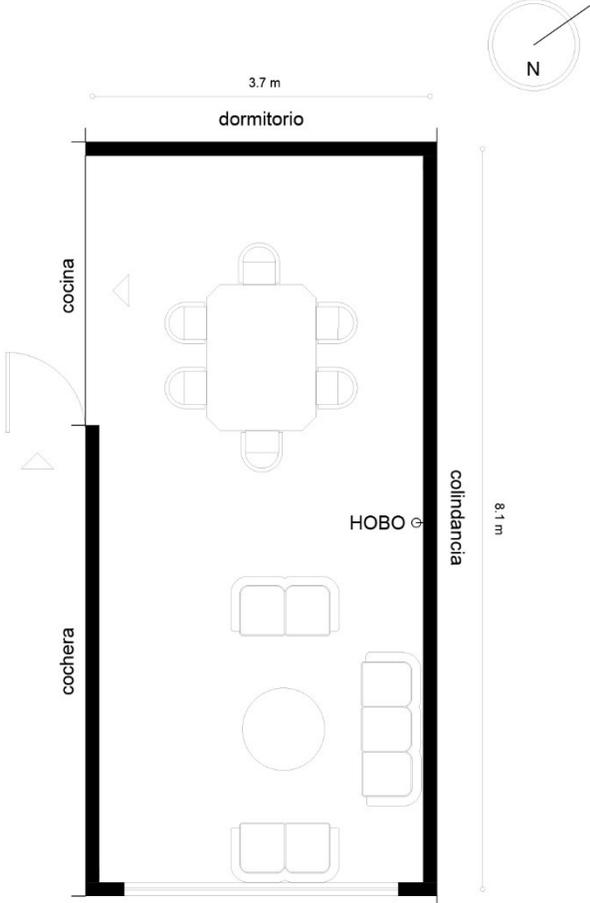
Continua Tabla 1. Características espaciales y constructivas de las ocho viviendas analizadas.
Fuente: De los autores.

Vivienda	Características constructivas	Características espaciales
4	<p>De un nivel con 3 m de altura y techo plano. Muros de block hueco de concreto y losa maciza de concreto armado.</p> 	

Continua Tabla 1. Características espaciales y constructivas de las ocho viviendas analizadas.
Fuente: De los autores.

Vivienda	Características constructivas	Características espaciales
<p>5</p> 	<p>De dos niveles con 5.4 m de altura y techo plano. Muros de ladrillo rojo cocido y losa maciza de concreto armado.</p>	
<p>6</p> 	<p>De un nivel con 2.7 m de altura y techo plano. Muros de ladrillo rojo cocido y losa maciza de concreto armado.</p>	

Continua Tabla 1. Características espaciales y constructivas de las ocho viviendas analizadas.
Fuente: De los autores.

Vivienda	Características constructivas	Características espaciales
7	<p>De dos niveles con 6 m de altura y techo plano. Muros de block hueco de concreto y techo de lámina metálica con capa de compresión de concreto armado.</p> 	



Continua Tabla 1. Características espaciales y constructivas de las ocho viviendas analizadas.
Fuente: De los autores.

Vivienda	Características constructivas	Características espaciales
8	<p>De un nivel con 3 m de altura y techo plano. Muros de block hueco de concreto y losa maciza de concreto armado.</p> <p>Nota: con idénticas características de la vivienda 1.</p>	

Análisis climático y periodo de estudio

Para determinar si las viviendas se encuentran en condiciones de habitabilidad térmica se tomó como referencia el método empleado por Quiroa, Villanueva, González y Retana (2020), en el que se establece un periodo experimental, un periodo representativo, y un día representativo, en el cual se analiza el comportamiento térmico de las viviendas en una situación de calor.

Para este caso, se adaptó de la siguiente manera. Como periodo experimental se registraron temperaturas externas durante la temporada de calor por treinta días. Como periodo representativo se identificó un episodio de ola de calor con duración de cinco días, dentro del mes de mediciones. Finalmente, como día representativo se eligió el día más cálido de la ola de calor.

Para identificar el periodo y el día representativo, caracterizado por un episodio de ola de calor, se tomaron mediciones de humedad y temperatura externa del 11 de septiembre al 11 de octubre de 2021, lo que comprende el periodo experimental de treinta días. Las mediciones se realizaron con intervalos de 30 minutos, empleando una estación Davis Instruments, Vantage Pro-2 Plus, instalada en la Escuela de Arquitectura, Unidad Torreón, de la Universidad Autónoma de Coahuila.

Para analizar la habitabilidad térmica de las ocho viviendas seleccionadas, a cada una se le realizaron mediciones de temperatura interna durante todo el periodo experimental, esto permitió analizar los datos recolectados durante la ola de calor que se presentó entre el 16 y el 20 de septiembre de 2021. Las mediciones de temperatura se realizaron con intervalos de 30 minutos utilizando registradores ONSET, HOBO U12-13, instalados en la estancia-comedor de las ocho viviendas, por considerarse el espacio donde permanecen más tiempo los habitantes.

Finalmente, se analizó y comparó el desempeño térmico de las ocho viviendas durante el día representativo, identificado como el más caluroso al final de la ola de calor, el 20 de septiembre de 2021 con una temperatura máxima de 35.7 °C. De esta manera, se obtuvieron datos de temperaturas máximas y mínimas, así como, la duración del tiempo-horas de confort y desconfort al interior de las viviendas.

Análisis cualitativo

Por otra parte, para identificar las afectaciones a la salud, así como, las formas de adaptación de quienes habitan en viviendas con altas temperaturas interiores, se diseñó un formato de entrevista aplicado durante el periodo representativo a un representante familiar.

Se realizaron un total de ocho entrevistas aplicadas a madres de familia, por ser quienes pasan la mayor parte del tiempo en casa, con rango de edad entre 40 y 50 años, quienes ofrecieron información de los demás integrantes de su grupo doméstico. Generalmente conformado por su esposo con el mismo rango de edad, con hijos entre 15 y 25 años y en ocasiones por un integrante de la tercera edad. De esta manera, se obtuvo información acerca de 32 sujetos que experimentan múltiples dificultades y distintas formas de adaptación ante una ola de calor.

El registro de las grabaciones se hizo con una grabadora de audio SONY, ICD-UX560F, para su posterior transcripción y análisis. Algunas de las preguntas planteadas a los habitantes fueron las siguientes:

- ¿Qué dificultades físicas le genera estar dentro de su vivienda durante días muy cálidos?
- ¿Qué enfermedades le han diagnosticado por habitar en espacios con altas temperaturas?
- ¿Qué adaptaciones constructivas ha realizado para mejorar la temperatura interior de su vivienda durante la temporada de calor?
- ¿Qué tecnologías usa para enfriar su casa durante la temporada de calor?

Por último, se relacionan los datos cuantitativos del registro de temperaturas con la información cualitativa obtenida de las entrevistas, con la finalidad de explicar los objetivos de investigación planteados en este trabajo.

Resultados

Habitabilidad térmica de la vivienda

En la Figura 3 se observan las mediciones de temperatura externa registradas dentro de un periodo experimental de treinta días, del 11 de septiembre al 11 de octubre de 2021. Durante casi todo el periodo, excepto tres días, las temperaturas máximas diarias estuvieron por encima de 30 °C, con un promedio de

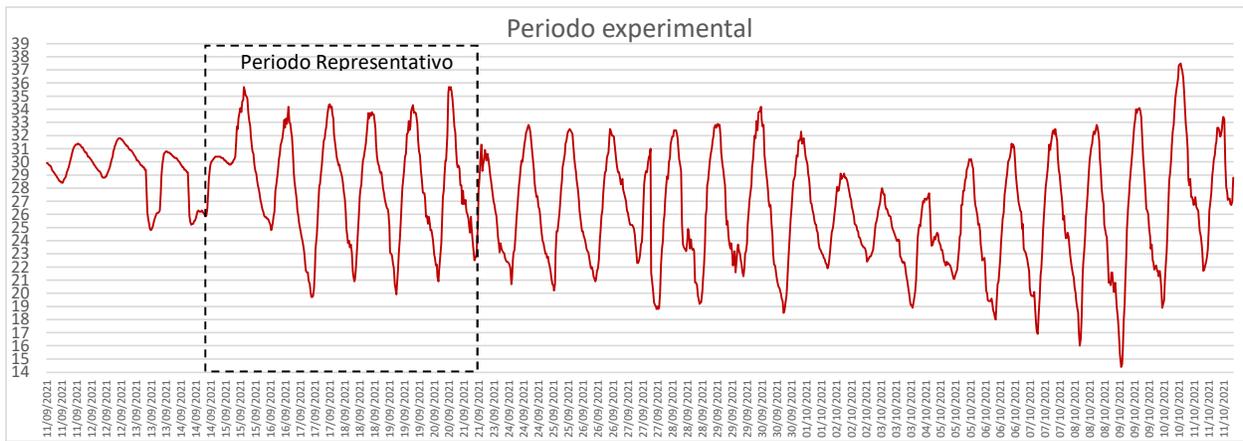


Figura 3: Periodo experimental de 30 días. Fuente: De los autores.

temperatura máxima de 32.3 °C y un promedio de temperatura mínima de 21.5 °C.

En cuanto al periodo representativo, en la Figura 4 2 (izquierda) se aprecia el registro de una ola de calor con duración de cinco días, del 16 al 20 de septiembre de 2021, con temperaturas máximas aproximadas a 35 °C. Primer día 34.2 °C, segundo día 34.4 °C, tercer día 33.8 °C, cuarto día 34.3 °C, quinto día 35.7 °C. Dichas temperaturas se presentaron entre 5 pm y 7 pm. En cuanto al número de horas-día con temperaturas >30 °C, se obtuvieron las siguientes: primer día 8.5 horas, segundo día 9 horas, tercer día 8.5 horas, cuarto día 9 horas, quinto día 10.5 horas. Estas mediciones se registraron entre 12 pm y 9 pm. En cinco días se sumó un total de 45.5 horas con temperaturas superiores a 30 °C, con un promedio de 9.1 horas por día.

Por su parte, en la Figura 4 (derecha) se observa el día representativo caracterizado por ser el más cálido dentro de la ola de calor, el 20 de septiembre de 2021, con una temperatura máxima de 35.7 °C y con 10.5 horas de temperaturas >30 °C. En tanto que la temperatura mínima fue de 20.9 °C, lo cual muestra una amplitud térmica de 14.8 °C, como diferencia entre la temperatura más cálida y la más fría durante un día. Aunque se muestran los registros de humedad, los valores indican que no tiene un impacto mayor en la sensación térmica producida por altas temperaturas, puesto que, en las horas más cálidas del día el porcentaje de humedad no rebasa el rango de confort adaptativo.

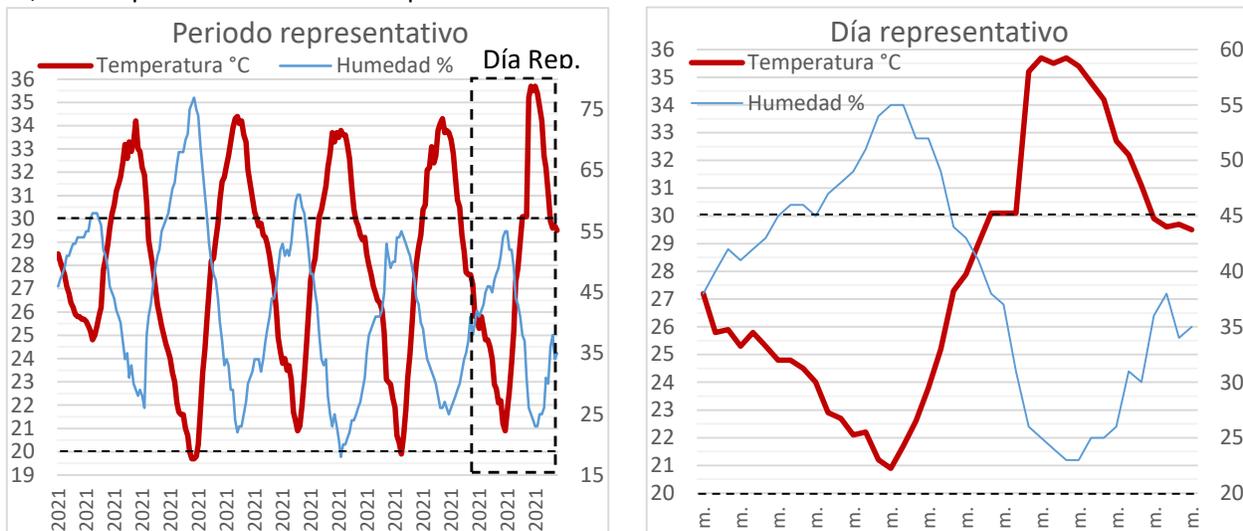


Figura 4: Periodo representativo: ola de calor registrada del 16 al 20 de septiembre de 2021 (izquierda). Día representativo: el más cálido de la ola de calor, el 20 de septiembre de 2021 (derecha). Fuente: De los autores.

Tabla 2
Comportamiento térmico de ocho viviendas durante día representativo.
Fuente: De los autores.

Día Representativo: 20-09-21								
Vivienda	1	2	3	4	5	6	7	8
Temperatura máxima en °C	35.2	34.9	30.1	29.4	28.0	32.7	38.1	30.5
Temperatura mínima en °C	28.8	28.0	28.9	25.9	24.6	28.5	26.1	28.7
Diferencia de temperaturas	6.4	6.9	1.2	3.5	3.4	4.2	12.1	1.8
Temperatura promedio	32.2	31.4	29.5	28.1	26.3	30.6	31.4	29.6
Confort térmico en Horas / Día	5.0	8.0	20.0	24.0	24.0	9.0	10.5	14.5
Disconfort térmico en Horas / Día	19.0	16.0	4.0	0.0	0.0	15.0	13.5	9.5

Tabla 3
Diferencia de temperaturas máximas interiores entre la vivienda 7 y la 5, y diferencia con la temperatura máxima exterior durante día representativo. Fuente: De los autores.

Diferencias de Temperaturas Interiores Máximas Registradas				
	Vivienda	Valor °C	Diferencia Temp. Ext Max.	Incremento %
Mayor	7	38.1	+2.4	6.7
Menor	5	28	-7.7	-21.5
Diferencia		10.1	10.1	27.3

En la Tabla 2 se sintetiza el análisis térmico de las ocho viviendas seleccionadas, durante el día representativo, el 20 de septiembre de 2021.

Temperatura máxima: La vivienda 7 presentó la temperatura máxima interior más elevada con 38.1 °C, y una diferencia de 2.4 °C, que representa un incremento del 6.7%, en comparación con la temperatura máxima exterior que fue de 35.7 °C. Contrariamente, la vivienda 5 registró la menor temperatura máxima interior con 28 °C, y una diferencia de 7.7 °C, que representa una disminución de 21.5%, al compararse con la temperatura máxima externa. Sin embargo, al contrastar las temperaturas máximas interiores de las dos viviendas se muestra una diferencia de 10.1 °C, que representa -27.3%, lo cual indica que la vivienda 5 tiene un mejor comportamiento térmico ante una situación de calor (ver Tabla 3).

A pesar de que la vivienda 7 tiene un espacio con doble altura que supera por 3m a los espacios de las otras siete viviendas, presenta una desventaja térmica debido a que posee un techo de lámina metálica con un ligero recubrimiento de concreto. Debido a que los componentes metálicos tienen un coeficiente de conductividad térmica incluso mayor que materiales como el concreto, el espacio donde se realizaron las mediciones alcanzó la mayor temperatura máxima interior.

Temperatura mínima: La vivienda 5 mostró la temperatura mínima interna más baja con 24.6 °C, y una diferencia de 3.7 °C, que representa un incremento de 17.7% en comparación con la temperatura mínima exterior que fue de 20.9 °C. Inversamente, la vivienda 3 tuvo la temperatura mínima interna más alta con 28.9 °C, y una diferencia de 8 °C, que representa un aumento de 38.2% al compararse con la temperatura mínima externa. Al cotejar las temperaturas mínimas internas de las dos viviendas se exhibe una diferencia de 4.3 °C, que representa -14.8%, lo cual señala que la vivienda 5 tiene un mejor comportamiento térmico ante una situación de calor (ver Tabla 4).

Si bien, ambas viviendas tienen dos niveles de la misma altura y losa plana de concreto armado, presentan una diferencia constructiva en los muros ya que la vivienda 3 emplea block hueco de concreto, mientras que la vivienda 5 incorpora ladrillo de barro cocido. Aun cuando el block hueco tiene una menor conductividad térmica que el ladrillo macizo, por su doble cámara de aire interna, la vivienda 5 tiene un mejor comportamiento térmico debido al uso constante, durante el día y la noche, de un sistema de enfriamiento evaporativo conocido localmente como aire lavado. No obstante, el uso prolongado de este sistema conlleva un alto consumo hídrico y energético que podría considerarse insostenible

**Tabla 4**

Diferencia de temperaturas mínimas interiores entre la vivienda 3 y la 5, y diferencia con la temperatura mínima exterior durante día representativo. Fuente: De los autores.

Diferencias de Temperaturas Interiores Mínimas Registradas				
	Vivienda	Valor °C	Diferencia Temp. Ext. Min.	Incremento %
Mayor	3	28.9°C	8°C	38.2
Menor	5	24.6°C	3.7°C	17.7
Diferencia		4.3°C	4.3°C	20.5

Tabla 5

Horas con temperaturas superiores a 30 °C al interior de las viviendas durante día representativo. Fuente: De los autores.

Horas de Disconfort		
	Vivienda	Valor Horas
Mayor	1	19 (T > 30 °C)
Menor	4 y 5	0 (T > 30 °C)

Horas de confort: las viviendas 4 y 5 presentaron el mayor tiempo de confort térmico con 24 horas de temperaturas internas < 30 °C, pero la vivienda 5 registró una menor temperatura promedio con 26.3 °C. De manera inversa, la vivienda 1 tuvo el menor tiempo de confort térmico con 5 horas de temperaturas inferiores a 30 °C y una temperatura promedio de 32.2 °C. Además de que la vivienda 5 tuvo hasta 19 horas más de confort térmico que la vivienda 1, también poseyó una diferencia de 5.9 °C en relación con la temperatura promedio. Lo cual indica que tiene una mejor adaptación ante una situación de altas temperaturas.

Horas de disconfort: la vivienda 1 tuvo el mayor tiempo de disconfort térmico con 19 horas de temperaturas internas >30 °C. En contraste, las viviendas 4 y 5 presentaron la menor cantidad de horas de disconfort térmico con 0 horas de temperaturas > 30 °C (ver Tabla 5).

Pese a que la vivienda 1 tiene muros de block hueco de concreto y la vivienda 5 tiene muros de ladrillo rojo, la diferencia de temperaturas radica en el uso de un sistema de enfriamiento evaporativo. También influye que la vivienda 1 es de un nivel en tanto que la vivienda 5 cuenta con dos niveles, dado que el espacio donde se registraron las mediciones está en planta baja, la vivienda de dos niveles tiene una menor transferencia de calor hacia el primer nivel.

En conclusión, de las ocho viviendas analizadas, la vivienda 5 es la que tiene un mejor comportamiento térmico ante una situación de calor, ya que tuvo las

temperaturas máximas, mínimas y promedio más bajas, así como, la mayor cantidad de horas de confort térmico. Como ya se ha mencionado esto se debe al uso intensivo del sistema de enfriamiento evaporativo. A pesar de que la vivienda 7 presentó la mayor temperatura máxima con 38.1°C, la vivienda 1 es la que tuvo el peor comportamiento térmico, ya que registró una temperatura máxima de 35.2 °C, y la mayor temperatura promedio con 32.2 °C, así como la mayor cantidad de tiempo de disconfort con un total de 19 horas durante el día representativo.

Análisis cualitativo: Salubridad y adaptación

Se ha documentado ampliamente que la exposición a altas temperaturas puede ocasionar afectaciones físicas y psicológicas, moderadas o graves (OPS, 2019), también se argumenta que dichas afectaciones pueden aparecer entre las primeras 24 / 48 horas de una ola de calor, cuando la temperatura es superior a 30 °C (Morales et al., 2005). No obstante, el escenario más crítico de una ola de calor es cuando se mantienen altas temperaturas hasta por 24 horas durante días consecutivos.

Con base en el análisis del apartado anterior, se evidencia que existen viviendas que pueden presentar hasta 19 horas de temperaturas internas > 30° C. Por ello, resulta indispensable conocer las dificultades físicas y enfermedades generadas por habitar en espacios con altas temperaturas interiores, así como, las formas de adaptación sociales y tecnológicas implementadas para mitigar los efectos de una ola de calor.

Tabla 6
 Síntesis de categorías analizadas por vivienda. Fuente: De los autores

Vivienda	Dificultades físicas	Enfermedades diagnosticadas	Adaptación física	Adaptación tecnológica y constructiva
1	<ul style="list-style-type: none"> • Sofoco • Dolor de cabeza • Sudoración 	<ul style="list-style-type: none"> • Rozaduras cutáneas 	<ul style="list-style-type: none"> • Ropa corta y holgada 	<ul style="list-style-type: none"> • Apertura de ventanas • Enfriamiento evaporativo
2	<ul style="list-style-type: none"> • Estrés • Sudoración 	<ul style="list-style-type: none"> • Deshidratación 	<ul style="list-style-type: none"> • Ducha fría 	<ul style="list-style-type: none"> • Apertura de ventanas • Enfriamiento evaporativo
3	<ul style="list-style-type: none"> • Dolor de cabeza • Calor excesivo • Estrés 	<ul style="list-style-type: none"> • Sin información 	<ul style="list-style-type: none"> • Sin información 	<ul style="list-style-type: none"> • Apertura de ventanas • Enfriamiento evaporativo
4	<ul style="list-style-type: none"> • Calor excesivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Golpe de calor 	<ul style="list-style-type: none"> • Permanencia en planta baja • Beber agua fría 	<ul style="list-style-type: none"> • Enfriamiento evaporativo
5	<ul style="list-style-type: none"> • Calor excesivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Sin información 	<ul style="list-style-type: none"> • Permanencia en planta baja • Beber agua fría • Ducha fría 	<ul style="list-style-type: none"> • Enfriamiento evaporativo
6	<ul style="list-style-type: none"> • Dolor de cabeza • Calor excesivo • Sudoración 	<ul style="list-style-type: none"> • Sin información 	<ul style="list-style-type: none"> • Ropa corta y holgada • Beber agua fría 	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilador • Enfriamiento evaporativo
7	<ul style="list-style-type: none"> • Dolor de cabeza • Sudoración • Sangrado nasal 	<ul style="list-style-type: none"> • Sin información 	<ul style="list-style-type: none"> • Ropa corta y holgada • Ducha fría 	<ul style="list-style-type: none"> • Apertura de ventanas • Ventilador • Enfriamiento evaporativo • Aire acondicionado • Recubrimiento térmico
8	<ul style="list-style-type: none"> • Agotamiento • Somnolencia • Dolor de cabeza 	<ul style="list-style-type: none"> • Vértigo 	<ul style="list-style-type: none"> • Ropa corta y holgada 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de vegetación • Recubrimiento térmico • Enfriador evaporativo

En la Tabla 6, se observan una síntesis de las categorías y la información obtenida de entrevistas aplicadas a los habitantes de las ocho viviendas analizadas.

Dificultades físicas y enfermedades

Algunos habitantes identificaron dificultades físicas generadas por exposición a altas temperaturas internas. Aun cuando no todos experimentan las mismas molestias, se pueden señalar al menos ocho: sofoco, dolor de cabeza, sudoración, estrés, sensación de calor, sangrado nasal, agotamiento, somnolencia. Cabe señalar que las mujeres y adultos con sobrepeso son quienes experimentan mayores dificultades físicas ante una situación de calor.

En cuanto a las enfermedades diagnosticadas, existe escasa evidencia porque son pocas las personas que sufren alguna patología. Con base en las entrevistas, se identificaron las siguientes: rozaduras cutá-

neas, deshidratación, golpe de calor y vértigo. Sin embargo, la deshidratación y el golpe de calor podrían considerarse como eventos no repetitivos, mientras que las rozaduras cutáneas y el vértigo podrían ser patologías recurrentes que se presentan anualmente durante la temporada de calor, y con ello, se podría ver disminuida la calidad de vida de quienes experimentan estos problemas de salud.

Si bien, OPS (2019) y Rocque et al. (2021), indican que el calor puede generar deshidratación, confusión, accidentes cerebrovasculares, alergias de la piel, diabetes, alteración del sueño, cataratas, estrés térmico, agotamiento, así como, enfermedades renales, infecciosas, respiratorias, cardiovasculares y neurológicas, en los casos analizados se hallaron solo algunas de las patologías mencionadas. Aun así, es posible que algunas personas, sin diagnóstico médico, sufran enfermedades originadas por exposición al calor, y se relacionen erróneamente con otras causas.



Adaptaciones sociales y tecnológicas

A partir de las entrevistas aplicadas a los habitantes de las viviendas, se identifican cuatro formas de adaptación sociales: uso de ropa ligera, baños de agua fría, permanencia en planta baja y beber agua fría. Si bien, casi todos mencionan el uso de ropa ligera y beber agua fría, son las mujeres quienes toman uno o dos baños de agua fría durante el día. Lamentablemente, la estrategia no puede replicarse en zonas urbanas donde la dotación de agua es escasa o intermitente, o cuando no se puede pagar el costo económico de un mayor consumo de agua. Además, esta práctica tendría impactos ecológicos por elevar el consumo del recurso hídrico por individuo por día.

Por su parte, se documentan seis estrategias de adaptación tecnológicas tales como: apertura de ventanas, uso de enfriadores evaporativos, ventiladores de techo y aparatos aire acondicionado, así como, recubrimientos térmicos y uso de vegetación.

Aunque, el uso de enfriadores evaporativos es bastante frecuente en la mayoría de las viviendas, puede haber diferencias en cuanto al número de aparatos instalados, así como, en el tiempo de uso de las tecnologías. En pocas ocasiones se emplean ventiladores de techo porque no son efectivos y sistemas aire acondicionado como mini Split, que son más eficaces, pero tienen un costo de adquisición elevado, así como, un mayor consumo de energía eléctrica que incrementa el pago de las facturas.

No obstante, de manera paralela a los baños de agua fría, el uso intensivo del aire lavado conlleva un mayor consumo hídrico y energético. De esta forma, se evidencia que durante el verano cuando las temperaturas son más altas en comparación con el resto del año, y en especial cuando ocurren olas de calor, se puede generar una mayor demanda de servicios urbanos de electricidad y de agua, por el uso de estrategias sociales y tecnológicas de adaptación ante situaciones de calor. Desafortunadamente, la sociedad con vulnerabilidad económica y marginación urbana tiene menores oportunidades de desplegar dichas estrategias, porque resultan costosas y porque en ocasiones la dotación de agua es intermitente, o insuficiente para realizar otras actividades básicas de la vida cotidiana.

Por su parte, las formas de adaptación constructivas son escasas, solo en algunas viviendas se tuvo la intención de aplicar recubrimientos térmicos. Aun cuando, la estrategia pudiera parecer adecuada para

mitigar los efectos de la radiación solar y de las altas temperaturas interiores, no cumplen su función porque se trata de impermeabilizantes en forma de pasta que se aplican en el techo, que a pesar de ser de color oscuro se promocionan con cualidades térmicas, pero debido a la delgada película que se forma al aplicarse no tiene la capacidad de funcionar adecuadamente como aislante térmico.

Conclusiones

Algunos de los aspectos climáticos que más impacta en las condiciones de habitabilidad en climas áridos y semiáridos son las escasas precipitaciones y las altas temperaturas que predominan durante gran parte del año. Cuando las viviendas no están adaptadas a dichas condiciones climáticas suelen tener temperaturas internas que pueden superar las del exterior. Como se ha podido evidenciar, los habitantes que participaron en esta investigación experimentan distintos malestares físicos y enfermedades provocadas por exposición a altas temperaturas interiores durante periodos de tiempo prolongados. Lo cual reafirma la relación que existe entre la aparición de patologías y las altas temperaturas al interior de las viviendas.

Si bien, la temperatura máxima, así como el retraso y el amortiguamiento térmico son variables para considerar en análisis térmicos, en estudios de temperatura relacionados con la salubridad también se puede considerar como parámetro e indicador la duración-horas de temperaturas dentro de un rango establecido por la temperatura promedio y la temperatura máxima. Debido a que la temperatura máxima puede durar algunos minutos, la persistencia de temperaturas inferiores, pero de similar intensidad estarían generando distintos impactos en la salubridad de las personas.

Aunque el concepto de habitabilidad generalmente suele integrar dimensiones socioculturales y socioeconómicas, entre otras, no cabe duda de que en climas áridos y semiáridos donde predominan las altas temperaturas la variable térmica también es muy importante de considerar. En este sentido, las condiciones de habitabilidad térmica se hacen presentes cuando existen espacios habitables que ofrecen un tiempo considerable, en horas-día, de temperaturas confortables que permiten desarrollar las actividades

cotidianas de los habitantes, y que al mismo tiempo que se previene la aparición de enfermedades.

Sin embargo, como se ha expuesto en este estudio, se pueden identificar viviendas que no ofrecen condiciones de habitabilidad térmica, debido a un deficiente planteamiento formal y constructivo, en el que predomina el uso de materiales como el acero y el concreto en gran parte de su envolvente, que tienen altos coeficientes de conductividad térmica. Por tal motivo, se considera relevante el diseño de sistemas constructivos que mejoren el comportamiento térmico de espacios interiores. A pesar de que el agua es un recurso escaso en climas áridos y la energía producida a partir de combustibles fósiles genera gases de efecto invernadero que contribuyen con el cambio climático, se podrían diseñar sistemas constructivos que contribuyan con la reducción del consumo hídrico y del energético generado por sistemas artificiales de enfriamiento.

Algunas soluciones se relacionan con el diseño de sistemas constructivos adaptados a la cultura y al clima, con base en la reinterpretación de sistemas constructivos tradicionales que al paso del tiempo han demostrado ser eficientes en cuanto a su adaptación en climas áridos y semiáridos. Tal es el caso de la arquitectura de tierra que persiste en distintas partes del mundo porque es económica, es parte de una tradición constructiva y porque se han demostrado sus cualidades térmicas en climas áridos con altas temperaturas. Por ello, es recomendable además de revalorar dichos sistemas de construcción, que se reinterpreten e innoven las técnicas con posibilidad de aplicarse en la vivienda contemporánea.

Por otra parte, aunque este trabajo cumple con los objetivos planteados, en futuras investigaciones se pretende realizar un análisis de mayor extensión territorial y temporal, con más casos y que permita establecer comparaciones entre distintos sectores urbanos. Además, se prevé la conformación de un grupo interdisciplinario que incluya la participación de expertos en salud para determinar de manera más precisa las patologías generadas por olas de calor y sus impactos en la vivienda.

Debido a que no existen datos locales sobre enfermedades producidas por altas temperaturas interiores, sería importante realizar investigaciones en las que se generen hipótesis sobre género, edad, peso,

entre otras, y su relación con enfermedades producidas por permanencia prolongada en espacios interiores de viviendas con altas temperaturas. Además, se invita a otros investigadores a realizar análisis en otras regiones áridas y semiáridas del país y de contextos similares en Latinoamérica, con la finalidad de conocer con mayor profundidad el fenómeno abordado en este trabajo.

Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló en el marco del proyecto de investigación PRODEP-UACOH-CA-141, denominado “Vivienda y vulnerabilidad climática. Caso de estudio Torreón Coahuila”, en México, y fue posible gracias al financiamiento otorgado por el Programa para el Desarrollo Profesional Docente, Tipo Superior (PRODEP). Así mismo, se agradece el apoyo brindado por el Laboratorio de Ambiente Construido y Resiliencia en Zonas Áridas, de la Escuela de Arquitectura, Unidad Torreón, de la Universidad Autónoma de Coahuila. Finalmente, al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) de CONACYT por las becas otorgadas a los autores de esta investigación.

Referencias

- ASHRAE (1993). *Fundamentals*. Atlanta, EUA: ASHRAE.
- Auliciems, A. y Szokolay, S. (2007). *Thermal comfort*. Queensland, Australia: The University of Queensland.
- Comisión Nacional del Agua - CONAGUA (2018a). Temperaturas Naturales Extremas (Temporada de calor 2018). Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331762/TNE_Calor_SE21.pdf
- Comisión Nacional del Agua - CONAGUA (2018b). Reporte del clima en México. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%3%ADa/Diagn%3%B3stico%20Atmosf%3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%3%A9xico/RC-Julio18.pdf>
- Cuitiño, G., Esteves, A., Maldonado, N. y Rotondaro, R. (2015) Análisis de la transmitancia térmica y resistencia al impacto de los muros de quincha. *Informes de la construcción*, 67 (537), 1-11. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.12.082>

- Díaz, J. y Linares, C. (2005). Temperaturas extremas en verano. Implicaciones en salud. *Revista de salud ambiental*, 5 (2), 113-117. Disponible en: <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/305/264>
- Díaz, R., Castro, A. y Aranda, P. (2014). Mortalidad por calor natural excesivo en el noroeste de México: Condicionantes sociales asociados a esta causa de muerte. *Frontera Norte*, 26 (52), 155-177. DOI: <https://doi.org/10.17428/rfn.v26i52.107>
- Earth System Research Laboratory – ESRL (2022). Disponible en: <https://www.esrl.noaa.gov/>
- Fuentes, V. (2002). *Metodología de diseño bioclimático: El análisis climático* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Ciudad de México.
- Gobierno de México (2021). Informe semanal de vigilancia epidemiológica. Temperaturas extremas. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/630569/TNE_2021_SE12.pdf
- Guerrero, R., Do Prado, M. y Ojeda, M. (2016). Reflexión crítica epistemológica sobre métodos mixtos en Investigación de Enfermería. *Enfermería Universitaria*, 13 (4), 246-252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.reu.2016.09.001>
- INEGI (2020). Encuesta Nacional de Vivienda 2020. Presentación de resultados. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/envi/2020/doc/envi_2020_presentacion.pdf
- Linares, C., Carmona, R., Ortiz, C., Mirón I. y Díaz, J. (2017). Temperaturas extremas y salud en España en un contexto de cambio climático: Algunas líneas de investigación. *Revista de salud ambiental*, 17 (1), 57-69. Disponible en: <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/836/804>
- Meadows, D., Meadows, D., Randers, J. and Behrens, W. (1972). *The limits to growth: A report for the of Rome's project on the predicament of mankind*. Universe Books, New York, USA.
- Mena, E. (2011). Habitabilidad de la vivienda de interés social prioritaria en el marco de la cultura. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 4 (8), 296-314. Disponible en: <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/cvyu/article/view/5477>
- Morales, M., Nogués, M., Borrás, A. y García, Á. (2005). Golpe de calor. A propósito de un caso. Disponible en: <https://www.elsevier.es/es-revista-medicina-familia-semergen-40-pdf-13073963>
- Olgay, V. (1998). *Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Gustavo Gili, Barcelona, España.
- Organización Mundial de la Salud – OMS (2018). *Directrices de la OMS sobre vivienda y salud. Resumen de orientación*. OMS, Ginebra, Suiza. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/279743>
- Organización Panamericana de la Salud – OPS (2019). *Olas de calor y salud. Medidas a tomar*. OMS, Washington, Estados Unidos de América. Disponible en: <https://www.paho.org/es/documentos/ola-calor-medidas-tomar-revision-preliminar>
- Quiroa, A., Villanueva, J., González, A. y Retana, A. (2020). Capacidad de mitigación de tres materiales constructivos de acuerdo con su desempeño térmico en zonas áridas, Caso de estudio: Torreón, Coahuila. *Academia XXII*, 11 (22), 216-231. DOI: <https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2020.22.77413>
- Rahman, A. y Kojima, S. (2018). Study of indoor and outdoor thermal comfort for public space and houses in around river. Case study: Banjarmasin city, Indonesia. *ADEIJ*, 1(2), 29-41. Disponible en: <https://air-ccse.com/adeij/papers/1216adeij03.pdf>
- Rocque R., Beaudoin C., Ndjaboue R., et al. (2021). Health effects of climate change: an overview of systematic reviews. DOI: <http://dx.doi.org/10.1136/bmjopen-2020-046333>
- Sarmiento, P., y Hormazábal, N. (2003). Habitabilidad térmica en las viviendas básicas de la zona central de Chile, a la luz de los resultados preliminares del proyecto FONDEF D00I1039. *Revista INVI*, 18 (46), 23-32. DOI: <https://doi.org/10.5354/0718-8358.2003.62242>
- UNICEF (2015). *Las consecuencias del cambio climático en los niños*. UNICEF, Nueva York, Estados Unidos de América. Disponible en: <https://www.unicef.org/honduras/sites/unicef.org.honduras/files/2020-08/A%20me-nos%20que%20actuemos%20ahora.%20El%20im-pacto%20del%20cambio%20climático%20en%20la%20ni%C3%B1ez.2015.pdf>
- Villanueva, J. (2020). *Zonas climáticas locales y uso de suelo en Torreón. Vínculos entre ciencia y política para el desarrollo urbano*. Saltillo, México: Universidad Autónoma de Coahuila. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29556.17281>

Página legal y créditos

CIENCIA NICOLAITA, Año 31 No. 87, abril 2023, es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo a través de la Coordinación de la Investigación Científica, Av. Francisco J. Mújica, s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Tel. 443 316 74 36, 443 327 23 66, y 443 322 35 00, <http://www.cic.cn.umich.mx>, ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx. Editor: Dr. José López Bucio. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2013-072913082200-203, ISSN: 2007-7068, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Coordinación de la Investigación Científica, Edificio C-2., Av. Francisco J. Mújica, s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Tel. 443 316 74 36 y Fax 443 327 23 66, Responsable de la última actualización de este Número, Área de Tecnologías y Procesos de Información de la Coordinación de la Investigación Científica, Hugo César Guzmán Rivera, fecha de última modificación, **21 de septiembre de 2022**.

Ciencia Nicolaita 87 fue formada y preparada para su versión electrónica, en el Área Editorial del Departamento de Comunicación de la Ciencia de la Coordinación de Investigación Científica. Edificio C-2, Ciudad Universitaria, Morelia.

Fotografía de la portada: Catedral de Morelia. Fotografía de Genaro Servín. Del sitio pexels.com.

Derechos de uso

Se permite la reproducción, publicación, transmisión, difusión en cualquier modo o medio de cualquier parte del material contenido en el archivo (únicamente texto sin imágenes) sin alterar o modificar el original, con fines de referencia y/o reproducción, académicos o educacionales, con excepción de los personales o comerciales, citando la fuente de referencia y otorgando el crédito correspondiente al autor y al editor.

Sitio web implementado por el equipo de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo sobre la plataforma OJS3/PKP