

ESTUDIOS DE ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA

• VOL. II •

• ENERO-DICIEMBRE 2023 •

PUBLICACIÓN ANUAL DE INVESTIGACIÓN EN DISEÑO

Mtra. Brenda Yazmín Juárez Guerrero
Mtro. Gerardo René Aranda Barajas
Compiladores



Universidad Autónoma Metropolitana

Dr. José Antonio de los Reyes Heredia
Rector General

Dra. Norma Rondero López
Secretaría General

Unidad Azcapotzalco

Dra. Yadira Zavala Osorio
Rectora de la Unidad

Mtro. Salvador Ulises Islas Barajas
Secretario de la Unidad

Mtra. Areli García González
Secretaría Académica en funciones de Directora de la División de Ciencias y Artes para el Diseño

Mtro. Luis Yoshiaki Ando Ashijara
Jefe del Departamento de Medio Ambiente

Consejo Editorial de la División de Ciencias y Artes para el Diseño

Mtra. Karla María Hinojosa de la Garza (Presidenta) | Mtra. Dulce María Lomelí (Secretaria)
Dr. Christof Adolf Göbel | Mtro. Saúl Vargas González.

Comité Editorial de la División de Ciencias y Artes para el Diseño

Mtra. Bárbara Paulina Velarde Gutiérrez (Presidenta) | Dr. Isaac Acosta Fuentes (Secretario)
Dra. Sandra Rodríguez Mondragón | MDT. Gabriel de la Cruz Flores Zamora | Dr. Fernando Rafael Minaya Hernández.

Dra. Gloria María Castorena Espinosa
Editor Responsable

D. C. G. Lilian Alejandra Ortiz Moreno
Diseño de portada y formación editorial

D. C. G. Miguel Antonio Ramírez Valdivia
Adecuación editorial y actualización técnica

ESTUDIOS DE ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA. Año 2023, Volumen II. Enero-diciembre de 2023, es una publicación anual editada por la Universidad Autónoma Metropolitana a través de la Unidad Azcapotzalco, División de Ciencias y Artes para el Diseño, Prolongación Canal de Miramontes 3855, Col. Ex Hacienda San Juan de Dios, Alcaldía Tlalpan, C.P. 14387, Ciudad de México y Av. San Pablo 420, Col. Nueva el Rosario, Alcaldía Azcapotzalco, C.P. 02128, Ciudad de México. Teléfonos: 55 53189187 y 55 53189189. Página electrónica de la revista: <https://medioambiente.azc.uam.mx/Publicaciones/anoario.html> y dirección electrónica: medioambiente@correo.azc.uam.mx Editora responsable: Gloria María Castorena Espinosa. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo de Título No. 04-2022-022513362200-102, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Gloria María Castorena Espinosa, Fecha de la última modificación: 17 de diciembre del 2023. Tamaño del archivo 31 MB.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor responsable de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación, sin previa autorización de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Esta publicación fue evaluada por pares académicos, mediante un proceso a doble ciego.



**ESTUDIOS DE
ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA**

VOL. II AÑO 2023

PUBLICACIÓN ANUAL DE INVESTIGACIÓN EN DISEÑO

Índice

- 6 Presentación
- 9 Nuevos paradigmas en los parámetros de confort y estrategias de diseño bioambiental.
John Martin Evans
- 25 Sostenibilidad de la construcción con tierra entramada.
Luis Fernando Guerrero Baca
- 45 Índice de habitabilidad gerontológica con base en estudio de campo.
Kattia García-Morales, Gonzalo Bojórquez-Morales, Carmen García-Gómez
- 63 Gestión de la Innovación en el Diseño Sostenible.
Edwin Israel Tovar Jiménez, Víctor Alberto Arvizu Piña
- 83 Energía agrovoltaica.
Erika Velázquez Lavariega, Héctor Valerdi Madrigal, Francisco Rojas Caldelas
- 97 Vulnerabilidad de México por Efectos del Cambio Climático y Estrategias de Diseño Bioclimático Sostenible y Resiliente para Mitigarlo.
José Roberto García Chávez
- 111 Determinación de las zonas de confort adaptativo en tres distintos climas de la república mexicana utilizando la metodología Control Potential Zone (CPZ).
Gerardo René Aranda Barajas
- 129 Análisis crítico de la envolvente del edificio de referencia en la Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001.
Víctor A. Fuentes Freixanet, Aníbal Figueroa Castrejón
- 143 Análisis de las características termofísicas de sistemas de ventana y los vidrios arquitectónicos para la envolvente del edificio.
Aníbal Figueroa Castrejón, Víctor A. Fuentes Freixanet
- 163 La celosía tipo persiana de las ventanas tradicionales colimenses como un dispositivo de procuración de la privacidad, ventilación y protección solar.
Alfonso Cabrera Macedo, Carlos Javier Esparza López, Jorge Armando Ojeda Sánchez, Camilo Caicedo Moncayo

Herramienta de evaluación de materiales aislantes translúcidos para la envolvente arquitectónica. Sandra Paulina Bastida-Rojano, Mauro Germán Valdés-Barrón, Dolores Ana Flores-Sandoval	173
Análisis térmico de un prototipo de vivienda de interés social en un clima cálido subhúmedo. Carlos Fernando Arias Martínez, Jennifer Guadalupe Jiménez Anzar, Jonnathan Camilo Christian Mauricio Caicedo Moncayo, Jorge Armando Ojeda Sánchez, Carlos Javier Esparza López	189
Percepción acústica en espacios educativos de la Universidad de Colima. Mónica Isabel Verdugo Mendoza, Cruz Roberto Velázquez Cardona, Carlos Javier Esparza López, Karen Estrella Martínez Torres	207
Arquitectura Bioclimática y Sustentabilidad a partir de acciones locales para obtener resultados globales. Gloria María Castorena Espinosa, Brenda Yazmín Juárez Guerrero	225

Presentación

Luis Yoshiaki Ando Ashijara

Jefe del Departamento del Medio Ambiente
Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco

En el año de 1997 se publicó el primer Anuario de Estudios de Arquitectura Bioclimática y 26 años después, es un honor presentar el Volumen XVIII en el que se integran las actualizaciones, innovaciones y mejoras que el diseño bioclimático ofrece como respuesta a las necesidades y cambios sociales, tecnológicos, urbanísticos y de habitabilidad, ante factores relevantes como el cambio climático, la salud y el bienestar de la humanidad.

Estudios de Arquitectura Bioclimática tiene un gran valor académico, debido a que comparte las experiencias, el conocimiento y los avances de investigación desarrollados en universidades internacionales y nacionales a través de investigadores y docentes quienes comparten la pasión por el diseño bioclimático y su preocupación por el planeta y quienes lo habitan.

El primer artículo de John Martin Evans, de la Universidad de Buenos Aires, Argentina, presenta los avances en el desarrollo de los “Triángulos de confort” de su autoría, con el fin de demostrar su capacidad potencial como una herramienta vigente para el diseño bioclimático Luis Fernando Guerrero Baca, de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, quien ha sido investigador y gran promotor del diseño y uso de la construcción con tierra, presenta las cualidades del uso de la tierra entramada como un recurso para dar solución a la necesidad de espacios habitables compatibles con el entorno natural y con bajo impacto al ambiente.

El factor humano es el primer principio para que los espacios sean adecuados para quienes los van a habitar, Kattia García Morales, Gonzalo Bojórquez Morales y Carmen García Gómez de la Universidad Autónoma de Baja California y de la Universidad Autónoma de Yucatán, presentan un estudio para desarrollar una propuesta de ámbitos e indicadores para mejorar la habitabilidad de las personas adultas mayores, contemplando de manera conjunta los aspectos físicos, psicológicos y sociales.

Por otro lado, Edwin Israel Tovar Jiménez y Víctor Alberto Arvizu Piña, de la Universidad Iberoamericana de León y de la CDMX respectivamente, han impartido un taller de Innovación en Diseño Sostenible (TIDS) en diversas instituciones de educación superior en México, y presentan el proceso de seguimiento que emplean para el desarrollo de propuestas de ideas de innovación en arquitectura y diseño ambiental.

La UAM Azcapotzalco, en la División de Ciencias y Artes para el Diseño a través del Departamento de Medio Ambiente ha intervenido desde el diseño en los problemas ambientales; como es el tema de la vulnerabilidad que presenta nuestro país, México por efectos del cambio climático, desarrollado por José Roberto García Chávez, en el que establece las estrategias de diseño bioclimático y sostenibilidad de un diseño que responda en resiliencia y mitigación.

Divisiones de Ciencias Sociales y Humanidades y Ciencias y Artes para el Diseño, Erika Velázquez Lavariega, Héctor Valerdi Madrigal y Francisco Rojas Caldelas, describen la historia de la energía agrovoltáica, sus beneficios y diversos aspectos relevantes como una fuente alternativa de producción de energía en la industria agrícola.

En otro artículo, Gerardo René Aranda Barajas, de la Unidad Azcapotzalco, realiza una caracterización de tres zonas climáticas de la República Mexicana, utilizando la metodología Control Potential Zone (CPZ) con el fin de presentar las zonas de confort adaptativo la cual se basa en la capacidad que tiene el ser humano para adaptarse a las condiciones y variantes climáticas de las zonas que habitan.

Asimismo, Víctor Armando Fuentes Freixanet y Aníbal Figueroa Castrejón de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, presentan un análisis crítico de la NOM008-ENER-2001 "Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales", en la que hacen énfasis en que ésta no considera sistemas pasivos bioclimáticos, solamente se enfoca en reducir las cargas de aire acondicionado, por lo que la Norma no responde adecuadamente a las diferentes condiciones climáticas de México. Los mismos autores presentan otro artículo en el que exponen las propiedades y características termofísicas de los sistemas de ventana y vidrios arquitectónicos que se deben de considerar para aplicarlos como envolventes en las edificaciones y sus ventajas y desventajas en México.

De la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Colima, Alfonso Cabrera Macedo, Carlos Javier Esparza López, Jorge Armando Ojeda Sánchez y Camilo Caicedo Moncayo presentan un análisis histórico de las ventanas y celosías en la arquitectura vernácula de Colima, con el fin de conocer su uso como un dispositivo de visibilidad y como dispositivo de control solar sin inhibir el flujo de aire para la ventilación natural. Carlos Fernando Arias Martínez, Jennifer Guadalupe Jiménez Anzar, Camilo Caicedo Moncayo, Jorge Armando Ojeda Sánchez y Carlos Javier Esparza López también presentan un análisis térmico de un prototipo de vivienda de interés social en una caracterización de clima cálido subhúmedo en la ciudad de Villa de Álvarez, Colima, basado en la experimentación física y con la simulación.

Por otro lado, de la misma universidad, Mónica Isabel Verdugo Mendoza, Cruz Roberto Velázquez Cardona, Carlos Javier Esparza López y Karen Estrella Martínez Torres quien es de la Universidad Autónoma de Baja California, presentan un estudio sobre la percepción acústica en espacios educativos de la Universidad de Colima, con la finalidad de identificar los niveles sonoros donde se realizan las actividades de enseñanza, y la percepción y comodidad por parte del estudiantado.

Nuevos paradigmas en los parámetros de confort y estrategias de diseño bioambiental

John Martin Evans¹

1 Director | Maestría Sustentabilidad en Arquitectura y Urbanismo Secretaría de Posgrado, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo | Universidad de Buenos Aires
Correo: evansjmartin@gmail.com

Resumen

Este trabajo presenta los últimos avances en el desarrollo de una herramienta de selección de recursos de diseño bioambiental, los 'Triángulos de Confort', incorporados en una planilla electrónica que permite visualizar las modificaciones de las condiciones exteriores a lograr en espacios interiores. La planilla incorpora una base de datos climáticos con promedios mensuales de seiscientas localidades en América Latina y facilita la selección de datos y recursos de diseño a integrar en proyectos. Los resultados están incorporados en un diagrama que permite comparar las condiciones interiores y exteriores y verificar la eficacia de distintas combinaciones de recursos bioclimáticos. El formato de los Triángulos de Confort enfatiza el aporte de la modificación de la amplitud térmica en el ciclo de variación horaria de temperatura durante un día típico. Los 10 recursos incluidos en esta herramienta son identificados y comparados con otros diagramas de diseño bioclimático, los que están incorporados en la misma planilla para facilitar comparaciones, junto con diagramas de confort térmico y grados días de calefacción. Los mismos datos fueron previamente incorporados en las Tablas de Mahoney, otra herramienta innovativa en este campo, empleada para identificar respuestas de diseño que utilizan la amplitud térmica como indicador clave. Finalmente, el trabajo presenta una serie de casos de estudio con la aplicación de los Triángulos de Confort en distintos climas, a fin de demostrar su capacidad potencial de implementación en ejemplos de edificaciones que incorporan recursos bioclimáticos de diseño.

Palabras clave: Diseño bioambiental, amplitud térmica, acondicionamiento natural, confort térmico.

Abstract:

This paper presents the latest advances in the development of the tool to select bioclimatic design resources, the "Comfort Triangles", incorporated in an electronic spreadsheet to visualise the modifications of the external thermal conditions. The spreadsheet incorporates a database with the basic climatic variable of six hundred localities in Latin America and facilitates the selection of data and design resources. The results are incorporated into a diagram that allows a comparison between indoor and outdoor conditions and verifying the effectiveness of different combinations of bioclimatic resources. The format of the Triangles emphasizes the contribution of the modification of the thermal amplitude in the cycle of the hourly variation of temperature during a typical day. The 10 resources included in this tool are identified and compared with other bioclimatic design diagrams. These are incorporated into the same spreadsheet for easy comparisons, along with thermal comfort diagrams and degrees of heating days. The same data was previously incorporated into the Mahoney Tables, another innovative tool in this field for identifying design responses that incorporates thermal amplitude as a key indicator. Finally, the work presents a series of case studies with the application of the Comfort Triangles in different climates with examples of buildings where bioclimatic design resources were incorporated.

Keywords: Bioclimatic design, thermal amplitude, natural conditioning, thermal comfort.

Introducción

Las etapas iniciales del proceso proyectual requieren contar con la identificación de estrategias de diseño que respondan a las variaciones climáticas y los requisitos de diseño que permitan o contribuyan a reducir o evitar la demanda de energía convencional requerida para acondicionamiento térmico. La introducción de metas orientadas a la reducción de GEI, gases efecto invernadero, agrega nuevos desafíos para el proyectista. En ese contexto, el objetivo de esta presentación es ampliar los alcances y fundamentos de la herramienta 'Triángulos de Confort' (Evans, 2003), de modo que permita guiar al proyectista en la primera etapa del diseño en el marco de la producción sustentable de hábitat edificado, logrando edificios de baja demanda de energía y alta calidad ambiental. Dicha herramienta responde a las siguientes condiciones típicas que generalmente enfrenta el proyectista en la etapa inicial de proyecto:

En general, el proyectista suele carecer de tiempo, capacidad y/o inclinación para aplicar programas complejos de simulación en las etapas iniciales de proyecto. Sin contar con definiciones suficientes para ingresar datos, los programas complejos requieren un conocimiento previo de su manejo, situación que puede distraer al proyectista de otras tareas en la etapa inicial.

Si bien, actualmente se cuenta con información detallada del comportamiento climático típico y datos horarios durante un año, el análisis de este gran volumen de datos requiere tiempo y capacidad de manejo, aunque disponer de promedios mensuales en las etapas iniciales de diseño es suficiente para guiar al proyectista.

En muchos casos, el proyectista se enfrenta a demandas conflictivas, tales como orientación bioclimática versus vistas, tamaño del terreno versus captación de sol, o captación de brisa versus protección solar. En este contexto, el proyectista requiere apoyo para visualizar y comprender las consecuencias en el manejo de soluciones bioclimáticas y evaluar posibles alternativas.

De este modo, el proyectista puede adoptar ideas iniciales como adecuado punto de partida, sin aplicar procedimientos que verifiquen su aptitud. Sin embargo, estos primeros conceptos pueden orientar el proyecto en direcciones incompatibles con soluciones ambientalmente favorables.

Por tanto, antes de iniciar el proceso proyectual, es importante identificar la dirección de avance y el camino que permita incorporar soluciones favorables. La Figura 1 presenta la relación entre los datos iniciales de clima y los límites de confort. Indicadores tales como altas temperaturas, permiten seleccionar estrategias de diseño, por ejemplo, protección solar y ventilación cruzada. A su vez, las estrategias ayudan a seleccionar elementos, componentes y configuraciones que respondan a las estrategias de diseño a implementar. Finalmente, el proyectista integra estos componentes en el proyecto en sus respectivas escalas.

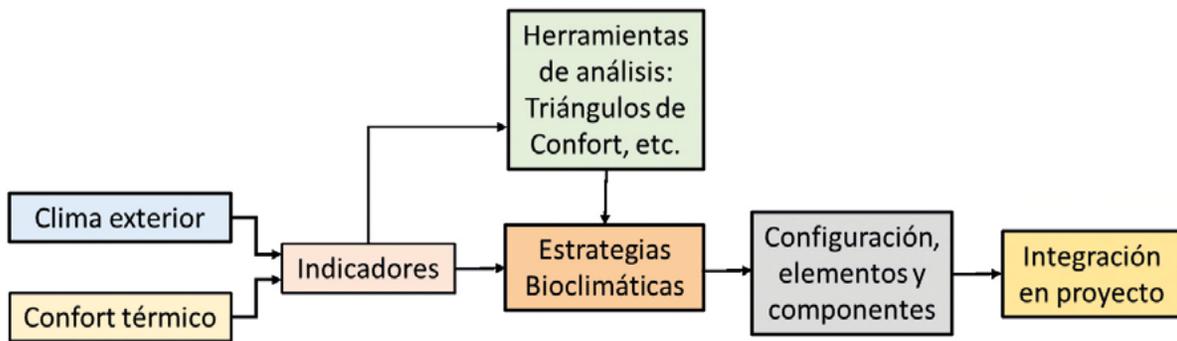


Figura 1. Secuencia y etapas del proceso de diseño bioclimático.

Si bien el proyectista especializado puede identificar estrategias directamente contando con datos climáticos y límites de confort, las herramientas de diseño tales como los diagramas bioclimáticos de Olgyay (1963, 1998) y Givoni (1969), el programa ‘Climate Consultant’ (Murray Milne et al, 2009) y los Triángulos de Confort (Evans, 1988 y 2007), facilitan el proceso con la selección de estrategias en forma transparente y gráfica. Las Tablas de Mahoney, un ejemplo pionero de análisis bioclimático, identifica configuraciones y características de elementos constructivos directamente con indicadores de clima y su relación con el confort.

Recursos de diseño

La última versión de la herramienta ‘Triángulos de Confort’ adopta 10 recursos de diseño bioambiental con potencial de lograr modificaciones favorables de las condiciones de confort en espacios interiores. Cabe aclarar que algunos de los recursos no son aplicables en forma simultánea por actuar en sentido opuesto.

Los recursos extienden las limitadas estrategias en el diagrama de Olgyay, similares a las medidas adoptadas en el Diagrama Bioclimático de Givoni y su desarrollo posterior en el programa ‘Climate Consultant’. A diferencia de estos diagramas, se enfatizan los recursos que modifican la amplitud térmica interior y permiten diferenciarlos entre distintos grados de aplicación, por ejemplo, velocidad del movimiento de aire y/o grado de protección solar. La Tabla 1 presenta un análisis de las estrategias incorporadas en distintas herramientas de análisis bioclimático. Cabe aclarar que, tanto en la terminología como en la aplicación de las estrategias, se detectan diferencias de concepto y alcance.

Nota: Las herramientas incluyen:

- Diagrama de Victor Olgyay (1963; 1998).
- Tablas de Mahoney de Koenisberger et al (1970, 1976).
- Diagrama Bioclimático de Givoni (1969).
- Triángulos de Confort de Evans (1988).
- Climate Consultant de Milne et al (2009).

Tabla 1. Análisis inicial de las estrategias incorporadas en distintas herramientas de diseño bioclimático.

N°	Estrategias bioclimáticas	Amplitud	Olgay	Mahoney	Givoni	Evans	Milne
1	Ventilación cruzada		x	x	x	x	x
2	Inercia térmica	x		x	x	x	x
3	Ganancia interna día	x				x	x
4	Ganancia interna noche	x				x	x
5	Ganancias solares	x	x	x	x	x	x
6	Ventilación diurna	x				x	
7	Ventilación nocturna	x				x	x
8	Aislación térmica			x	x	x	x
9	Protección solar	x	(x)	x	x	x	x
10	Humidificación		x		x	x	x
11	Sistemas activos						x

La Tabla 1 también indica la importancia de analizar las estrategias de diseño bioambiental que modifican la amplitud térmica interior. Algunas de ellas, tales como las ganancias solares y ganancias internas de día tienden a acentuar la amplitud, mientras otras, como la inercia térmica y las ganancias internas nocturnas, moderan o disminuyen la amplitud.

El gráfico de los Triángulos de Confort indica la temperatura media de un día típico en escala horizontal, mientras la escala vertical indica la amplitud térmica, diferencia entre temperatura máxima y mínima.

Los 12 puntos representan la distribución típica de las condiciones en los 12 meses del año. El triángulo truncado (color rojo) indica la combinación de condiciones térmicas, promedio y amplitud de temperatura, que aseguran las condiciones de confort. Los puntos de las condiciones térmicas exteriores que se encuentran en el Triángulo de Confort son 'confortables', aunque en la mayoría de los climas es necesario modificar las condiciones para lograr confort.

Para ello, se consideran distintas actividades con sus requerimientos de confort, actividades sedentarias, descanso, circulación en espacios interiores y uso de espacios exteriores, siendo la actividad sedentaria la alternativa más crítica y típica en espacios interiores. A continuación, se presenta una breve síntesis de las 10 estrategias de diseño bioclimático incluidas en los Triángulos de Confort y la planilla electrónica de aplicación.

Estrategias de diseño

Ventilación cruzada

Este recurso corresponde al movimiento de aire sensible sobre el cuerpo de los usuarios de espacios interiores que promueve el refrescamiento, especialmente en climas cálidos y húmedos. El movimiento de aire a alto nivel cercano al cielorraso no es efectivo, mientras el movimiento con muy baja velocidad no llega a producir un efecto sensible de refrescamiento. A su vez, la ventilación cruzada difiere de la ventilación selectiva presentada abajo. Tampoco es la ventilación mínima necesaria en todos los espacios interiores para lograr una adecuada renovación de aire, sin impacto térmico sobre las condiciones ambientales interiores o en el

efecto de refrescamiento. En ese contexto, la siguiente Tabla 2 indica los criterios de ventilación cruzada a adoptar.

Tabla 2. Niveles de ventilación cruzada.

Nivel	Sin brisa	Brisa leve	Brisa	Brisa fuerte
Velocidad	< 0,5 m/s	0,5 a 1,0 m/s	1,0 a 1,9 m/s	> 2,0 m/s
Refrescamiento	No sensible	0,7° C	1° a 2° C	> 2,0 m/s

Inercia térmica

Los materiales de alta densidad y gran capacidad térmica actúan como una ‘esponja térmica’ recibiendo calor cuando aumenta la temperatura del aire en contacto con la superficie y restituyendo el calor cuando la temperatura disminuye. Este flujo de calor, entrando y saliendo del material, modera la variación de la temperatura interior. Esta capacidad es especialmente favorable cuando se utiliza en combinación con ganancias solares o ventilación selectiva.

Tabla 3. Niveles de ventilación cruzada.

Nivel	Sin inercia	Inercia leve	Inercia normal	Gran inercia
Construcción	Muy liviana	Mediana	Densa	Muy pesada
Admitancia	< 2,9 W/m ² C	3 a 3,9	4 a 4,9	> 5 W/m ² C

Nota: la admitancia térmica, medida en Watts por metro cuadrado por grado de diferencia de temperatura, es un indicador de la capacidad que presenta un elemento constructivo para recibir y almacenar calor cuando la temperatura aumenta, y restituir el calor al aire al disminuir la temperatura.

Ganancias internas, nocturnas y diurnas

Los espacios con ganancias internas nocturnas incluyen dormitorios ocupados mientras que las aulas de escuelas tienen ocupación y ganancias metabólicas en horas diurnas. Si bien ambos casos de ganancias internas contribuyen a aumentar la temperatura interior, las ganancias nocturnas tienden a reducir la amplitud térmica, mientras las ganancias diurnas aumentan la amplitud térmica.

Ganancia solar

El ingreso de radiación solar a través de ventanas y sistemas solares pasivos permite aumentar la temperatura interior respecto al exterior. Sin embargo, este calentamiento solar también tiende a aumentar la amplitud térmica interior. Por eso, se recomienda combinar la ganancia solar con alta inercia de los elementos interiores y de la envolvente edilicia. Ello evidencia una característica de la ganancia solar, la posibilidad de lograr eficaz protección estival cuando resulte necesaria, combinada con buena captación en meses de baja temperatura.

Tabla 4. Niveles de protección solar.

Nivel	Sin sol	Limitada	Intermedia	Mínima
Horas de sol	Protección total	Hasta 2 horas parciales	De 2 a 4,9 horas de sol	> 5 horas de sol

Ventilación selectiva diurna

La temperatura exterior, creciente en horas diurnas, y la ventilación en horas de mayor temperatura, pueden aprovechar esta diferencia en condiciones favorables para aumentar la temperatura media interior. La ventilación parcial durante las horas de luz natural también ayuda a controlar el riesgo de condensación y contenido de humedad del aire interior. La ventilación selectiva aprovecha una diferencia de temperatura entre aire interior y exterior para modificar la temperatura interior, mientras la ventilación cruzada con aire interior y exterior a la misma temperatura logra refrescamiento con la evaporación de transpiración y disipación de calor de la piel por convección.

Ventilación selectiva nocturna

En épocas de altas temperaturas, la ventilación nocturna produce un impacto opuesto, reduciendo la temperatura interior media. Por la misma razón, esta estrategia es más eficaz cuando se combina con gran inercia térmica.

Aislación térmica

Las estrategias que potencian el aporte solar y aprovechan las ganancias internas y la ventilación selectiva diurna son más eficaces cuando se combinan con la aislación térmica para conservar el calor en el espacio interior. La Tabla 5 indica los niveles de aislación térmica, aunque ellos deben responder a las condiciones exteriores que, con inviernos más largos y extremos, requieren menor transmitancia térmica.

Tabla 5. Niveles de aislación térmica.

Nivel	Mínimo	Limitado	Intermedio	Alto
Transmitancia	Sin aislantes o cámara de aire	< 1,3 W/m ² K en techos y 1,8 en muros.	Alrededor de 1 W/m ² K.	< 0,5 W/m ² K o menor en climas fríos.
Construcción	Mínima	Construcción convencional	Con aislantes livianos	Aislación liviana

Protección solar

Aleros, postigos, pérgolas con vegetación y cortinas de enrollar, proporcionan protección del efecto de calentamiento solar. Este beneficio, en horas de calor en estaciones estivales, dependen del tamaño, orientación y elementos complementarios de las aberturas. Se definen a tal fin 4 niveles de protección, desde 'total sin ingreso de radiación solar' a 'sin protección'.

Humidificación

La humidificación del aire produce una reducción de la temperatura con refrescamiento evaporativo. Este recurso es indicado cuando la temperatura del aire es alta y la humedad relativa es baja. Con alta humedad relativa, el efecto de refrescamiento es reducido. La planilla en los 'Triángulos de Confort' permite probar distintas combinaciones de recursos bioclimáticos y verificar su eficacia. A veces, se detectan combinaciones alternativas que logran similares beneficios. Con la identificación de estrategias se pueden establecer los elementos, combinaciones y soluciones a distintas escalas, desde el diseño urbano a los detalles constructivos.

Componentes y elementos de diseño

Las decisiones de diseño, especialmente en las primeras etapas del proceso proyectual, afectan las condiciones ambientales de las edificaciones y sus habitantes. El confort y bienestar de los usuarios, así como la demanda de energía, y la posibilidad de evitar o reducir la dependencia en la potencia requerida de acondicionamiento artificial, depende de:

Entorno: características del sitio y terreno, topografía, ruidos, accesos, tejido urbano abierto o compacto.

Forma edilicia: altura, orientación y volumetría, relación con otros edificios.

Espacios exteriores: carácter, tamaño, orientación, vegetación, suelo.

Vegetación: tipo, tamaño, crecimiento, follaje, proyección de sombras.

Envolvente edilicia: materiales, componentes, funciones, color exterior.

Ventanas: tamaño, orientación, ubicación, tipo de vidrio, forma de accionar.

Elementos adicionales: parasoles, aleros, pérgolas, postigos, cortinas interiores y exteriores.

Espacios interiores: materiales, color y disposición de muros.

En síntesis, todas las decisiones de diseño se relacionan con las estrategias bioclimáticas necesarias para lograr efectivo acondicionamiento natural y nivel de eficiencia energética en el acondicionamiento térmico. Otro requisito relevante de las herramientas para proyectistas es la posibilidad de visualizar la relación entre condiciones exteriores existentes, clima, con todas sus variaciones diarias y estacionarias, condiciones deseables de confort térmico o zona de confort y la manera en la cual el diseño logra producir modificaciones favorables del clima para alcanzar o acercarse a la zona de confort.

Ejemplos de aplicación

Transfiriendo la teoría a la práctica proyectual, se presenta a continuación una serie de ejemplos de la aplicación de los Triángulos de Confort en distintos climas: desde lat. 0 sobre el Ecuador, a latitudes intermedias en México en el Hemisferio Norte, y altas de la Patagonia, en el Hemisferio Sur, Figura 2.

En cada caso, se presenta el diagrama de los Triángulos de Confort con datos de amplitud térmica y temperatura media mensual a lo largo de un año. Dicho diagrama indica la modi-

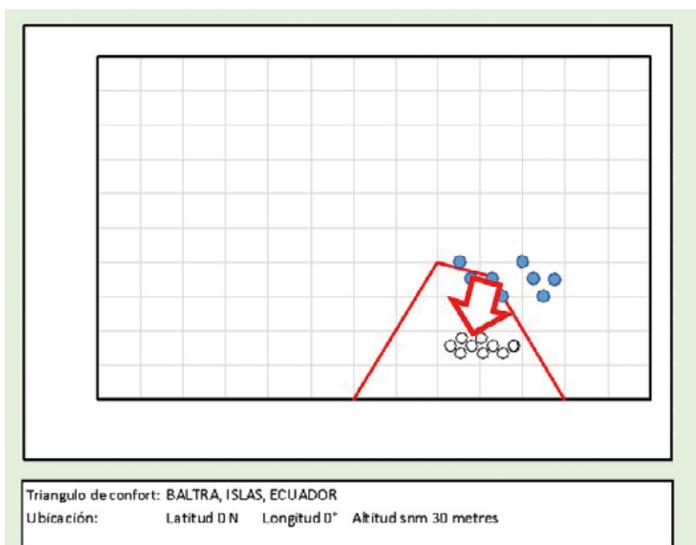
ficación favorable de las condiciones interiores aplicando los recursos apropiados de diseño bioambiental. Las flechas de los diagramas indican el cambio de la amplitud térmica y la temperatura media mensual.

En este marco, la Figura 2 expone a continuación ejemplos de proyectos que responden a las pautas de diseño y a las características principales del clima de la localidad.



Figura 2. Localidades seleccionadas para mostrar la aplicación de los Triángulos de Confort, y ejemplos de proyectos de arquitectura que integran estrategias apropiadas.

Islas Galápagos, Ecuador



Estrategias:

- Ventilación cruzada.
- Limitada inercia térmica.
- Aislación térmica en techos.
- Ganancias internas.
- Ventilación selectiva de noche.
- Protección solar total.

Confort:

con acondicionamiento natural en días típicos.

Figura 3. Aplicación de los Triángulos de Confort en las Islas Galápagos.

Por su ubicación sobre la línea del Ecuador a nivel del mar, la variación de temperatura media es muy limitada, entre 23 y 28° C con valores máximos en el límite superior de confort. La amplitud térmica media mensual es muy baja, con valores entre 6 y 8° C. Con protección solar, se evitan aumentos de la temperatura, mientras con ventilación nocturna y ventilación cruzada se logra un efecto de refrescamiento equivalente a una reducción de la temperatura media interior de 2-3° C.

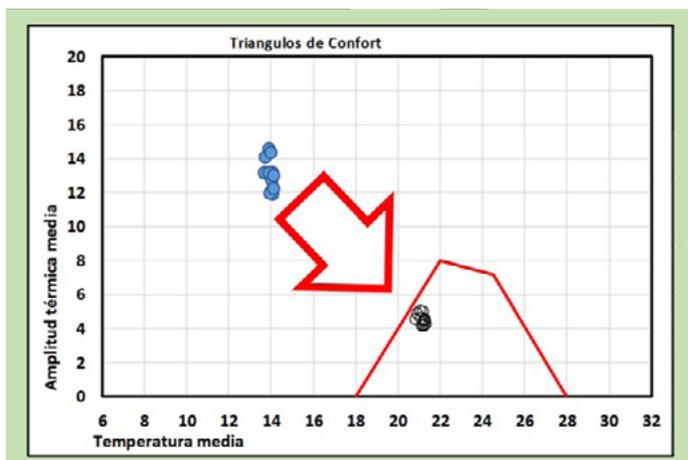
El proyecto de la terminal de pasajeros del Aeropuerto Ecológico Seymour, principal punto de ingreso a las Islas Galápagos, incorpora estas estrategias con éxito al evitar el uso de acondicionamiento artificial mecánico.

Otro edificio es una vivienda con buena protección solar y ventilación cruzada, donde las mediciones de temperatura indican temperaturas confortables en base a criterios de acondicionamiento térmico natural.



Figura 4. Terminal de Pasajeros, Islas Galápagos.

Quito, Ecuador



Estrategias:

- Ventilación mínima.
- Importante inercia térmica.
- Aislación térmica.
- Ganancias solares.
- Ganancias internas.

Confort:

con acondicionamiento natural en días típicos.

Figura 5. Aplicación de los Triángulos de Confort en clima ecuatorial de altura.

El clima de Quito, a 2850 metros de altura sobre el nivel del mar y latitud 0° sobre la línea del Ecuador, presenta las siguientes características climáticas: muy limitada variación de la temperatura promedio mensual durante el año, con valores inferiores a la zona de confort térmico, alrededor de 14° C, y alta amplitud térmica media mensual, entre 12 y 15° C.

Las temperaturas identificadas en una unidad de vivienda o departamento que responde a las estrategias recomendadas fueron registradas durante distintos periodos del año. Las temperaturas siempre se encontraban dentro de los límites de confort, adecuado para actividades sedentarias.

Como indica el gráfico, las temperaturas interiores durante el periodo de una semana típica, varían entre 20 y 24° C, comprendidas dentro de los límites de confort, mientras las temperaturas exteriores oscilaban entre 15 y 20° C. En el periodo total de un año, la vivienda se mantuvo dentro de los límites de confort, sin requerir utilizar calefacción ni refrigeración.

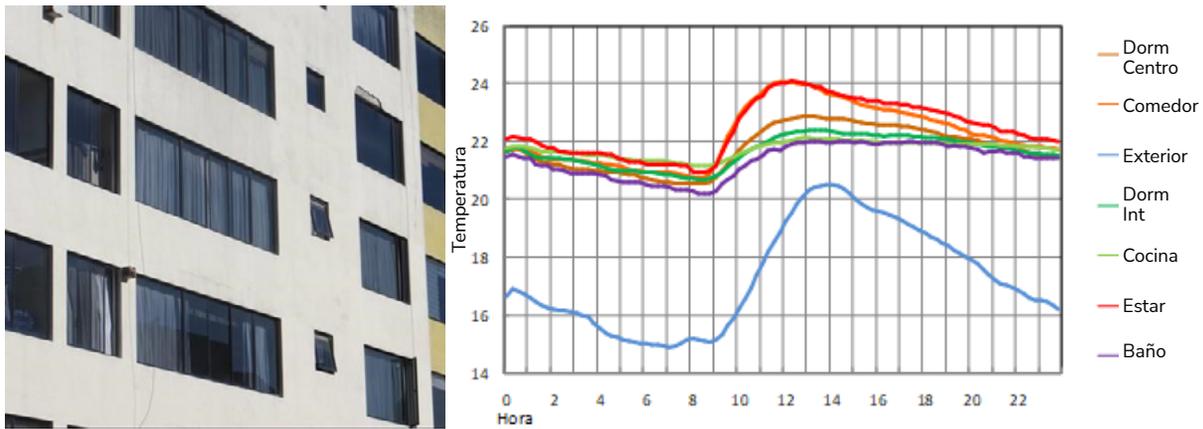
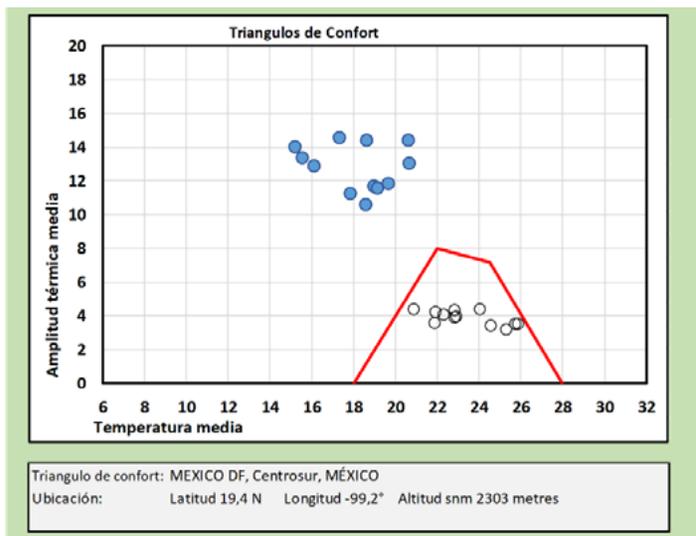


Figura 6. Departamento en Quito, con mediciones horarias de temperatura interior y exterior, valores promedio durante 7 días.



Estrategias:

- Gran inercia térmica.
- Aislación térmica.
- Ganancias internas.
- Ventilación selectiva de día.
- Ganancias solares moderadas.

Confort: con acondicionamiento natural en días típicos.

Figura 7. Aplicación de los Triángulos en la Ciudad de México.

Ciudad de México

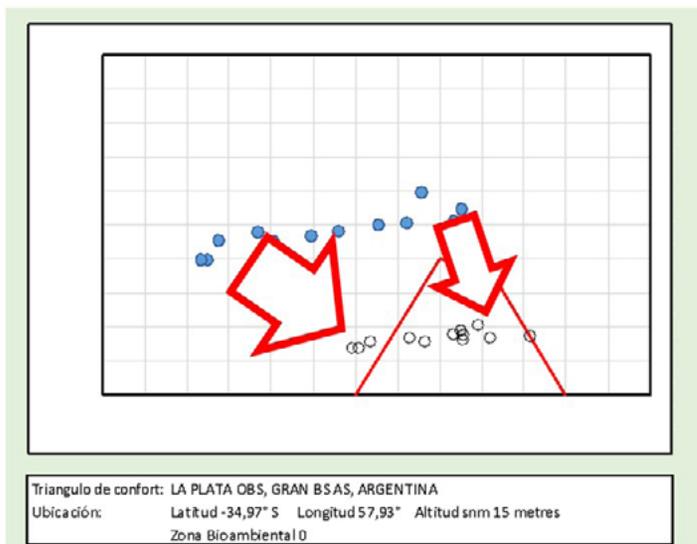
Por su altura, latitud y lejanía al mar, el clima de la Ciudad de México presenta limitada variación mensual, con promedios mensuales entre 15 y 21° C, gran amplitud térmica, de 10° a 14° C, y temperaturas medias levemente inferiores al nivel de confort. Aplicando las estrategias seleccionadas en los Triángulos de Confort, es posible mantener condiciones confortables durante días típicos en todos los meses del año.

Dos ejemplos de proyectos icónicos de la Ciudad de México adoptan estas estrategias, que también se encuentran en la arquitectura colonial: la Terminal 2 del Aeropuerto de México y la vivienda del Arq. Barragán.



Figura 8. Terminal 2 del Aeropuerto de México y la vivienda de Barragán.

Casa Curuchet, Le Corbusier, La Plata, Prov. de Buenos Aires, Argentina.



Estrategias:

- Moderada inercia térmica.
- Gran aislación térmica
- Ganancias internas.
- Ventilación selectiva según época del año.
- Ganancia solar invernal y protección solar estival.

Confort o fresco: con acondicionamiento natural en días típicos.

Figura 9. Aplicación de los Triángulos de Confort en la Ciudad de La Plata.

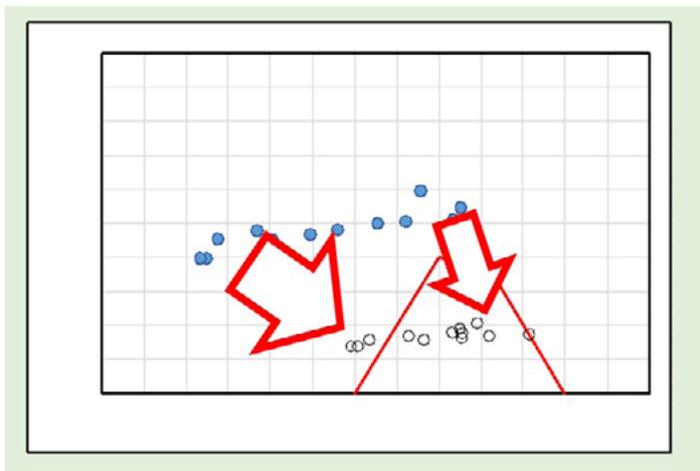
Por su cercanía al Río de la Plata, su baja altura sobre el nivel del mar y latitud, y moderada amplitud térmica promedio de la ciudad, entre 8 y 12° C, la variación de temperatura promedio abarca una mayor variación, entre 10° C en invierno y 23° C en verano. Así, se muestra que, si bien las condiciones exteriores son frías en invierno, resultan ser confortables a cálidas en verano.

Las mediciones en la Casa Curuchet, obra del Arq. Le Corbusier, adopta gran inercia térmica, protección solar y ventilación selectiva. Sin embargo, el nivel de aislación térmica es inadecuado. Si bien en verano las mediciones indican condiciones confortables, en invierno las estrategias de diseño logran aumentar la temperatura en solo 4° C, mejorando las condiciones sin alcanzar confort.



Figura 10: Fachada principal de la Casa Curuchet con el uso novedoso del Brise Soleil y alero en la terraza abierta, Arq. Le Corbusier.

Posada 'Los Mimbres', Gaiman, Prov. de Chubut, Argentina



Estrategias:

- Gran inercia térmica.
- Buena aislación térmica.
- Ganancias internas.
- Ventilación mínima.
- Ganancias solares en invierno y protección solar en verano.

Confort o fresco:

con acondicionamiento natural en días típicos.

Figura 11. Aplicación de los Triángulos de Confort en Gaiman y Trelew, Chubut.

El clima frío de la Región Norte de la Patagonia, latitud 43° S, presenta muy alto promedio mensual de amplitud térmica, con valores entre 11 a 15° C. Al mismo tiempo, la variación de la temperatura media mensual es muy alta, con 7° C mínimo en invierno, mientras el máximo de verano alcanza los 21° C, aunque la mayoría de los meses presentan temperaturas inferiores a la zona de confort.

Con la aplicación de estrategias bioclimáticas de diseño, se lograron condiciones interiores confortables en 7 meses del año, considerando valores promedios. En los otros meses, la temperatura media es menor al mínimo nivel de confort, en solo 3 meses con promedios inferiores a 18° C.

De este modo, implementando estrategias bioclimáticas de diseño e incorporando muy buena aislación térmica y alta inercia, sumado a la captación solar en invierno y protección en verano con amplios aleros, se mantiene un adecuado nivel de confort con limitada calefacción en los picos invernales.

Las mediciones y simulaciones indican que se logran adecuadas condiciones de confort durante la mayoría de los meses del año, con buen control de la amplitud térmica con 4° C interior, comparado con 15° C de temperatura exterior.



Figura 12. Fachada N en verano, con amplio alero para protección solar.

Resultados

Los Triángulos de Confort, como herramienta de diseño, permiten seleccionar estrategias de diseño en las etapas iniciales del proceso proyectual y realizar evaluaciones durante distintas etapas. Cabe aclarar que la planilla solamente utiliza datos de la temperatura máxima y mínima, promedio mensual. Además, si bien indica la tendencia de modificar y moderar las

temperaturas interiores, no es un instrumento de simulación o indicador preciso de combinaciones de estrategias. Ello es admisible en las etapas iniciales de diseño, cuando el proyectista todavía no cuenta con suficientes definiciones constructivas y arquitectónicas detalladas.

Los ejemplos de edificaciones en distintos climas identifican las estrategias de diseño y demuestran su potencial capacidad de integración en el proyecto, fundamentando su implementación. En todos los casos, el comportamiento térmico de los proyectos fue verificado con mediciones y/o simulaciones.

La aplicación de los Triángulos de Confort también fue probada en cursos de Grado en la Carrera de Arquitectura y a nivel Posgrado en maestrías, seminarios y cursos de Actualización y Especialización. Las experiencias realizadas en diversos países de la región y distintas localidades en Argentina han sido muy positivas, habiendo contribuido en forma directa a la ampliación y mejoramiento de la planilla. Los resultados confirman su utilidad y potencian la implementación en una amplia gama de climas, desde latitud 0 en la línea del Ecuador, a climas fríos de latitudes altas, incluyendo climas de altura y continentales con gran amplitud térmica. Cabe notar que esta herramienta complementa otras guías que ayudan a seleccionar estrategias proyectuales en las etapas iniciales de diseño.

La contribución de esta herramienta incluye 3 aspectos de la modificación favorable de las condiciones térmicas con acondicionamiento natural:

- **Hace énfasis en las variaciones diarias de temperatura**, aspecto clave en el comportamiento dinámico de manejo de flujos de calor en la implementación de criterios bioclimáticos en arquitectura, tanto a estrategias de calentamiento tales como ganancias solares y ventilación selectiva diurna, como estrategias de refrescamiento como ventilación nocturna.
- **Posibilita la visualización** de las condiciones interiores a través del diseño y las alternativas de modificación y adecuación según se requiera.
- **Demuestra** que los resultados de la aplicación de estrategias de diseño bioclimático para lograr acondicionamiento natural son distintos en diferentes meses, como indican los gráficos de La Plata (Figura 8) y Trelew (Figura 10). En los meses más fríos, la modificación es principalmente calentamiento con un aumento de la temperatura media interior, mientras que en verano es más importante la reducción de la amplitud térmica.

Así, la selección de recursos de diseño apropiado en las etapas iniciales del proceso proyectual puede contribuir al desarrollo de una arquitectura de bajo impacto ambiental, mínima demanda de energía convencional y máximo aporte del acondicionamiento natural en el marco del desarrollo sustentable.

Referencias

- Banham, R. (1969). *The architecture of the well-tempered environment*, Architectural Press, London.
- Evans, J. M. (2001). Las Tablas de Mahoney y los Triángulos de Confort, en Actas CO-TEDI, Maracaibo.
- Evans, J. M. (2003). *Evaluation comfort with varying temperatures: a graphic design tool*, *Energy & Buildings*, vol. 35, pp 87-93.
- Evans, J. M. y de Schiller, S. (1988). *Diseño Bioambiental y Arquitectura Solar*, Ediciones Previas, EUDEBA, Buenos Aires.
- Evans, J. M. (2007). *The Comfort Triangles, a new tool for bioclimatic design*, *Technical University of Delft, Delft, (PhD Thesis)* <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uu-id%3A5a12f90e-2e07-4ba7-b21f-1da81c5c523a>
- Evans, J. M. (2023). *A Pathway to Comfort by Natural Conditioning: Selecting Bioclimatic Design Resources*, pp 157-174, in Marín-Restrepo et al, Eds. (2023) *Removing Barriers to Environmental Comfort in the Global South*, Springer, Cham.
- Fuentes Freixanet, V. A. (2004). *Clima y Arquitectura*, Universidad Autónoma Metropolitana, México D.F.
- Givoni, B. (1969). *Man, Climate and Architecture*, Elsevier, London.
- IEA (2019). *Global Status Report for Buildings and Construction 2019*, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>.
- Koenigsberger, O. H., Ingersol, J., Mayhew, A. & Szokolay, S. (1976). *Manual of Tropical Housing and Building, Part 1: Climatic Design*, Longmans, London.
- Koenigsberger, O. H., Mahoney, C. & Evans J. M. (1970). *Climate and House Design, Design of Low-Cost Housing and Community Facilities, Volume 1*, United Nations, New York.
- Milne, M., Liggett, R., Benson, A. & Bhattacharya, Y. (2009). *Climate consultant 4.0 develops design guidelines for each unique climate*, in 38th ASES National Solar Conference 2009, SOLAR 2009. 8. 4559-4593.
- Nicol, F. (2000). *International standards don't fit tropical buildings: what can we do about it*, in Gonzalez, E. et al, Eds. (2000), *Memorias, COTEDI 2000*, Universidad del Zulia, Maracaibo.
- Nicol, F., Humphreys, M., Sykes, O. & Roaf, S. (1995). *Standards for thermal comfort: indoor air temperature standards for the 21st century*, Chapman and Hall, London.
- Olgay, V. (1963). *Design with Climate, Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism, Chapter 2*, Princeton University Press, Princeton N. J.
- Olgay, V. (1998). *Arquitectura y Clima, Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*, GG Barcelona.

Sostenibilidad de la construcción con tierra entramada

Luis Fernando Guerrero Baca¹

1 Profesor investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Xochimilco

Resumen

La construcción con tierra entramada es una de las técnicas que utiliza al suelo como materia prima que menor atención ha recibido por investigadores, arquitectos e instituciones relacionadas con el desarrollo de vivienda. Este sistema, que se desarrolló en todo el mundo desde la más remota antigüedad, ha pasado desapercibido o incluso sido discriminado a pesar de que ha logrado mantenerse vigente en diversos territorios hasta la fecha, lo que es evidencia de su sostenibilidad. El presente artículo busca destacar la serie de cualidades que presenta la construcción con tierra entramada no sólo como un patrimonio biocultural sino, sobre todo, como recurso para la solución de las necesidades de espacios habitables que resulten compatibles con el entorno natural. Parte de la información expuesta ha surgido de estudios realizados desde hace más de treinta años en sitios prehispánicos del norte de México, Perú y El Salvador, de viviendas tradicionales de México, Nicaragua y Venezuela, así como estructuras contemporáneas de Ecuador, Chile y Colombia. Como se detallará en las siguientes líneas, la combinación de la tierra con componentes de origen vegetal ha permitido la generación de estructuras que resultan ligeras, dúctiles y relativamente fáciles de elaborar y reparar en caso necesario, lo que les confiere valores para su ejecución tanto en los entornos rurales, de los que ha sido parte desde hace siglos, como también de zonas urbanas en las que, de una manera económica y ecológica, se puede vincular a sistemas contemporáneos de edificación.

Palabras clave: Bajareque, fibras vegetales, estabilización, compatibilidad material, flexibilidad estructural.

Abstract

Fiber-framed earth construction is one of the techniques that uses soil as a basic raw material that has received less attention by researchers, architects, and institutions related to housing development. This system, which has been used throughout the world since ancient times, has gone unnoticed or has even been discriminated against even though it has managed to remain in various territories to date, which is evidence of its sustainability. This article seeks to highlight the series of qualities that latticed earth construction presents, not only as a biocultural heritage but above all as a resource for solving the needs of habitable spaces that are compatible with the natural environment. Part of the information presented has emerged from studies carried out over thirty years ago in pre-Hispanic sites in northern Mexico and El Salvador, traditional dwellings in Mexico, Nicaragua, and Venezuela, as well as contemporary structures in Ecuador, Chile, Colombia and Peru. As will be detailed in the following lines, the combination of earth with components of vegetal origin has allowed the development of structures that are light, ductile and relatively easy to elaborate and repair, which gives them values for their execution both in the rural environments to which it has belonged for centuries, as well as urban environments in which in an economic and ecological way it can be linked to contemporary building systems.

Keywords: *Wattle and daub, vegetable fibers, stabilization, material compatibility, structural flexibility.*

Introducción

La tierra fue el recurso material más empleado para la edificación desde la época precolombina en México y el resto de Iberoamérica. Con este material se levantaron pirámides, templos, palacios, juegos de pelota, fortalezas, depósitos y, sobre todo, viviendas. Se trata de obras destacadas por la manera en que resolvieron durante siglos las necesidades de las sociedades mediante el empleo racional de los recursos naturales que les ofrecía el medio, lo mismo en zonas desérticas que tropicales, montañosas, costeras, lacustres e incluso sísmicas. La construcción con tierra ha probado ser altamente eficiente por la posibilidad de ser adaptada a diversos tipos de climas, pero también a condiciones telúricas adversas debido a que permite contar con estructuras dúctiles.

Esta cualidad resulta especialmente destacada en el caso de los sistemas que además de contar con tierra como componente básico, incorporan el apoyo de una trama de origen vegetal que, a diferentes escalas, conforma una especie de esqueleto que equilibra la respuesta natural que desarrolla la tierra a diversos tipos de esfuerzos. Este recurso ha sido aplicado en muros, entresijos y cubiertas de espacios habitables, consiguiéndose envolventes que dan cobijo y seguridad al ser humano.

Aunque se trata de una lógica constructiva que se manifestó en diversas regiones del orbe, en cada una de ellas adoptó características formales y estructurales singulares como resultado del tipo de material vegetal que conformó los entramados.

Al combinarse la tierra y fibras vegetales de diferentes diámetros se desarrolla una sinergia que resuelve la vulnerabilidad constructiva de ambos componentes. Los materiales térreos soportan de manera más eficiente los esfuerzos de compresión que los de flexión. En cambio, la paja, el carrizo o las varas tienen baja capacidad de carga, pero son muy apropiados para resistir la tracción y las deformaciones sin romperse. De este modo, si los componentes constructivos de tierra se “refuerzan” con fibras vegetales, ramas, varas, rajas de bambú o cualquier otro recurso similar, se generan estructuras dúctiles, estables y duraderas (Gue rrero, 2017). Ejemplos destacables de la durabilidad del sistema se localizan en las ruinas prehispánicas de la ciudad de Caral en el centro del Perú, donde se han podido fechar estructuras anteriores al año 2500 a.C. (Shady *et. al.*, 2009, p. 9) cuyo nivel de preservación sorprende sobre todo si se toma en cuenta la elevada sismicidad de la región y sus adversas condiciones climatológicas (Figura 1).

Otra ventaja de la simbiosis del material vegetal con la tierra se deriva de la protección que ésta le otorga a la materia orgánica que, como es sabido, puede ser alterada o incluso destruida en presencia del agua, como consecuencia del crecimiento de parásitos, bacterias o microflora que debilitan sus células hasta consumirlas. Sin embargo, si las fibras o componentes leñosos se protegen superficialmente con materiales térreos, el sistema tiene la propiedad de mantener estables sus rangos de humedad interna pues la presencia de arcillas propicia la evapotranspiración que regula la cantidad de agua presente. Si el microclima es demasiado húmedo los sistemas con tierra absorben el exceso de agua del ambiente, y en el polo opuesto, si los ambientes son muy secos la tierra deja salir vapor de agua hasta llegar



Figura 1. Restos de muros de tierra entramada con más de cuatro mil años de antigüedad. Caral, Perú.

Fuente: Fotografía de L. Guerrero.

a un punto de equilibrio. Entonces los vegetales integrados a la tierra no se ven impactados por las modificaciones ambientales conservando su integralidad y respuestas estructurales durante largos periodos de tiempo.

Las diversas estrategias de entramar la tierra permanecieron casi sin cambios en las regiones en las que se desarrollaron, una vez que las sociedades alcanzaron las soluciones mejor adaptadas a sus necesidades y con el aprovechamiento más racional de los recursos naturales locales. Sin embargo, lamentablemente, de manera similar a lo que ha pasado con otras culturas constructivas vernáculas, muy poca información sobre los procesos que permitieron su materialización ha llegado a nuestros días, pues al tratarse de actividades que una parte importante de las sociedades dominaba, nunca se previó la necesidad de ser documentadas. Siempre fueron saberes de dominio público.

Esta ausencia de referencias históricas ha limitado su transferencia intergeneracional puesto que sólo se desarrollaba a partir de la propia práctica, lo que hace que la única fuente fiable sobre los sistemas constructivos originales sean los propios vestigios antiguos. Empero, además de haber despertado muy poco interés por parte de la arqueología por encontrarse en áreas no monumentales de los sitios históricos, suelen estar fuertemente alterados por haber dejado de recibir las acciones de mantenimiento que les daban sus habitantes originales.

En las regiones en las que afortunadamente las comunidades locales no han interrumpido la práctica de su empleo en la edificación, es posible contrastar la semejanza que presentan

con respecto a vestigios arqueológicos, como ha sucedido por ejemplo en el sitio de Joya de Cerén, en El Salvador.

En este destacable yacimiento que fue sepultado por las cenizas provenientes de erupciones volcánicas que tuvieron lugar alrededor del siglo sexto, se pueden identificar las dimensiones de los espacios habitables, las huellas de las cañas de refuerzo y los restos de los zócalos y esquineros sobre los que se implantaban las casas (Carazas, 2014). La forma de las viviendas (Figura 2), el tamaño de los componentes constructivos y la articulación con los espacios abiertos dedicados al trabajo y la siembra, son notablemente parecidos a los que se siguen realizando en las zonas emparentadas con las culturas de origen maya de Yucatán, Chiapas, Guatemala y Honduras.



Figura 2. Evidencias arqueológicas de casas de tierra entramada. Joya de Cerén, El Salvador.

Fuente: Fotografía de L. Guerrero.

El análisis de las obras existentes –antiguas o recientes–, da pistas para la comprensión del funcionamiento estructural y éxito de este sistema, y, sobre todo, propicia su puesta en valor tanto en regiones en las que la tradición constructiva sigue vigente en pequeñas obras vernáculas o en grandes edificios, como sucede por ejemplo en la ciudad de Cuenca en Ecuador, donde afortunadamente la edificación con sistemas entramados permanece viva y es parte de los valores que hacen que sea considerada Patrimonio Cultural de la Humanidad por UNESCO.

Desarrollo constructivo

Es muy probable que el origen de la construcción con tierra entramada supere los seis o siete mil años de antigüedad, y que haya surgido cuando las comunidades iniciaron su paso de la vida nómada a la sedentaria. El hombre primitivo que vivía de acechar animales y recolectar plantas y frutos para alimentarse, habitaba abrigos naturales, o bien, generaba albergues provisionales. Estos habitáculos se creaban con materiales fáciles de transportar como estereras, pieles y ramas, en combinación con componentes locales de simple obtención y transformación, como piedras, varas, paja, hojas y, desde luego, tierra.

Como reseñaba Vitruvio desde principios de nuestra era, “los hombres han recibido de la naturaleza [...] la aptitud de hacer con gran facilidad con sus manos y los órganos de su cuerpo todo cuanto se proponen, comenzaron unos a procurarse [...] imitando los nidos de las golondrinas con barro y ramas recintos donde poder guarecerse. Luego, otros, observando los techos de sus vecinos y añadiéndoles ideas nuevas fueron de día en día mejorando los tipos de sus chozas. Y como los hombres son por naturaleza imitadores y dóciles, haciendo alarde cada día de sus nuevas invenciones, se mostraban unos a otros las mejoras de sus edificaciones, y ejercitando su ingenio fueron de grado en grado mejorando sus gustos. Al principio plantaron horcones, y entrelazándolos con ramas, levantaron paredes que cubrieron con barro [...] Podemos explicarnos que esto pasó así en sus orígenes, como hemos dicho, porque hoy mismo lo vemos en algunas naciones, como en Galia, en España, en Lusitania y en Aquitania. Por su parte los Frigios, que habitan una región llana y carente de bosques, como por esta razón no disponen de madera, buscan altozanos a los que van excavando interiormente [...] y poniendo pértigas unidas unas con otras, hacen conos que revisten con cañas y paja que cubren con gran cantidad de tierra. Logran con esta especie de cubierta proporcionarse viviendas calientes en invierno y frescas en verano[...]” (Vitruvio, 1985, p.p. 36-37).

Lo que no vislumbró Vitruvio debido a su visión “evolucionista”, que suponía que estas formas de construcción conformaban “etapas de desarrollo” de la arquitectura, era que durante los dos siguientes milenios a la época en que él vivió, la mayor parte de la sociedad siguiera edificando de la misma forma. Las cualidades del empleo de la tierra, las varas, el carrizo y la paja no han perdido su vigencia, a pesar del vertiginoso desarrollo de los materiales constructivos y estilos arquitectónicos.

Aunque en México son escasos los datos materiales que permiten fechar el origen de esta práctica, diversas referencias indican que, durante la época Preclásica, es decir, desde unos 1700 años antes de nuestra era, “las tribus vivían en pequeños poblados rústicos formados por chozas desparramadas. Estas habitaciones primitivas eran rectangulares y construidas con el sistema conocido bajo el nombre de bajareque” (Bernal, 1984, p. 30).

En el poblado de Etna, en el estado de Oaxaca, se han encontrado restos de habitaciones levantadas hacia el año 1250 a.C. Se trata de “construcciones de un solo cuarto con un altar y recubrimientos de lodo y limo en los pisos, los escalonamientos de acceso y una parte de las paredes están hechas con la técnica de bajareque” (Fernández, 1997, p. 20).

Pero, contrario a lo que suele pensarse respecto a que este tipo de viviendas corresponden solamente a regiones templadas y tropicales, en el norte de la República Mexicana y suroeste de Estados Unidos, se han encontrado diversas combinaciones del uso de la tierra y entramados de fibras vegetales. Un ejemplo destacable que llegó a alcanzar una vigencia de varios miles de años fueron las llamadas *pit houses* que tienen un sorprendente parecido con las casas excavadas que describía Vitruvio y que eran techadas mediante combinaciones y superposiciones de tramas de maderas y ramas de diferentes diámetros, para ser finalmente selladas con lodo (Figura 3).



Figura 3. Reconstrucción hipotética de una *pit house* en la zona arqueológica de Mesa Verde, Colorado, E.U. Foto disponible en https://www.americansouthwest.net/colorado/mesa_verde/step-house-pithouse_L.html.

En función de los requerimientos habitables y bioclimáticos, en regiones de Sonora, Chihuahua y Durango en México, sociedades emparentadas con las que habitaron Mesa Verde, desarrollaron casas en las que se combinaba también la tierra, piedras, troncos y varas entramadas, con las que se realizaron diversos conjuntos habitacionales que destacan tanto por su alto grado de conservación como por presentar dos o más niveles de altura.

Se trata de estructuras que emplearon seguramente procesos evolutivos basados en ensayos y errores que les permitieron depurar una tecnología gracias a la cual, la combinación de tierras arcillosas con zacate picado y secciones de madera amarrada con fibras extraídas de las hojas de diferentes agaváceas, conformaron sistemas altamente complejos con los que se edificaban muros, entrepisos y techos. Un caso que ha sido cuidadosamente documentado es el de la llamada Cueva del Maguey en el estado de Durango, en el que viviendas de hace más de mil años dan la impresión de haber sido edificadas muy recientemente (Punzo, 2007).

Conviene hacer notar que estos sistemas constructivos de ninguna manera constituyen una singularidad presente sólo en la región del norte del país. En realidad, se trata simplemente de variantes de obras ampliamente desarrolladas y difundidas en todo el actual territorio nacional, pero que en estos casos han podido llegar hasta nuestros días en un destacable estado de integralidad como consecuencia de la estabilidad del medio ambiente en el que se encuentran, gracias a su localización dentro de abrigos rocosos (Figura 4).



Figura 4. Viviendas prehispánicas realizadas con secciones de madera atada y embarrada. Cueva del Maguey, Durango.

Fuente: Fotografía de L. Guerrero.

Se han documentado estructuras entramadas en zonas montañosas, desérticas, tropicales y en la mayor parte de las regiones costeras. Aunque las especies vegetales que conforman los entramados cambien, la lógica constructiva guarda notables semejanzas, seguramente porque se encuentra emparentada con la cestería, que es una de las actividades de origen más primitivo en el desarrollo de las civilizaciones. La conformación de retículas de fibras gruesas, entretejidas o atadas mediante cuerdas aprovechaba de forma muy racional los diferentes materiales vegetales locales.

Con el correr de los años y a pesar del impacto cultural que significó la conquista española, la eficiencia de esta forma de edificar siguió sustentando el desarrollo de espacios habitables, aunque destinándose sobre todo a las familias de menores recursos económicos. Las personas que podrían acceder a la compra o elaboración de adobes paulatinamente perdieron su cultura constructiva ancestral, pero se sabe que, a finales del siglo XVIII, diversos cronistas españoles hablaban todavía de la permanencia de esta técnica. Por ejemplo, Mariano Fernández de Echeverría y Veytia escribía que “Los indios... eran más diestros en edificar con maderas que de mazonería, porque una gran parte de sus casas, tanto en el Imperio Mexi-

cano como en las Provincias de Tlaxcala, Cholula y las demás eran de madera revocadas de lodo por dentro y fuera y blanqueadas” (Kubler, 1984, p. 154).

En regiones en donde las tradiciones de los pueblos originarios tenían sus raíces profundamente ancladas, muchas comunidades construían con sistemas entramados no sólo sus casas sino también edificios públicos, comercios, haciendas y templos. Ejemplos muy notables perviven en varias zonas del estado de Chiapas, como sucede en Tuxtla Gutiérrez y Comitán, así como en Nicaragua, Guatemala y El Salvador. En Nicaragua la técnica recibe el nombre de “taquezal” y, al igual que sucede en otras zonas sísmicas de Centroamérica, se edifica a partir de un doble entramado de madera, que confina la cara exterior e interior de gruesos muros de tierra, casi siempre combinada con piedras y pedacería de ladrillo (Figura 5).



Figura 5. Proceso de restauración de una vivienda colonial de dos niveles de “taquezal” en Granada, Nicaragua.

Fuente: Fotografía de L. Guerrero.

Presente y futuro

Como ya se mencionó, una de las cualidades de la construcción con tierra entramada radica en el trabajo combinado de diferentes componentes que tienen la propiedad de resultar física y químicamente compatibles y complementarios. Es importante hacer notar que, en este sistema constructivo, la tierra no constituye un simple relleno de los huecos de los entramados, o una protección para la madera y la paja, sino que desarrolla un papel unitario en el que, al igual que sucede con el concreto armado, los esfuerzos de compresión los absorbe la tierra y el entramado soporta la tracción y flexión. Al colocarse la madera y fibras en diferentes sentidos, se reparten de manera uniforme esas tensiones y se garantiza la unidad estructural del conjunto.

La tierra ocupa la mayor parte del volumen edificado y requiere tener una adecuada resistencia, pero también una buena adherencia, porque de esta cualidad depende la correcta

unión que mantiene con los materiales que conforman los entramados. Esta propiedad cohesiva de la tierra se deriva de la presencia de las arcillas, que son minerales que contienen básicamente silicio, aluminio, hidrógeno y oxígeno, y que están organizados dentro de una estructura cristalina basada en pequeñas plaquetas o micelas que, dependiendo de su antigüedad y coexistencia con otros elementos químicos, pueden presentar formas planas y lisas, o rasgos más amorfos.

Las arcillas no desarrollan fuerzas de atracción con las arenas y gravas de la tierra, sino que simplemente las envuelven al “encadenarse” entre ellas mismas al estar fuertemente unidas por fuerzas electrostáticas combinadas con fuerzas de Van Der Waals. La presencia del agua les permite desarrollar fenómenos de atracción o repulsión, dependiendo de la cantidad presente de dicho líquido. El material en estado seco puede permanecer estable a lo largo de milenios, pero al momento en que los volúmenes de agua se incrementan, los componentes pierden su cohesividad y es posible modificar la forma del sistema para amasarlos y combinarlos con otros ingredientes a fin de alterar sus cualidades originales. Resulta increíble pensar que la resistencia y durabilidad de la tierra no procede de reacciones químicas como las que desarrollan, por ejemplo, las mezclas de cal, yeso o cemento, sino que se trata simplemente de fenómenos físicos de atracción electromagnética entre estos pequeños cristales que se encuentran repartidos dentro del sistema.

Pero no todas las arcillas desarrollan respuestas similares al hidratarse, sino que unas son más reactivas que otras, con lo que su adherencia, permeabilidad y retracción al secarse cambia radicalmente.

Las propiedades de los suelos están en función de los tipos de arcillas que contengan y de las proporciones relativas de sus componentes (Guerrero, 2007). Si la tierra es arenosa, a pesar de poseer gran estabilidad ante los cambios de humedad o temperatura, la falta de actividad de las arcillas la hará frágil y será presa fácil de la erosión. En cambio, una tierra arcillosa tiene una alta cohesión, pero cuando se seca, sufre una disminución volumétrica que se manifiesta en el agrietamiento de sus superficies, y en casos extremos, hasta de su interior (Figura 6).

Entonces, los sistemas constructivos de tierra entramada requieren de la presencia de arcillas potentes y reactivas, pero, para equilibrar su agrietamiento la mayor parte de las culturas constructivas han acudido a la introducción de fibras vegetales que conforman una especie de red interna que limita la capacidad de movimiento del lodo durante su retracción por secado y, además, le confieren al sistema ligereza y ductilidad.

Los materiales fibrosos pueden provenir de pajas de diferentes pastos y gramíneas, acículas de pináceas, cáscaras de coco, hojas secas de bambú o de agaváceas.

La escala mayor del sistema de entramado lo conforma la especie de esqueleto que queda integrado dentro de las capas de lodo que se colocan gradualmente durante la ejecución de la edificación. Existe una enorme diversidad de formas de armar esta trama, así como de atarla o entretejerla, pero los principios de funcionamiento del armado interno son similares.



Figura 6. El agrietamiento es la manifestación de la fuerza y actividad de las arcillas que permiten que la tierra se adhiera al entramado de madera. Cojitambo, Ecuador.

Fuente: Fotografía de L. Guerrero.

En algunas partes del mundo las varas, ramas, rajás de bambú o carrizos se colocan paralelamente en forma vertical, pero en otros sitios se atan de manera horizontal e incluso es frecuente ver el desarrollo de sistemas cuadrículados. Aunque podría pensarse que el conjunto queda mejor reforzado entre más cerca se entretejan o amarren los carrizos o varas, la realidad es que la separación entre componentes juega un papel importante porque, por una parte, se facilita la aplicación del lodo por ambas caras, pero además el hecho de que éste, en combinación con las fibras atraviesen al conjunto, ayuda a unificar el sistema. Al secar todo alcanza una notable unidad y ningún componente tiene posibilidades de desplazarse (Figura 7).



Figura 7. Estructura con entramado cuadrículado para un baño seco realizado en un taller infantil en Zautla, Puebla.

Fuente: Fotografía de L. Guerrero.

Hay entramados en cuadrícula en los que las varas se llegan a separar hasta 10 o 15 cm. Éste es el caso de las estructuras tradicionales de Japón en las que la trama conformada por listones extraídos de culmos de bambú se entretejen formando una retícula con módulos cuadrados, confinada por marcos de madera. La técnica que se conoce con el nombre de *tsuchikabe* o *komaikabe* tiene como rasgo destacable el hecho de que la mezcla de lodo y paja de arroz que se emplea para rellenar la retícula se suele dejar reposar por más de seis meses, de modo que se fermentan las fibras en combinación con las arcillas fuertemente disgregadas por la presencia del agua. Esta pasta se vuelve sumamente pegajosa por lo que se puede colocar en delgadas capas sobre el entramado con la ayuda de una llana, consiguiéndose acabados lisos y delgados, lo que lógicamente hace que los muros resulten muy ligeros (Fukada, 2021).

Como se ha mencionado a lo largo del texto, las estructuras entramadas configuran esquemas muy estables que, gracias a la flexibilidad de sus componentes y la articulación de sus nodos, son altamente eficientes en regiones sísmicas. El “esqueleto” que soporta las cargas del conjunto permite un amplio rango de deformaciones, de manera que, al presentarse un terremoto, los edificios oscilan, pero difícilmente colapsan (Figura 8).



Figura 8. En la arquitectura de origen colonial del Puerto de La Vela en Venezuela, los entramados se forman con carrizos colocados de manera horizontal y atados a pies derechos.

Fuente: Fotografía de L. Guerrero.

Por la facilidad que representa la ejecución de las obras es muy frecuente la conformación de secciones modulares a las que progresivamente se les van incorporando varas o carrizos más delgados que finalmente se embarran.

La cimentación, tiene que repartir adecuadamente las cargas al terreno, pero, sobre todo, sirve para aislar al sistema de la humedad que podría ascender por capilaridad o a consecuencia de las salpicaduras de la lluvia. Es por ello que, tradicionalmente se prolonga con un zócalo o sobrecimiento que rebasa el nivel del terreno natural 30 o 40 cm e incluso más, en regiones con altos niveles freáticos o en climas lluviosos.

Las varas o carrizos han de quedar bien unidos para incrementar la rigidez de la estructura y evitar deformaciones paulatinas debidas a sobrecargas, vibraciones o efectos sísmicos. Con el objeto de impedir la deformación o agrietamiento de las superficies, antes de iniciar la aplicación de la tierra, la estructura portante de la construcción se arma por completo, procediéndose incluso a su techado, de modo que exista una protección ante la intemperie durante la edificación.

El entramado es revestido con lodo adicionado con fibras vegetales por ambas caras, en delgadas capas sobrepuestas. No es conveniente colocar grandes volúmenes de barro sobre el entramado porque seguramente se deslizará por su propio peso y además, es más probable que sufra agrietamientos derivados de la diferencia en la velocidad de secado de su núcleo, con respecto a sus superficies.

La separación entre las varas permite que el barro de la primera capa –que suele ser realizada con lodo más arcilloso y con fibras más largas– atraviese de lado a lado la estructura y recubra la madera en grosores de dos a tres centímetros.

Una vez que esa primera capa ha secado se aplica una intermedia, que puede estar constituida por un material ligeramente más arenoso que se puede estabilizar además con fibras cortas. Finalmente, las superficies embarradas son cubiertas con una capa delgada de tierra que al secar se comprime y pule con una piedra o llanas metálicas. En algunos sitios esa capa se protege con una lechada de pintura de cal con su color blanco natural, o bien, teñida con pigmentos minerales. Es obvio que en cada sitio se aprovechan los materiales locales para configurar las estructuras portantes, muros y cubiertas, pero la lógica edilicia vernácula es prácticamente la misma (Guerrero, 2009).

Los nodos se han reforzado tradicionalmente con amarres de material vegetal flexible o con tiras de cuero. Sin embargo, recientemente se ha vuelto frecuente la introducción de componentes metálicos, tales como clavos, pernos, pijas o alambre.

Estas aportaciones, derivadas de la incorporación de nuevos materiales que conservan la lógica constructiva del sistema, han abierto un amplísimo campo de acción para generar obras contemporáneas, económicas y ecológicas. La posibilidad de combinación, casi infinita, de las formas de las superficies entramadas permite hacer estructuras rectas, bóvedas *vaídas* conocidas generalmente como “geodomas” o “domocañas”, superficies alabeadas para muros y techos, así como paneles prefabricados para todo tipo de usos (Figura 9).

Este último recurso tecnológico, que ha tenido muy amplia difusión en la zona andina, se conoce como *paneles de quincha* y ha permitido realizar proyectos de muy diversas escalas de actuación, e incluso de varios pisos (Predes, 2008). El sistema cuenta con evaluaciones



Figura 9. Aplicación de la capa de lodo a una bóveda tipo domocaña realizado en un taller práctico en la Universidad de Colima en Coquimatlán.

Fuente: Fotografía de L. Guerrero.

técnicas, sumamente cuidadosas, que han llevado, por ejemplo, para el caso peruano, a la aceptación legal como *Sistema Constructivo No Convencional*, con normas y especificaciones precisas denominadas bajo la clave R.D.N°001-84-VC-9602 que permiten la obtención de licencias de construcción (Tejada, 2001).

Los paneles se unen a postes de madera y ambos se asientan sobre cimientos de bloques de concreto, ladrillos o piedras, para lograr una transmisión homogénea de cargas al terreno y garantizar el aislamiento de la humedad freática. Los paneles constan de un bastidor rectangular de madera con subdivisiones de refuerzo que sirven de marco para el tejido de rajas de bambúceas. Estos marcos tienen la ventaja de estar modulados y, por lo tanto, permitir el desarrollo de paños sólidos, así como espacios para puertas y ventanas que posibilitan una gran libertad creativa para resolver los problemas de habitabilidad.

Estos paneles se montan sobre anclas que se dejan previamente en la cimentación, cuando se trata de plantas bajas o de vigas soleras de coronamiento, si se van a edificar plantas superiores (Figura 10).

Al igual que sucede con el resto de los sistemas térreos, si se construye de manera adecuada y se realiza el mantenimiento necesario, esta técnica satisface con creces las condiciones de cualquier otro sistema convencional, pero con la invaluable ventaja de la preservación del medio natural y cultural.

Finalmente es digna de destacar una obra que recientemente ha sido realizada en el predio denominado Las Ánimas, en Tulyehualco, que administra la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco y que consiste en un par de aulas demostrativas que resultan sumamente originales para el caso de la Ciudad de México debido a que constituyen casos exitosos de rescate del uso de entramados en la edificación contemporánea. En esa región



Figura 10. Paneles parcialmente cubiertos con barro para permitir la vista del entramado en la parte superior. Se insertaron botellas como recurso estético y de iluminación en la zona baja. Panadería Dulce Peligro, San Agustín Etla, Oaxaca.

Fuente: Fotografía de L. Guerrero.

del sur de la capital mexicana, desde la época prehispánica y todavía hasta mediados del siglo XX existía una tradición de edificación de viviendas que empleaba entramados y lodo, que demostraron su sostenibilidad para esa zona fangosa conformada por islotes realizados artificialmente con madera, piedras y lodo, que desarrollan terrenos de siembra y habitación. Estos sistemas de asentamiento que se conocen con el nombre de “chinampas” transmiten su peso al fondo del lago mediante el hincado de postes del árbol llamado ahuejote (*Salix bonplandiana*) por lo que resultan vulnerables a los hundimientos diferenciales, de manera que las viviendas realizadas con sistemas ligeros como la tierra entramada fueron una solución plenamente adecuada.

Con ese antecedente, el Dr. Francisco Javier Soria López llevó a cabo el diseño y obra de esas aulas en las que se usaron entramados realizados con tiras de bambú a las que se les conoce como “regletas o latillas” con las que se entretejieron los muros y columnas, así como las armaduras de alma abierta que soportan las cubiertas inclinadas e incluso la superficie de apoyo de éstas, las cuales fueron finalmente techadas con láminas industrializadas hechas de materiales reciclados.

Entre las diversas aportaciones tecnológicas materializadas en estas obras cabe resaltar el empleo de culmos de bambú partidos longitudinalmente en “medias cañas” y atornillados por pares en sus secciones convexas dentro de lo que el autor de la obra ha denominado “polín de bambú” (Soria y Guerrero, 2019). Esta estrategia, sumada al empleo de las “latas” para conformar los paneles de carga vertical y horizontal, permiten optimizar el empleo del bambú al aprovechar componentes que no necesariamente cumplen con los estándares

requeridos para su trabajo estructural unitario pero que al unirse de manera articulada mediante tornillos y, sobre todo, recubrirse con tierra arcillosa estabilizada con paja, adquieren una destacable estabilidad, con bajo impacto ambiental y menor costo de ejecución en comparación con sistemas convencionales (Figura 11).



Figura 11. Proceso de ejecución de la segunda aula en el terreno de Las Ánimas, en Tulyehualco, al sur de la Ciudad de México.

Fuente: Fotografía de L. Guerrero.

Conclusiones

La edificación con tierra entramada ha demostrado su amplia sostenibilidad por el hecho de haber sido utilizada durante milenios para realizar de estructuras de varios niveles, y seguir vigente hasta el día de hoy.

Aunque en nuestro país es reconocida su presencia en zonas templadas y tropicales existen evidencias de su implementación con diferentes variantes en todo el territorio nacional, especialmente en áreas de alta sismicidad en las que ha mostrado tener un adecuado comportamiento gracias a su ductilidad. Además, los sistemas de tierra entramada se traducen en estructuras sumamente livianas, que para el caso de terrenos con baja capacidad de carga resultan una excelente solución.

Por otra parte, la esbeltez de las paredes permite un óptimo aprovechamiento de los emplazamientos, factor que se vuelve crucial en las zonas urbanas en donde los predios cada vez son más reducidos y el costo por metro cuadrado es *más elevado*. Es interesante que a pesar de esta limitación en su grosor y la consecuente reducción de su masividad, la mezcla de tierra, paja, madera y carrizos producen espacios confortables por el equilibrio higrotérmico que se alcanza gracias al aire contenido en sus componentes y a la evapotranspiración de las arcillas.

La innovación derivada del uso de casi cualquier tipo de entramado genera un gran avance tecnológico que le da alta viabilidad para su uso en diferentes sectores sociales; tanto en el ámbito rural como urbano. Asimismo, se propician procesos de autoconstrucción asistida de vivienda con recursos técnicos apropiados y apropiables que demandan poco esfuerzo físico y gasto económico.

Otra ventaja de esta técnica radica en su posibilidad de conexión con estructuras preexistentes que fueron realizadas con materiales que se consideran incompatibles con los muros de adobe, tierra amasada y tapial, como sucede con los marcos rígidos de concreto armado o las estructuras de acero. En el caso que se requiera rellenar los espacios confinados por dichos sistemas es posible anclar, atornillar o amarrar con alambre, superficies de tierra entramada a las columnas y traveses, sin que se presente una “competencia dañina” entre estos componentes. En estos casos es recomendable la presencia de marcos de madera que sirvan como “puente de transición”, a fin de amortiguar la diferencia en las capacidades de carga y coeficientes de dilatación del concreto o el acero, con respecto a los muros de tierra entramada (Figura 12).



Figura 12. Estructura de concreto armado rellena con muros de tierra entramada en el CEDE-IMDEC, Guadalajara, Jalisco.

Fuente: Fotografía de L. Guerrero.

Bajo esta misma lógica, el uso de componentes entramados como recurso para la conservación y restauración del patrimonio edificado representa una solución no solamente para las estructuras antiguas hechas de tierra cruda, sino para la consolidación de edificios de piedra o ladrillo.

Paneles de diferentes tamaños pueden emplearse para rellenar huecos, para recuperar volúmenes erosionados, unir mamposterías e integrar subdivisiones verticales u horizontales. De este modo se aprovecha la compatibilidad de la tierra con diversos materiales de origen histórico, generando intervenciones totalmente reversibles, como lo marcan los actuales principios de la preservación patrimonial.

Por ello, en la Universidad Autónoma Metropolitana, desde hace varias décadas se han hecho constantes esfuerzos por documentar, analizar y enseñar esta técnica, en paralelo con otros sistemas de edificación histórica. La idea es conformar un bagaje que permita la correcta intervención en el patrimonio que aún se conserva y, paralelamente, desarrollar alternativas de diseño y construcción sostenible para obras presentes y futuras (Guerrero, 2015).

La tierra como componente constructivo se analiza, prioritariamente, tanto por sus valores materiales e inmateriales, como para dar continuidad a las tradiciones constructivas locales. Estos criterios se vinculan con los objetivos de la *Chaire UNESCO "Architectures de terre, cultures constructives et développement durable"* con la que la UAM-Xochimilco ha firmado un convenio que está vigente desde 2012. Este acuerdo compromete a la institución a realizar labores de investigación y docencia —especialmente de posgrado— tendientes a favorecer la recuperación y el uso contemporáneo de la tierra en la edificación, y a prever acciones sostenibles de conservación, caracterizadas por la búsqueda del equilibrio entre la naturaleza y las comunidades herederas del patrimonio.

De este modo se cumplen los cometidos esperados del diseño ecológicamente responsable y la conservación sostenible del patrimonio. Se logra dotar de espacios habitables mediante obras con bajo impacto ambiental que aprovechan los materiales y mano de obra local, para contribuir en el mejoramiento de la calidad de vida de la sociedad (Figura 13).



Figura 13. Cocina realizada por la agrupación llamada Cooperación Comunitaria, A.C. con la técnica conocida como Bajareque Cerén (Carazas, 2021) en Ixtepec, Oaxaca.

Fuente: Fotografía de L. Guerrero.

Referencias

- Bernal, Ignacio (1984). *Tenochtitlán en una isla*. México D.F.: SEP.
- Carazas, Wilfredo (2014). *Bahareque Cerén*. San Salvador: Misereor-Cáritas.
- Carazas, Wilfredo (2021). *Construir con Bajareque Cerén. Experiencias en el contexto de Oaxaca, México*. CDMX: Cooperación Comunitaria. A.C.
- Fernández, Enrique (1997). "San José Mogote, Etlá." *Arqueología Mexicana*, 5(26), p.p. 18-23.
- Fukada, Makoto (2021). *A Traditional Japanese House with a Jointed Wooden Frame and Tsuchikabe Walls: the Kamogawa House in Chiba*. *Journal of Traditional Building, Architecture and Urbanism*, 2, p.p. 38-57.
- González, Alleck y Guerrero, Luis (2022). Bajareque tecnificado. Evaluación de energía incorporada y emisiones de CO₂ en comparación con la edificación convencional. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 6(11), p.p. 9-21.
- Guerrero, Luis (2007). "Arquitectura en tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva". *Revista Apuntes*, 20(2), p.p. 182-201.
- Guerrero, Luis (2009). La tecnología constructiva de la vivienda vernácula. En *De tierra y varas*. Querétaro: Gobierno del Estado de Querétaro. p.p. 14-19.
- Guerrero, Luis (2015). Sostenibilidad y conservación del patrimonio edificado. *Revista Palapa*. Vol. 3,1(17). p.p. 73-84.
- Guerrero, Luis (2017). Pasado y porvenir de la construcción con bajareque. *Revista Gremium*, 4(8), p.p. 69-80.
- Kubler, George (1984). *Arquitectura mexicana del siglo XVI*. México D.F.: F.C.E.
- Predes (2008). *Construyendo viviendas con quincha mejorada*. Lima: Centro de estudios y prevención de desastres. Disponible en http://bvpad.indeci.gob.pe/download/eventos/CD_Foro_Vivienda/Publicaciones/PREDES/Manual%20Quincha%20Mejorada.pdf
- Punzo, José Luis (2007). Arquitectura de tierra en sitios arqueológicos de la Sierra Madre de Durango, En Guerrero, Luis (Coord). *Patrimonio construido con tierra*, UAM-Xochimilco pp. 21-30.
- Shady, Ruth et. al. (2009). *Caral. La civilización más antigua de las américas: 15 años develando su historia*. Lima: Instituto Nacional de Cultura.
- Soria, Francisco Javier y Guerrero, Luis (2019). Polín de bambú ensamblado: diseño alternativo para la construcción de estructuras ligeras, *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*. No. 25, pp. 84-95.
- Tejada, Urbano (2001). *Buena tierra. Apuntes para el diseño y construcción con adobe*. Lima: CIDAP.
- Vitrúvio (1986). *Los diez libros de la arquitectura*. Traducción directa de latín de Agustín Blánquez. Barcelona: Iberia.

Índice de habitabilidad gerontológica con base en estudio de campo

Kattia García-Morales¹, Gonzalo Bojórquez-Morales²,
Carmen García-Gómez²

1 Profesor investigador de la Universidad Autónoma de Baja California
correo: kattia.garcia@uabc.edu.mx

2 Profesor investigador de la Universidad Autónoma de Yucatán
correos: gonzalobojorquez@uabc.edu.mx, ggomez.carmen@correo.uady.mx

Resumen

Los adultos mayores tienen necesidades específicas propias de este grupo poblacional. Para 2050, una de cada cuatro personas que viven en Europa y América del Norte podría tener 65 años o más. En 2018, por primera vez en la historia, las personas de 65 años o más superan en número a los niños menores de cinco años en todo el mundo. Se estima que el número de personas de 80 años o más se triplicará, de 143 millones en 2019 a 426 millones en 2050. El objetivo de este estudio fue desarrollar una propuesta de ámbitos e indicadores con base en la revisión crítica de estudios, métodos y normas dirigidas al diseño y habitabilidad para el adulto mayor. Se recopiló y revisó fuentes de información especializada, así como normas de referencia internacional. Se obtuvo como resultado una propuesta de indicadores que contemplan los ámbitos físico, psicológico y social. Aún cuando existe una visión que contempla este sector de la población, el desarrollo de acciones aisladas no considera las necesidades reales de habitabilidad para los adultos mayores. Se requiere atender no solo aspectos específicos, sino tratar de manera conjunta aspectos físicos, psicológicos y sociales.

Palabras clave: Habitabilidad, gerontología, adulto mayor.

Abstract

Elders have specific needs for their population group. By 2050, one in four people living in Europe and North America could be 65 or older. In 2018, for the first time in history, people aged 65 and over will outnumber children under the age of five worldwide. It is estimated that the number of people aged 80 years and over will triple, from 143 million in 2019 to 426 million in 2050. The objective of this study is to develop a proposal for areas and indicators based on the critical review of studies, methods and standards aimed at design and habitability for the elderly. Specialized information sources as well as international reference standards were compiled and reviewed. The result was a proposal of indicators that contemplate the physical, psychological, and social fields. However, even when there is a vision that contemplates this sector of the population, the development of isolated actions does not consider the real needs of habitability for the elderly. It is necessary to consider not only specific aspects, but also to jointly treat physical, psychological, and social aspects.

Keywords: Habitability, gerontology, elderly people.

Introducción

El envejecimiento de la población es un fenómeno donde varias generaciones conviven en un mismo lapso, lo cual es un momento único en la historia de la humanidad (Martínez Pérez et al., 2018). Para 2050, una de cada cuatro personas que viven en Europa y América del Norte podría tener 65 años o más. En 2018, por primera vez en la historia, las personas de 65 años o más superan en número a los niños menores de cinco años en todo el mundo. Se estima que el número de personas de 80 años o más se triplicará, de 143 millones en 2019 a 426 millones en 2050 (ONU, 2019). Para la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018) los entornos físicos y sociales, en particular las viviendas y su comunidad, así como las características de índole personal como el sexo, etnia y nivel socioeconómico son algunos de los factores que influyen en el envejecimiento saludable.

El Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía prevé una proyección similar, ya que la tendencia al envejecimiento se presenta a partir de finales de la primera mitad del siglo XX y en el siglo XXI se refleja en una esperanza de vida de 73.4 años (periodo 2005-2010), por lo que la transición demográfica ha sido acelerada y el envejecimiento es un tema de desafíos para las sociedades ya que la proporción de personas mayores de 65 años se triplicará entre 2000 y 2050, año en el que uno de cada cinco latinoamericanos formará parte de este grupo de edad (CEPAL, 2007). La habitabilidad es una categoría esencial del espacio que integra tanto lo físico, como lo psicológico y social, sin perder de vista su relación con los procesos medioambientales (Espinoza & Gómez, 2010). Lo anterior indica que es necesario reconocer y prever la solución a necesidades específicas, sobre todo de este grupo poblacional mencionado, entre ellos el de la habitabilidad en los espacios que utilizan diariamente.

Existen esfuerzos de instituciones y organismos nacionales e internacionales que discuten criterios de carácter global, sin llegar aún en lo particular a consideraciones claras. Se necesitan incluir en las políticas públicas, la observación y aplicación de indicadores de habitabilidad en la vivienda para un sector poblacional específico como es el caso de los adultos mayores, tanto en el ámbito público como en el privado y plantear criterios que permitan que vivan en un lugar adecuado respecto a sus necesidades físicas, psicológicas y sociales.

El objetivo de este estudio fue analizar los requerimientos de habitabilidad de la vivienda para adultos mayores con base en el espacio habitacional y el análisis de relaciones físicas, mentales y sociales en la ciudad de Mexicali, Baja California para incorporar alternativas enfocadas a sus necesidades. Se realizó una recopilación estructurada de información especializada sobre: métodos de diseño, normatividad, programas de apoyo y estudios específicos. Con esa base se realizó un estudio de campo con 30 casos de análisis de vivienda de adultos mayores. Los resultados obtenidos presentan una realidad diferente a la planteada en la idealización de programas de apoyo, donde se muestra la necesidad de trabajos integrales de tipo transdisciplinarios que permitan el desarrollo de normatividad específica que conjunte aspectos físicos, psicológicos y sociales.

Envejecimiento poblacional

La población mundial está envejeciendo; la mayoría de los países del mundo están experimentando un aumento en el número y proporción de personas mayores, por lo que este fenómeno tendrá como resultado consecuencias para sectores como el mercado laboral, financiero, la demanda de bienes y servicios como vivienda, transporte, protección social, entre otros. Por lo que es importante tomar en cuenta las condiciones y características físicas de la vivienda en contraste con las limitaciones funcionales del adulto mayor, ya que, en esta etapa de la vida, se prefiere pasar gran parte de su tiempo en casa y por lo tanto es importante el adecuar el entorno para disminuir accidentes y conservar tanto su seguridad física como psicológica en su ambiente.

La creciente necesidad habitacional para los adultos mayores en Mexicali, Baja California, requiere de comprender las características de lo que se conoce como vejez, que, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), *“La vejez se caracteriza por la aparición de varios estados de salud complejos que suelen presentarse en las últimas etapas de la vida y que no se enmarcan en categorías de morbilidad específicas”* (OMS, 2018). Por primera vez en la historia, la mayoría de las personas pueden aspirar a vivir hasta más allá de los 60 años. Esto tiene profundas consecuencias para la salud y para los sistemas de salud, su personal y presupuesto (OMS, 2015).

Las Naciones Unidas, en su reporte de 2019, destacan que la población mundial se encuentra en proceso de envejecimiento, siendo el grupo de 65 o más el que crece a mayor velocidad, por lo que para 2050 dicho segmento representará al 16% de la población, es decir, una de cada seis personas en el mundo, comparado con una de cada 11 en 2019 que representa al 9% (United Nations Department of Public Information, 2019).

El Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía (CELADE) prevé una proyección similar, ya que la tendencia al envejecimiento se presenta a partir de finales de la primera mitad del siglo XX y en el siglo XXI se refleja en una esperanza de vida de 73.4 años (periodo 2005-2010), por lo que la transición demográfica ha sido acelerada y el envejecimiento es un tema de grandes desafíos para las sociedades, ya que la proporción de personas mayores de 65 años se triplicará entre 2000 y 2050, año en el que uno de cada cinco latinoamericanos pertenecerá a este grupo de edad (CEPAL, 2007).

El considerar incluir dentro de las políticas públicas, la observación y aplicación de los índices de habitabilidad en la vivienda para un sector poblacional específico de los adultos mayores, tanto en el ámbito público como en el privado, tomar en consideración los criterios y sugerencias que permitan que los adultos mayores vivan en un lugar adecuado respecto a sus necesidades físicas, psicológicas y sociales para una mejor calidad de vida.

Respecto al caso de Mexicali, INEGI (2000) indica que la población del segmento poblacional de adultos mayores se proyecta a la alza del año 2000 al 2025, el cual inicia con 7.0% hasta alcanzar 12% contrario al resto de los segmentos de población donde el grupo de edad de 0 a 14, proyecta un descenso del 31.4% al 21.3%, y el grupo de 15 a 59 años proyecta el 61.6% con 66.9% como porcentaje máximo para descender ligeramente a 66.6%, lo que muestra que el envejecimiento demográfico en la ciudad sea más notorio (Figura 1).

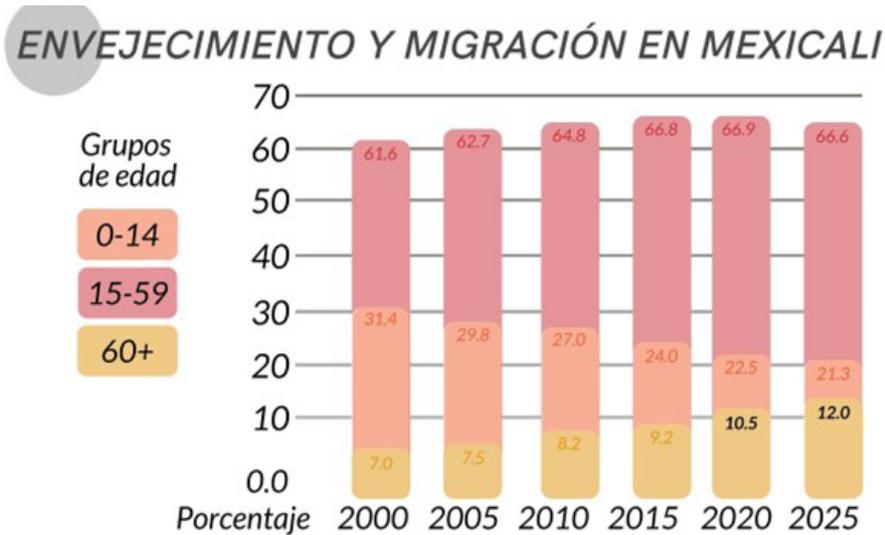


Figura 1. Envejecimiento y migración en Mexicali.

Fuente: Elaboración propia a partir de: XII Censo general de población y vivienda 2000 (INEGI, 2000), Ybáñez-Alarcón (2007).

Acerca de la evaluación del bienestar habitacional, para (Jirón et al., 2004), resulta relevante el considerar los factores físico-social (condiciones de diseño, dimensionamiento, distribución y uso), psico-social (comportamiento individual y colectivo, así como condiciones de privacidad, identidad y seguridad ciudadana), térmico (temperatura de bulbo seco, humedad relativa y riesgo de condensación en la vivienda), acústico (aislamiento acústico a la transmisión del ruido exterior) y lumínico (iluminación natural). La calidad de vida de un adulto mayor está relacionada con su entorno ambiental y afectivo, lo que incluye no sólo los cuidados de salud, la cercanía y seguridad que ofrece tanto la familia como amigos, sino que se favorezca el desarrollo autónomo e integral (Chaudhury, 2003).

Según la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC, 2011), toda persona mayor puede aspirar a mayores grados de satisfacción y bienestar, así como a mejorar su calidad de vida, se debe destacar que en los avances en la aproximación a este tema se visualizan en el cambio de enfoque que ha ocurrido en los últimos años, hoy se entiende al adulto mayor como un ser complejo y multidimensional; en cuyo bienestar influyen distintos aspectos, no solo económicos, sino también su salud, el apoyo familiar y social, el nivel de funcionalidad, su grado de participación en la sociedad y su historia de vida, entre otros factores.

Según Yanguas (2006), la calidad de vida adquiere mayor importancia en la vejez, porque en la adultez mayor se producen una serie de circunstancias que la hacen prioritaria, como el aumento de dependencia o enfermedades. Para las personas mayores el cómo se ha vivido influye en la forma de envejecer aun cuando en muchos casos no se puede impedir que progresen ciertas enfermedades o manifestaciones propias de la edad, sí se puede disminuir o retrasar la aparición de algunas de ellas para así maximizar el periodo de vida independiente en la vejez.

Diseño gerontológico

La base de desarrollo de un índice de habitabilidad gerontológica parte del diseño arquitectónico gerontológico, para ello se consultó información especializada respecto a métodos de diseño enfocado tanto a personas con limitaciones funcionales como lo es el adulto mayor. Se analizaron tres estudios especializados sobre el tema, los cuales son: a) ARQUITECTURA ANTE CAMBIOS DEMOGRÁFICOS (Rooij, 2014), b) EVOLVE (Lewis et al. 2010) y c) ENABLER (Iwarsson, 2012) (Tabla 1).

Tabla 1. Resumen de métodos de diseño gerontológico.

Fuente: Elaboración propia.

<i>Método compuesto</i>	<i>Método 1</i>	<i>Método 2</i>	<i>Método 3</i>
EHG (Encuesta de habitabilidad gerontológica).	Arquitectura ante cambios demográficos	ENABLER	EVOLVE
Visita a encuestados, adultos mayores	Se visita al adulto mayor para analizar la funcionalidad y comodidad del entorno.	Analiza los problemas de accesibilidad para adultos mayores en sus hogares.	
Toma de mediciones en casa	Las medidas se tomaron para desarrollar los modelos arquitectónicos.		Evalúa el diseño de los hogares para mejorar estados existentes.
Entrevista	Se indaga sobre los ámbitos sociales, laborales y moto-sensoriales del sujeto.	Estudia las limitaciones del individuo y las exigencias el entorno.	
Croquis de zonas peligrosas		Observaciones del ambiente actual, graduando las barreras ambientales.	Conjunto de listas de chequeo que cubre todas las áreas de un hogar.

El analizar métodos especializados de diseño para personas de la tercera edad, con diferentes contextos geográficos de desarrollo, hizo posible tener una propuesta preliminar que en su momento fue suficiente, aun cuando se esperaban cambios conforme avanzaba el estudio.

La evolución propia del IHG encontró un apoyo en el Índice de habitabilidad y cohesión social (IHACOS). Este estudio trata del desarrollo en una herramienta de evaluación para la vivienda de interés social, cubre aspectos de habitabilidad psicológica, social, espacial, térmica, lumínica, acústica, calidad del aire, consumo energético, cohesión social y habitabilidad urbana.

El método de trabajo sirvió como referente de guía para esta investigación, además de que se contó con asesoría directa del grupo de investigadores que desarrollaron IHACOS (UADY, UABC, UACJ, 2018), lo que permitió tener apoyo respecto a las ponderaciones iniciales y el uso de los instrumentos de medición especializados para medir variables ambientales. Si bien los objetivos de estudio, por población blanco, no son iguales, se tuvieron las debidas consideraciones en lo que respecta al uso, manejo y ponderación de ámbitos e indicadores (UADY, UABC, UACJ, 2018).

Habitabilidad gerontológica

El Instituto de Vivienda de la Universidad de Chile (INVI), define a la habitabilidad como el nivel de comportamiento de factores y variables espaciales y psico-sociales observables, que aluden a la relación entre comunidad y su ambiente residencial (INVI, 2005). En consecuencia, los factores relevantes para la evaluación del bienestar habitacional son de tipo físico-espacial (condiciones de diseño a su dimensionamiento, distribución y uso); psico-social (comportamiento tanto individual como colectivo: condiciones de privacidad, identidad y seguridad ciudadana); térmico (la temperatura, humedad relativa y riesgo de condensación en la vivienda), acústico (aislamiento acústico a la transmisión del ruido exterior); y lumínico (iluminación natural) para la evaluación del bienestar habitacional (Jirón et al., 2004) (Figura 2).

2.1. HABITABILIDAD	2.1.1. Espacial	2.1.4. Acústica		
	2.1.2. Térmica	2.1.5. CO2		
	2.1.3. Luminica	2.1.6. Psicosocial		
2.2. GERONTOLOGÍA AMBIENTAL	2.2.1. Adulto mayor	2.2.4. Ámbito psicológico		
	2.2.2. Ámbito social	2.2.5. Adulto mayor y la arquitectura		
	2.2.3. Ámbito económico	2.2.6. Adulto mayor y la medicina		
2.3. NORMATIVIDAD	2.3.1. ISO	2.3.4. OIT	2.3.7. British Standard	2.3.10. Ley del IMSS
	2.3.2. ASHRAE	2.3.5. OMS	2.3.8. ASTM	2.3.11. Ley de edificaciones del Estado
	2.3.3. ANSI	2.3.6. ONU	2.3.9. ONNCE	
2.4. DESARROLLO DE ÍNDICES	2.4.1. Índices	2.4.4. Evaluación		
	2.4.2. Ámbitos, indicadores y variables			
	2.4.3. Decisión multicriterio			

Figura 1. Componentes de la habitabilidad gerontológica

Fuente: Desarrollado con base en: Rooij (2014), Lewis, et al. (2010), Iwarsson, (2012) y Jirón et al., (2004)

Desde una concepción socio-física de la habitabilidad, los autores Espinoza & Gómez (2010), mencionan que la habitabilidad es una categoría esencial del espacio habitable, que integra tanto lo físico, como lo psicológico y social, sin perder de vista su relación con los procesos medioambientales. Bajo este mismo concepto, la Organización Mundial de la Salud (OMS) define a la vivienda saludable el lugar donde se logre el entorno físico, social y mental de las condiciones de salud, la seguridad, higiene, comodidad y privacidad (OMS/OPS, 2000).

Para (Bowling & Windsor, 2001) la Calidad de Vida se define en términos macro y micro, por lo que es de suma importancia la salud, la familia, los estados económicos, las conexiones sociales, las actividades relacionadas con el ocio, la vivienda y la calidad del entorno residencial para así poder mantener una Calidad de Vida buena para las personas mayores.

Según los resultados de la encuesta realizada por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, el 60% de las personas mayores elige permanecer en su vivienda en lugar de realizar actividades fuera de esta. Sin embargo, el 35% de los encuestados informa el pasar momentos de fastidio; característica que cobra relevancia, ya que tanto la inactividad como la reducción de la red vincular, potencian el aumento en el estado de ánimo, lo cual se convierte en un factor de riesgo para estos. Es necesaria la realización actividades que estimulen a las personas mayores a continuar activos, ya que esto permite que sus intereses como su red vincular permanezca activa y disminuyan posibles temores a factores externos, por lo que es necesario el contar con un espacio amigable y cómodo con el cual se identifique.

Así mismo, derivada de dicho estudio, se desprende los siguientes resultados respecto a las condiciones económicas y familiares que influyen en el apoyo a la vejez y su calidad de vida:

1. El 27% expone estar en disposición a vivir solo si es necesario, pero se contrataría a alguien para que lo cuide.
- 2.- El 23% declara que, en caso de requerir asistencia de terceros de manera permanente, preferiría vivir en un centro u hogar de adultos de la tercera edad.
- 3.- El 43% respondió la preferencia de vivir con familiares, especialmente con hijos o un amigo cercano, esto muestra la vigencia tradicional y familiar respecto a los hábitos de vida.
- 4.- Por último, el 31% de manifiesta que están dispuestos a vivir en las viviendas dirigidas a personas mayores, en consonancia con la tendencia global respecto al envejecimiento demográfico y la importancia de desarrollar proyectos acordes a este grupo poblacional; entre los aspectos a interesar se encuentra el contar con amenidades y ayuda en respecto al mantenimiento del hogar y a su vez el contar con compañía en caso de necesitar ayuda en momentos cotidianos o por algún tipo de accidente.

Materiales y métodos

La propuesta de investigación tiene como finalidad la obtención representativa de las condiciones del espacio habitado por el adulto mayor, para a partir de esta proponer las adecuaciones que generen un entorno propicio. Así mismo, se pretende generar una herramienta de evaluación (índice de habitabilidad gerontológica- IHG) que considere los ámbitos físico, psicológico y social del adulto mayor en la vivienda. Se trabajó con enfoque en diseño anidado concurrente de modelo dominante CUAN-cual, dentro del método cuantitativo se tomó la ruta de diseño experimental para puntualizar el cuasiexperimental, mientras que en el método cualitativo se tomó la ruta de estudio de caso puntualizando el estudio de caso múltiple (Figura 3).

Índice de habitabilidad gerontológica con base en estudio de campo



Figura 3. Modelo teórico del Índice de Habitabilidad Gerontológica.

Fuente: Elaboración propia

La selección de variables dependientes e independientes se llevó a cabo en base a los métodos de diseño gerontológico estudiados, así como por el trabajo de Mercado y González (1991) para evaluación de la habitabilidad, las cuales fueron: Psicosocial, motora-sensorial, térmica, lumínica, acústica, y olfativa (Concentración de dióxido de carbono CO₂). Una vez con las variables a utilizar, se determinó los instrumentos de medición requeridos: 1) Medidor de estrés térmico, 2) Anemómetro, 3) Luxómetro, 4) Sonómetro y 5) Medidor de dióxido de carbono (CO₂) (Tabla 2).

Para la Encuesta de Habitabilidad Gerontológica (EHG), se tomó como base la encuesta de "Habitabilidad ambiental en la vivienda construida en serie para ciudades de México, con base en indicadores de beneficios, impactos sociales y calidad de vida: CONAVI-CONACyT, se consideró además la revisión de tres métodos sobre estudios afines (a) ARQUITECTURA ANTE CAMBIOS DEMOGRÁFICOS (Rooij, 2014), b) EVOLVE (Lewis, et al. 2010) y c) ENABLER (Iwarsson, 2012)) y se tomó en consideración los pasos coincidentes entre estos que se adaptaran al presente trabajo de investigación.

En la versión final de la EHG se tuvieron 58 preguntas, que se estructuran en ocho ámbitos, los cuales son: 1) Información general del encuestado, 2) Información general de la vivienda, 3) Habitabilidad Psicosocial, 4) Habitabilidad Motora-sensorial, 5) Habitabilidad térmica, 6) Habitabilidad lumínica, 7) Habitabilidad acústica y 8) Habitabilidad olfativa (calidad del aire).

El diseño de la muestra se acotó a los adultos mayores con una edad entre los 60 y más de 85 años con residencia en Mexicali, quedando un total de 385 casos a analizar. Debido a la contingencia sanitaria (2020 y 2021) y por ser el grupo de interés el de mayor riesgo de morbilidad y mortalidad, solo se contó con el apoyo de 30 encuestados de manera presencial.

Tabla 2. Instrumentos de medición de condiciones de habitabilidad.

Fuente: Elaboración propia a partir de PCE Ibérica S.L. instrumentación.



Variable	Iluminación	Ruido	Medidor de estrés térmico	Medidor de dióxido de carbono	Anemómetro
Instrumento	Medidor (Luxómetro) de luz LED blanca, marca EXTECH, modelo LT40	Sonómetro (Medidor digital de nivel de sonido, marca EXTECH, modelo 407730).	Medidor de estrés térmico WGBT, marca EXTECH, modelo HT30.	Medidor de dióxido de carbono, marca EXTECH, modelo CO240.	Mini termo-anemómetro, marca EXTECH, modelo 45158
Rango de medición	999.9 lux 9,999 lux 99,990 lux 400,000 lux 99.99 Fc 999.9 Fc 9,999 Fc 40,000 Fc	40 a 130 dB (A wtg), 45 a 130 dB (C wtg)	Temperatura de globo y bulbo húmedo (TGBH) 0°C a 50°C (32°F a 122°F) Temperatura de globo negro (TG) -30°C a 550°C (-22°F a 1022°F) Temperatura de aire (TA) 0°C a 50°C (-32°F a 122°F) Humedad Relativa (RH) 0 a 100% HR Temperatura de operación 0°C a 50°C (-32°F a 122°F)	0 y 9,999 ppm	1.1 a 62.5 MPH 1.8 a 100.6 km/h 1.0 a 54.3 knots 0.50 a 28.00 m/s 100 a 5500 ft/min
Resolución	0.1 lux 1 lux 10 lux 100 lux 0.01 Fc 0.1 Fc 1 Fc 10 Fc	0,1 dB	Humedad Relativa (RH) 0.1°F/°C; 0.1% HR	Temperatura de funcionamiento 0.1 Escala de temperatura de punto de rocío 0.1 Escala de temperatura de bulbo húmedo 0.1	0.2 MPH 0.7 km/h 0.3 knots 0.01 m/s 20 ft/min
Precisión	LED blanco: ±(3% lectura+3 lux) hasta 500 lux LED blanco: ±(3% lectura)-500 lux hasta 46 Fc LED blanco: ±(3% lectura+0.3 Fc) hasta 46 Fc LED blanco: ±(3% lectura)-46 Fc	±2 dB @1kHz (bajo condiciones de referencia)	Temperatura de globo y bulbo húmedo (TGBH). Calculado de parámetros medidos Temperatura de globo negro (TG) IN ±2°C (4°F) OUT ±3°C (5.5°F) Temperatura de aire (TA) ±1°C (1.8°F) Humedad Relativa (RH) ±3% H.r. @ 25°C, 10 a 95% RH). Humedad de operación Máx. 80%RH	Precisión de CO2 ±(75 ppm + 5% de lectura) 0 a 2,000 ppm Precisión de temperatura ±1°C (1.8°F) Precisión de humedad relativa ± 5% de lectura a 25°C (77°F) o ±7% HR	± (3%rdg + 0.4 MPH) ± (3%rdg + 1.7 km/hr) ± (3%rdg + 0.6 knots) ± (3%rdg + 0.2 m/s) ± (3%rdg + 40 ft/min)

Al llegar a cada uno de los domicilios, se colocaron y calibraron los instrumentos de medición (Temperatura de bulbo seco, Humedad Relativa, Iluminación, Acústica y CO₂) conforme a ISO 7726. Después, se inició la realización de las preguntas que conforman la cédula de información y se realizó la entrevista semi estructurada para profundizar en las respuestas y tener una mejor comprensión de la toma de decisiones del habitante. Seguidamente, se tomó lectura de los datos emitidos por los instrumentos especializados y se realizó un croquis de la zona considerada más peligrosa a sufrir algún accidente en casa, así como también, se tomó evidencia fotográfica digital de la misma (Figura 4).

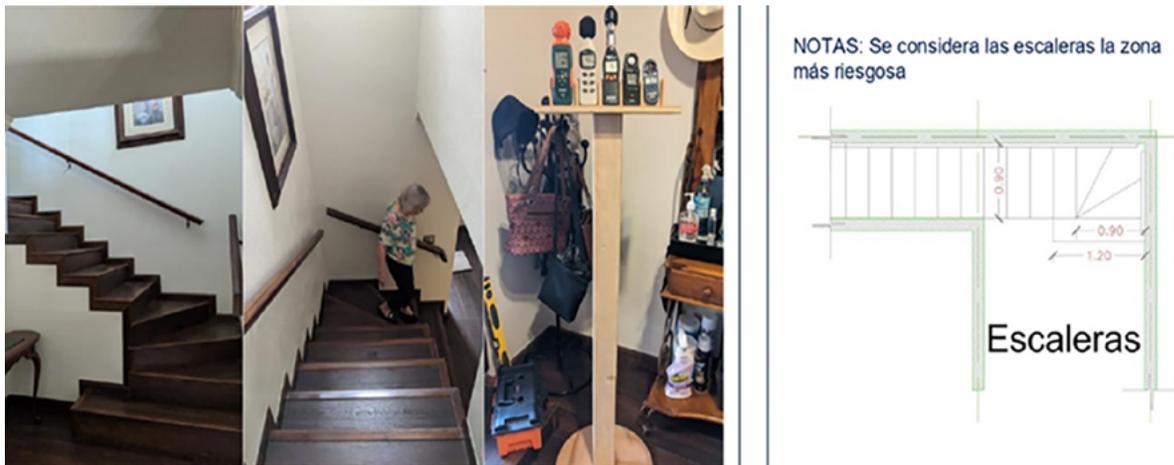


Figura 4. Imágenes de trabajo de campo y croquis de zona de riesgo.

Fuente: García-Morales, 2021

Índice de Habitabilidad Gerontológica (IHG)

El desarrollo de un índice parte del principio de que si todo se cumple el valor máximo a obtener es 1, como propuesta preliminar se inició con valores en porcentajes y su equivalente para el índice (porcentaje, ponderación). La primera versión del IHG fue desarrollada con base en el análisis de la habitabilidad en la vivienda Mercado y González (1991) que destaca por un enfoque psicológico y se basa en la percepción del habitante. La selección de este en la etapa inicial se basó en los objetivos de la investigación, además de los ámbitos e indicadores que se utilizaron para el estudio mencionado. El método permitió recabar información sobre la habitabilidad gerontológica (Tabla 3).

La segunda versión del IHG parte de métodos de diseño gerontológico, en este aspecto se analizaron tres estudios especializados sobre el tema, los cuales son: a) ARQUITECTURA ANTE CAMBIOS DEMOGRÁFICOS (Rooij, 2014), b) EVOLVE (Lewis et al. 2010) y c) ENABLER (Iwarsson, 2012).

La planeación e inicio del trabajo de campo, marcó la pauta para los ajustes en los componentes del IHG (ámbitos, sub-ámbitos, indicadores y ponderación), ante un análisis detallado de la estructura de los métodos de diseño (a) Arquitectura ante cambios demográficos (de Rooij, 2014), b) Evolve (Lewis et al., 2010) y c) Enabler (Iwarsson et al., 2012), la integración de los cuestionarios de Mercado y González (1991) en los que predominaba un enfoque psicológico de estudio y en el caso de estudio de IHACOS (UADY, UABC, UACJ, 2018), en el que el enfoque definido fue la evaluación de la habitabilidad en la vivienda, se logró la integración de una propuesta de IHG sólida donde se cubrieron las deficiencias sobre el adulto mayor y el diseño. Cabe mencionar que en lo que se refiere a la ponderación fue una parte que requirió de más ajustes después de los resultados obtenidos.

Tabla 3. Consideraciones en el diseño de la primera versión del IHG.

Fuente: Desarrollado con base en: Mercado y González (1991)

ÁMBITOS	DESCRIPCIÓN
FÍSICO Representa el 60% (0.60) de peso en la propuesta inicial y se conforma de cuatro sub-ámbitos	1.1.) Dimensión del espacio, en él se integran aspectos de habitabilidad espacial y su indicador base en el área construida en m ² , con un valor de ponderación del 15% (0.15). 1.2.) Acústica, tiene como base la habitabilidad acústica y su indicador base es el ruido de fondo, evaluado en decibeles, se propuso un valor de ponderación del 15% (0.15). 1.3.) Sub-ámbito térmico, trata sobre la habitabilidad térmica y se divide en dos indicadores: 1.3.1.) Temperatura neutral (TN), con un valor del 10% (0.10), esta puede ser estimada por formula o evaluada por encuesta bajo ISO 10551, su unidad de medida son grados centígrados (°C) y su valor por ponderación es del 10% (0.10), el otro componente es 1.3.2.) Humedad Relativa (HR), parte también de la habitabilidad térmica y permite evaluar por calculo la sensación térmica percibida, se evalúa en porcentaje (%) y la ponderación como indicador es del 5% (0.05). 1.4. Sub-ámbito Lumínico, referente a la habitabilidad lumínica, y sus indicadores son la iluminación natural e iluminación artificial con un 7.5% (0.075) cada una.
PSICOLÓGICO Con una representación del 30% (0.30), conformado de dos sub-ámbitos	2.1.) Movimiento, representado por tres indicadores todos de valoración por percepción, 2.1.1.) Funcionalidad, con una ponderación de 5% (0.05), 2.1.2.) Operatividad, con una ponderación de 5% (0.05) y 2.1.3.) Privacidad, con una ponderación del 3% (0.03). 2.2.) Estado emocional, conformado por tres indicadores: 2.2.1.) Placer, con una ponderación de 7% (0.07), 2.2.2.) Activación, con una ponderación de 5% (0.05) y 2.2.3.) Control, con una ponderación del 5% (0.05).
SOCIAL Con una representación del 10% (0.10) conformado de un sub-ámbito	3.1.) Reacción simbólica, representado por dos indicadores de valoración por percepción, 3.1.1.) Grado de significancia, con una ponderación de 5% (0.05), 3.1.2.) Valores, con una ponderación de 5% (0.05)

Los indicadores finales que componen los ámbitos del IHG se presentan en la tabla 4. Se puede observar el peso de los ámbitos en sí y el de los indicadores que los componen. Cabe mencionar que la diferenciación de valor de ponderación se decidió implementar por el ámbito en general y los indicadores que los constituyen tienen el mismo peso cada uno de ellos. Lo anterior fue con la intención de que en caso de que no se puede obtener un indicador para aplicar el IHG, se redistribuyen los valores de los indicadores sin afectar el valor general del ámbito.

También es importante mencionar que debido a que una parte del proceso de evaluación es por percepción del sujeto encuestado, se consideró darle un peso a la información general del mismo, lo anterior para poder inferir el efecto del espacio evaluado sobre el sujeto de estudio en el posible comportamiento de los datos.

Índice de habitabilidad gerontológica con base en estudio de campo

Tabla 4. Ámbitos, indicadores y ponderación del IHG final.

Fuente: Elaboración propia.

No	ÁMBITO / INDICADORES	PONDERACIÓN
Ámbito 1: Información general del encuestado		11.32%
1	Nombre completo	1.886%
2	Edad del encuestado	1.886%
3	Sexo	1.886%
4	Estado civil	1.886%
5	Lugar de residencia	1.886%
6	Área de trabajo	1.886%
Ámbito 2: Información general de la vivienda		13.21%
7	Tenencia de la tierra	1.887%
8	Núm. Personas habitan la vivienda	1.887%
9	Cantidad de niveles	1.887%
10	Sistema constructivo en muros	1.887%
11	Sistema constructivo en techo	1.887%
12	Orientación fachada principal	1.887%
13	Cantidad de espacios	1.887%
Ámbito 3: Habitabilidad Psicosocial		16.98%
14	Identidad. ¿Quiere usted pasar su vejez en su vivienda actual?	1.886%
15	Relaciones. ¿Con qué frecuencia recibía visitas antes de la pandemia?	1.886%
16	Pertenencia. ¿Qué representa su vivienda?	1.886%
17	Participación. ¿Qué le gustaría que tuviera su vivienda?	1.886%
18	Hogar (escala 0 al 4). ¿Se siente libre de realizar sus actividades cotidianas en su casa?	1.886%
19	Reconocimiento (escala 0 al 4). ¿Considera acogedora su vivienda?	1.886%
20	Seguridad (escala 0 al 4). ¿Tiene acceso directo hacia la calle desde su vivienda?	1.886%
21	Significatividad (escala 0 al 4). ¿Siente orgullo de su vivienda?	1.886%
22	Placer (escala 0 al 4). ¿En qué medida está satisfecho con su vivienda?	1.886%
Ámbito 4: Habitabilidad Motora-sensorial		15.09%
23	Riesgo. ¿Qué zona de su casa considera más riesgosa para un accidente?	1.886%
24	Adaptación. ¿Utiliza algún apoyo para desplazarse?	1.886%
25	Adaptación. ¿Qué le gustaría que tuviera su vivienda?	1.886%
26	Forma (escala 0 al 4). ¿Cómo considera la separación entre su vivienda y la calle para resguardar su privacidad?	1.886%
27	Dimensión (escala 0 al 4). ¿Cómo considera el tamaño de su vivienda para albergar a su familia?	1.886%
28	Circulación (escala 0 al 4). ¿Cómo considera que es la circulación al interior de su vivienda?	1.886%
29	Mobiliario (escala 0 al 4). ¿Considera que el mobiliario de su vivienda es el adecuado para realizar sus actividades diarias?	1.886%
30	Crecimiento (escala 0 al 4). ¿Cómo considera la posibilidad que tiene su vivienda para una ampliación?	1.886%

Ámbito 5: Habitabilidad térmica (escala 1 al 7)		15.09%
31	Sensación térmica. ¿Cómo se siente en este momento?	1.886%
32	Preferencia térmica. ¿Cómo preferiría sentirse en este momento?	1.886%
33	Tolerancia personal. ¿Qué tan tolerable es la temperatura de su vivienda, en general?	1.886%
34	Aceptación del ambiente. ¿Cómo considera la temperatura de la vivienda en general, en período cálido?	1.886%
35	Aceptación del ambiente. ¿Cómo considera la temperatura de la vivienda en general, en período frío?	1.886%
36	Control ambiental. ¿Cuenta con aparatos para regular la temperatura interior de su vivienda en período cálido?	1.886%
37	Control ambiental. ¿Cuenta con aparatos para regular la temperatura interior de su vivienda en período frío?	1.886%
38	Control ambiental. ¿A qué temperatura pone su aire acondicionado?	1.886%
Ámbito 6: Habitabilidad lumínica (escala 1 al 4)		15.09%
39	Fisiología. ¿Tiene problemas de la vista?	1.886%
40	Fisiología. ¿Usa lentes de aumento?	1.886%
41	Sensación lumínica. ¿Cómo siente la luz natural en este espacio de la vivienda en este momento?	1.886%
42	Aceptación del ambiente. ¿Cómo considera la luz natural en general en la vivienda?	1.886%
43	Aceptación del ambiente. ¿Cómo considera la luz artificial en general en la vivienda?	1.886%
44	Aceptación del ambiente. ¿En qué horarios utiliza la luz artificial?	1.886%
45	Aceptación del ambiente. ¿Cuál es el espacio con mayor luz natural en la vivienda?	1.886%
46	Aceptación del ambiente. ¿Cuál es el espacio con menor luz natural en la vivienda?	1.886%
Ámbito 7: Habitabilidad acústica		7.55%
47	Fisiología. ¿Tiene problemas para oír adecuadamente?	1.888%
48	Fisiología. ¿Utiliza algún aparato auditivo?	1.888%
49	Intensidad de ruidos (escala 0 al 4). ¿En general como es la intensidad de los ruidos al interior de la vivienda?	1.888%
50	Intensidad de ruidos (escala 0 al 4). ¿Dentro de su vivienda escucha ruidos del exterior?	1.888%
Ámbito 8 Habitabilidad olfativa (calidad del aire)		5.67%
51	Fisiología. ¿Padece usted de enfermedades respiratorias?	1.89%
52	Ventilación (escala 0 al 4). ¿Con que frecuencia están abiertas las puertas y/o ventanas de su vivienda para ventilar?	1.89%
53	Intensidad de olores (escala 0 al 4). ¿En general como es la intensidad de los olores al interior de la vivienda?	1.89%
TOTAL		100%

La ecuación del IHG, con base en el trabajo de campo es:

$$IHG^c = (IGE \times 0.1132) + (IGV \times 0.1321) + (HP \times 0.1698) + (HMS \times 0.1509) + (HT \times 0.1509) + (HL \times 0.1509) + (HA \times 0.0755) + (HO \times 0.0567) \quad (1)$$

Donde:

IHG^c: Índice de habitabilidad gerontológica con base en estudios de campo, *IGE*: Información general del encuestado, *IGV*: Información general de la vivienda, *HP*: Habitabilidad psicosocial, *HMS*: Habitabilidad motora sensorial, *HT*: Habitabilidad térmica, *HL*: Habitabilidad lumínica, *HA*: Habitabilidad acústica, *HO*: Habitabilidad olfativa.

Conclusiones

Hasta el 2022, las políticas públicas, desde lo urbano hasta la vivienda, han contado con poca participación y acción dirigida a las personas de la tercera edad, este sector de la población en constante crecimiento, por esta razón es necesario el desarrollo de lineamientos específicos para implementación tanto de infraestructura necesaria para garantizar el acceso a los servicios, así como a las adecuaciones de la vivienda.

La identidad y el arraigo son temas fundamentales en la vida de los adultos mayores, es importante que este mantenga la interacción con familiares y amistades, ya que el área afectiva toma mayor relevancia en esta etapa, de no ser así, el adulto mayor va perdiendo interés por interactuar, y en algunos momentos el seguir viviendo, por lo que es importante mantener los lazos cercanos, por lo que la calidad de vida se ve afectada. El temor y la ansiedad se incrementan, sobre todo en aquellos que viven solos o pasan gran parte del día sin alguno de los miembros de la familia, ya que se teme el sufrir alguna caída y no cuenten con auxilio, por lo que aquellos donde su vivienda cuenta con planta baja y alta, optan por realizar las actividades en la primera y solo utilizar planta alta para el descanso.

Es necesaria la detección de zonas potenciales de la vivienda que pudieran ocasionar un accidente. Las zonas con mayor porcentaje de respuesta fueron baño, cocina y escaleras, ya sea por haber sufrido alguno o solo tener temor a experimentarlo. Cabe mencionar, que uno de los mayores temores de los adultos mayores es el sufrir alguna fractura, ya que el tiempo de recuperación es lento y en algunas ocasiones deriva en la incapacidad permanente, lo que se traduce en un decremento de la calidad de vida.

Se debe considerar la realización de cambios en pisos, sobre todo aquellos con desniveles, el mismo caso aplica para los cambios de textura como tapetes, ya que estos son causantes de temor por ser posibles zonas para sufrir caídas. La percepción que se tiene respecto a la forma, dimensión, circulación y disposición de mobiliario respecto a la vivienda es positiva, así como también el espacio con que se cuenta para una ampliación.

En lo que respecta a la habitabilidad térmica: Es importante mantener la vivienda bajo condiciones que permita al adulto mayor mantener su temperatura corporal lo más estable posible, ya que el metabolismo se encuentra vulnerable a sufrir golpe de calor o enfermedades respiratorias propias del periodo de invierno, las cuales pueden agravarse. El contar con dispositivos que permitan mantener la temperatura de la vivienda en condiciones confortables tanto en verano como en invierno permitirá el prevenir desequilibrios en la salud.

En el caso de la habitabilidad lumínica: La iluminación es utilizada tanto de día como de noche para el desarrollo de actividades, por lo que carecer de la misma propicia posibles accidentes. Cabe señalar, que una de las zonas con menor iluminación es la zona del baño, la cual coincide como una de las áreas con mayor temor a sufrir un accidente o haberlo experimentado. Es importante la realización de modificaciones que generen mayor visibilidad con iluminación natural y propicien confianza a sus habitantes.

Para la habitabilidad acústica: El no contar con aislamiento acústico que mitigue los ruidos, principalmente del exterior, generan irritabilidad, estrés e intranquilidad al adulto mayor, ya que es posible el sentirse vulnerable ante los ruidos ajenos a su vivienda, mientras que en esta etapa de la vida se busca el habitar espacios que inviten a la tranquilidad y descanso.

Mientras que para la habitabilidad olfativa (calidad del aire): El mantener una vivienda ventilada es un importante hábito, ya que esto evita la acumulación de humedad, olores desagradables, así como cantidades elevadas de CO₂ que generan enfermedades respiratorias.

En general es conveniente el contar con un diagnóstico preliminar a nivel nacional sobre la habitabilidad gerontológica en al menos las principales ciudades de México. Lo anterior, con la intención de identificar áreas de oportunidad para estudios específicos. Se requieren estudios de espacios urbanos para propiciar la participación y uso de estos del adulto mayor.

Los cambios en la configuración espacial de la vivienda, se vuelven prioritarias dos de las funciones básicas de la vida: aseo y descanso, la ubicación de estos espacios es requerida en planta baja y además las dimensiones de estos para el uso de andaderas o sillas de ruedas sufre un cambio drástico al diseño original. Si bien, el diseño de una vivienda se hace con la intención de proteger a la familia, se debe considerar las edades de los integrantes de esta, y el hecho de que inherentemente podrían llegar a ser adultos mayores. Lo anterior, está establecido en reglamentos en el Estado de California y Arizona, en Estados Unidos de América.

Por otro lado, las autoridades deberán considerar acciones que deriven en políticas públicas las cuales conlleven a una mejora en la calidad de vida. Sin embargo, el interesado principal deberá ser el propio adulto mayor, de tal manera que pueda incidir activamente en la toma de decisiones para el mejoramiento respecto a su condición de vida. Otro tipo de seguimiento es el trabajo participativo, donde autoridades de gobierno, iniciativa privada universidad y sociedad puedan tener una colaboración interdisciplinaria que permita concretar acciones comprometidas con los cuatro ámbitos que resulten en un beneficio palpable.

El Índice de Habitabilidad Gerontológica (IHG) es una herramienta cuyos resultados establece el nivel de adecuación de una vivienda para las necesidades propias del adulto mayor. Por otro lado, podría establecer los lineamientos de diseño para nuevos proyectos enfocados a este sector de la población. Una aplicación del IHG pudiera ser su integración en programas de cómputo como una herramienta de evaluación del diseño donde sea posible determinar el nivel de habitabilidad en función de indicadores específicos.

Bibliografía

- AHSRAE. (2017). ANSI/ASHRAE Standard 55-2017. 1–6. https://www.ashrae.org/file_library/technical_resources/standards_and_guidelines/standards_addenda/55_2017_a_20181002.pdf
- ASHRAE. (2003). ANSI/ASHRAE Standard 62-2001, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. <http://www.ashrae.org>,
- Baquero Larriva, M. T., & Higuera García, E. (2018). Percepción de confort térmico y acústico de adultos mayores en el espacio público de Madrid. Conama 2018. Congreso Nacional Del Medio Ambiente, 1–30. http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2018/CT_2018/222224215.pdf
- Bowling, A., & Windsor, J. (2001). *Towards the Good Life: A Population Survey of Dimensions of Quality of Life*. *Journal of Happiness Studies* 2001 2:1, 2(1), 55–82. <https://doi.org/10.1023/A:1011564713657>
- CELADE. (2006). Manual sobre indicadores de calidad de vida en la vejez. Publicación . Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/3539-manual-indicadores-calidad-vida-la-vejez>
- CEPAL. (2007). Año / Year II N o 3 Abril / Proyección de población Population projection. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/7120/1/S0700724_mu.pdf
- Chaudhury, H. (2003). Quality of Life and Place-Therapy Quality of Life and Place-Therapy. 17(February), 85–103.
- CONAVI. (2017). II CÓDIGO DE EDIFICACIÓN DE VIVIENDA 3a EDICIÓN-2017. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/320345/CEV_2017__FINAL_.pdf
- INEGI. (2000). INEGI XII CENSO GENERAL DE POBLACION Y VIVIENDA 2000. Memoria. Xii Censo General de Población y Vivienda 2000, 1–103. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825006519/702825006519_1.pdf
- INVI. (2005). Habitabilidad residencial – Vivienda al Día. <https://infoinvi.uchilefau.cl/glosario/habitabilidad-residencial/>
- ISO 16283-2:2020. (n.d.). ISO 16283-2:2020(en), Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 2: Impact sound insulation. Retrieved October 2, 2020, from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:16283:-2:ed-3:v1:en>
- ISO 7726 (1998) (ED 2) *Ergonomics of the thermal environment—Instruments for measuring physical quantities*. International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO 7730. (2005). española.
- Iwarsson, S., Haak, M., & Slaug, B. (2012). *Current developments of the Housing Enabler methodology*. *British Journal of Occupational Therapy*, 75(11), 517–521. <https://doi.org/10.4276/030802212X13522194759978>
- Jirón, P., Toro, A., Caquimbo, S., Goldsack, L., & Martínez, L. (2004). Bienestar habitacional: guía de diseño para un hábitat residencial sustentable. <https://doi.org/https://doi.org/10.34720/s0k1-2823>

Lewis, A., Torrington, J., Barnes, S., Darton, R., Holder, J., McKee, K., Netten, A., & Orrell, A. (2010). *EVOLVE: A tool for evaluating the design of older people's housing. Housing, Care and Support*, 13. <https://doi.org/10.5042/hcs.2010.0709>

López-Espinoza, A. E. & Gómez-Azpeitia, G. (2010). Hacia una concepción socio-física de la habitabilidad: espacialidad, sustentabilidad y sociedad. *Palapa*, 5(1), 59-69.

Martínez Pérez, T. D. J., González Aragón, C. M., León, G. C., & Belkis, G. A. (2018). El envejecimiento, la vejez y la calidad de vida: ¿éxito o dificultad? *Aging, Elderly and Quality of Life: Success or Difficulty? Revista Finlay*, 8(1), 7. <http://scielo.sld.cu/pdf/rf/v8n1/rf07108.pdf>

Mercado, S. y González, J. (1991). Evaluación psicosocial de la vivienda. México. Documento interno, INFONAVIT.

OMS. (2015). Informe mundial sobre el envejecimiento y la salud. www.who.int

OMS. (2018). Envejecimiento y salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/envejecimiento-y-salud>

OMS/OPS. (2000). Salud para todos en el año 2000: Plan de acción para la instrumentación de las estrategias regionales. In OPS. Documento Oficial;(179),1982. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/39468>

ONU. (2019). Creciendo a un ritmo menor, se espera que la población mundial alcanzará 9.700 millones en 2050 y un máximo de casi 11.000 millones alrededor de 2100: Informe de la ONU. *Perspectivas de La Población Mundial 2019, 2050*, 2. https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_PressRelease_ES.pdf

PUC. (2011). Guía calidad de vida en la vejez. http://adulthood.uc.cl/docs/guia_calidad_de_vida.pdf

Rooij, M. (2014). Arquitectura ante cambios demográficos: la vivienda existente para gente mayor. 1–323.

United Nations Department of Public Information. (2019, 17 de junio). Creciendo a un ritmo menor, se espera que la población mundial alcanzará 9.700 millones en 2050 y un máximo de casi 11.000 millones alrededor de 2100: Informe de la ONU [Comunicado de prensa]. https://population.un.org/wpp/publications/Files/WPP2019_PressRelease_ES.pdf

Universidad Autónoma de Yucatán, Universidad Autónoma de Baja California, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (2018). Índice de Habitabilidad y Cohesión Social (IHACOS) Reporte del proyecto CONAVI-CONACYT: HABITABILIDAD AMBIENTAL EN LA VIVIENDA CONSTRUIDA EN SERIE PARA CIUDADES DE MÉXICO, CON BASE EN INDICADORES DE BENEFICIOS, IMPACTOS SOCIALES Y CALIDAD DE VIDA.

FONDO. No. de proyecto CONAVI-2013-01-205807

Yanguas, J. (2006). Análisis de la calidad de vida relacionada con la salud en la vejez desde una perspectiva multidimensional (Primera edición, 2006). Instituto de Mayores y Servicios Sociales (IMSERSO). <http://envejecimiento.csic.es/documentos/documentos/yanguas-analisis-01.pdf>

Ybáñez Zepeda, E., & Alarcón, R. (2007). Envejecimiento y migración en Baja California.

Gestión de la Innovación en el Diseño Sostenible

Edwin Israel Tovar Jiménez¹, Víctor Alberto Arvizu Piña²

1 Profesor investigador de la Universidad Iberoamericana León, Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sostenible, DAD.

correo: israel.tovar@iberoleon.mx

2 Profesor investigador de la Universidad Iberoamericana CDMX, Departamento de Arquitectura, Urbanismo e Ingeniería civil.

Resumen

En este documento se describe el procedimiento que se ha venido implementando y ajustando durante 6 años en que se ha impartido un taller de Innovación en Diseño Sostenible (TIDS), en diferentes instituciones de educación superior en México, en los cuales los alumnos generan ideas de diseño para tecnologías o procesos sostenibles. Estas ideas se van analizando a través de diferentes metodologías, para lograr la maduración de los proyectos hasta un nivel TLR 3 de madurez tecnológica, que permite a los proyectos sean susceptibles de recibir apoyos a la investigación para ser patentados o puestos en el mercado para solucionar un problema de la realidad, generar beneficios ambientales y emprendimiento.

Palabras clave: Innovación, diseño sostenible, taller de innovación en diseño sostenible.

Abstract

This document describes the procedure that has been implemented and adjusted for 6 years in which he has taught a workshop on Innovation in Sustainable Design (TIDS), in different Universities in Mexico, in which, students generate design ideas for technologies or sustainable processes. These ideas are analyzed through different methodologies, to achieve the maturation of the projects up to a TLR 3 level of technological maturity, which allows the projects to be susceptible to receiving research support to be patented or placed on the market to solve a problem of reality, generate environmental benefits and entrepreneurship.

Keywords: Innovation, sustainable design, sustainable design innovation workshop.

Introducción

Los arquitectos y diseñadores ambientales necesitan rebasar el papel de integradores de servicios para participar cada vez más en la generación de técnicas o tecnologías apropiadas para mejorar el desempeño ambiental de los espacios habitables. Existe un campo amplio para la reconversión de tecnologías hacia un desempeño sostenible o la generación de tecnologías nuevas para realizar las actividades humanas.

En este sentido, las escuelas de arquitectura y diseño a nivel licenciatura y posgrados, tienen la posibilidad de fomentar las herramientas de gestión de la innovación en los profesionistas para transitar a la gestión organizada de la innovación, en vez de la solución mediante la *recursividad*, que se entiende como un objeto o problema que se define en función de sí mismo o a sí mismo (ITZ, 2023), o, dicho de otra manera, improvisando soluciones a un problema coyuntural.

El objetivo de este trabajo es difundir el procedimiento que se ha implementado en diversos Talleres de Innovación en Diseño Sostenible (TIDS), para fomentar la producción de tecnologías adecuadas a un ecosistema, partiendo del concepto de Turner (1972) de *tecnologías apropiadas*. Este procedimiento (TIDS) se ha desarrollado durante varios años en diferentes instituciones de educación superior. Al final de este trabajo se presentan algunos de los proyectos obtenidos.

Antecedentes

Se identifican dos razonamientos por los que estos talleres han tenido pertinencia:

1. Los profesionistas generan poca innovación formal en su actividad profesional. El arquitecto, al igual que la mayoría de los profesionistas y empresarios del país, carecen de la cultura del desarrollo formal de investigación y producción de innovaciones en su ejercicio cotidiano. A través del TIDS se establece una estructura accesible para organizar este proceso.
2. Los arquitectos y empresas en México generan pocas patentes. En el ejercicio de las profesiones y entre las empresas nacionales, es incipiente la dinámica de la generación de productos y servicios innovadores patentables que les den la oportunidad de generar emprendimientos y ventajas de aprovechamiento industrial. Las empresas mexicanas se caracterizan por un bajo registro de innovaciones. Existen pocos registros de esta actividad formal de innovación para nuestra economía en desarrollo (Sutz, 2012). De acuerdo con Jeroen De Jong (2003), el registro de la innovación en las empresas de servicios suele ser muy complicado debido a la intangibilidad de sus productos.

En relación con la innovación en diferentes sectores de México, se aportan otros datos importantes que nos permiten observar la necesidad de fortalecer esta cultura desde las Instituciones de Educación Superior. En la Figura 1 se muestran los indicadores de innovación para diferentes servicios en México (Ruiz y Zagaceta, 2016).

<i>Sector</i>	<i>Descripción</i>	<i>CII 2004</i>	<i>Posición</i>	<i>AII 2004</i>	<i>Posición</i>
51	Información en medios masivos	1.74	2	5.78	1
52	Servicios financieros y de seguros	1.81	1	5.11	2
55	Dirección de corporativos y empresa	1.20	4	4.83	3
54	Servicios profesionales, científicos y técnicos	1.26	3	4.11	4
56	Servicios de apoyo a los negocios y manejo de desechos y servicios de remediación	1.14	5	3.90	5
61	Servicios educativos	1.08	7	3.65	6
43	Comercio al por mayor	0.92	10	3.09	7
62	Servicios de salud y de asistencia social	1.04	8	2.76	8
71	Servicios de esparcimiento culturales y deportivos, y otros servicios recreativos	1.13	6	2.49	9
46	Comercio al por menor	0.99	9	2.37	10
53	Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles	0.68	12	2.06	11
81	Otros servicios excepto actividades del gobierno	0.71	11	1.74	12
72	Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas	0.65	13	1.37	13

Figura 1. Indicadores de innovación en México por sector.

Fuente: (Ruiz-Porras, 2016).

Notas: Las escalas de los índices Core Innovation Index (CII) y Aggregate Innovation Index (AII), son, respectivamente, de 0 a 3 y de 0 a 10. En todos los casos, valores altos de los índices reflejan niveles altos de innovación. Las posiciones denotan la posición relativa del sector en la tabla. Se excluyen los sectores 48-49 (transportes, correos y almacenamiento).

La generación de patentes es escasa incluso en las instituciones que hacen investigación, comparativamente con centros de investigación de otros países que promueven más esta actividad. Con base en datos publicados por el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI 2019), en el período comprendido entre 2013 a 2018, las instituciones que más patentes solicitaron son las que cuentan con centros de investigación (Tabla 1). En la UNAM, se hace notar que aun cuando se generan patentes, considerando que cuenta con 61 unidades de investigación, entre centros, institutos y programas, 299 patentes en un período de 5 años es un índice bajo. La Oficina de Licenciamiento Tecnológico (TLO) del Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT), tan sólo en el año 2018, reportó 425 nuevas patentes en EEUU, 331 patentes internacionales, lanzamiento de 439 emprendimientos, más de 700 empresas están trabajando desarrollos con el MIT y la industria patrocina con 159 millones de dólares sus investigaciones (TLO - MIT 2018). Si bien es notoria la diferencia de condiciones económicas y tecnológicas entre México y Estados Unidos, se hace la comparación para tener una referencia internacional.

Tabla 1. Número de patentes generadas por instituciones de educación superior en el período comprendido entre 2013 a 2018.

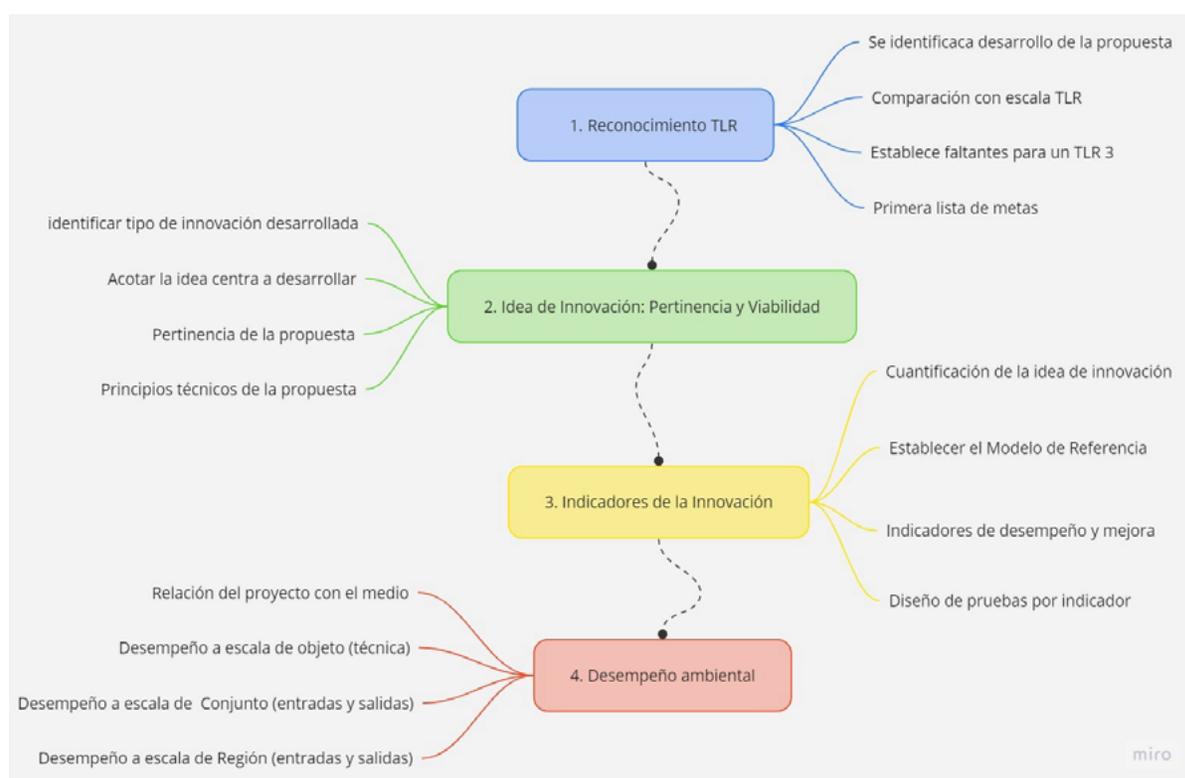
Institución	Número de patentes
Universidad Nacional Autónoma de México	299
Instituto Politécnico Nacional	248
TEC de Monterrey	90
Universidad de Guadalajara	53
Universidad Autónoma Metropolitana	49

Fuente: Elaboración propia con base en IMPI (2019).

Metodología

El Proceso de maduración de innovaciones se estructura en siete bloques temáticos, de los cuales se presentan aquí cuatro, debido a la extensión de este trabajo y por ser los que más aportan al desarrollo de los proyectos. Se mencionará igualmente la base teórica de cada bloque, se describirán los contenidos impartidos en las sesiones y su aplicación práctica en el TIDS. Se ha encontrado que plantear preguntas para involucrar al cursante, ayuda a dar claridad a la finalidad que se busca en cada bloque de trabajo, por lo que en los bloques 2 al 4 se hacen preguntas detonadores como introducción al tema.

El procedimiento de gestión de la innovación de desarrolla de acuerdo con las etapas que se muestran en el siguiente esquema:



Metodología de desarrollo del taller de innovación

Al término de estas cuatro etapas se tiene la mayor cantidad de información para madurar las ideas. Las otras tres etapas tienen que ver con el diseño de la experimentación, la programación de pruebas para medir los indicadores así como presupuestos que permitirán que las propuestas puedan ser aplicadas en la realidad.

Reconocimiento TLR de la propuesta

Se utilizan diversas metodologías en el desarrollo del TIDS, una de ellas permite establecer el nivel de desarrollo de la propuesta, tomando en cuenta que muchos proyectos llegan a este taller con un trabajo previo. Primero esto se hace un autodiagnóstico y derivado de este análisis se identifican los componentes a ser desarrollados para tener al final del proceso, un producto viable para ser aplicado a un problema de la realidad, ser patentado o ser comercializado.

Se usa el método TLR desarrollado por la NASA para identificar el nivel de desarrollo que alcanzan las propuestas generadas. Estos talleres están enfocados en desarrollar las propuestas de innovación para llevarlos a un nivel 3 y en algunos casos a un nivel 4 de TRL, que es el nivel base para acceder a fondos de apoyo gubernamentales que incentivan la innovación y producción de tecnologías. El método TLR (o NMT por sus siglas en español), es igualmente el indicador utilizado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías de México (CONAHCYT) como requisito estandarizado en sus convocatorias de apoyos y becas (DOF, 2020). Cabe mencionar que el CONAHCYT utilizaba anteriormente el modelo de triple hélice (Gobierno-Academia-Industria) como requisito a ser cubierto por los proyectos prioritarios y en la actualidad utiliza el Modelo Mexicano de Innovación basado en la Pentahélice (Gobierno-Academia-Industria-Sociedad-Ambiente), lo que consideramos muy adecuado, porque hace que los proyectos en materia de sostenibilidad entren en el interés prioritario de las políticas públicas del Gobierno de México (Figura 2).

El método TLR consta de una escala de 9 niveles, para determinar la madurez tecnológica de un proyecto. Como se mencionó anteriormente, los talleres TIDS ayudan al cursante a desarrollar una idea y llevarla organizadamente al nivel 3 ó 4 TLR. De acuerdo con el área de CONACYT llamada DADTVI (2023), se describen, las condiciones que debe reunir un proyecto para cumplir con un TLR 4 (Tabla 2).

En relación al método TLR, se comenta finalmente que el nivel 9 de madurez tecnológica implica el uso comercial de la tecnología al mercado real (Figura 3).

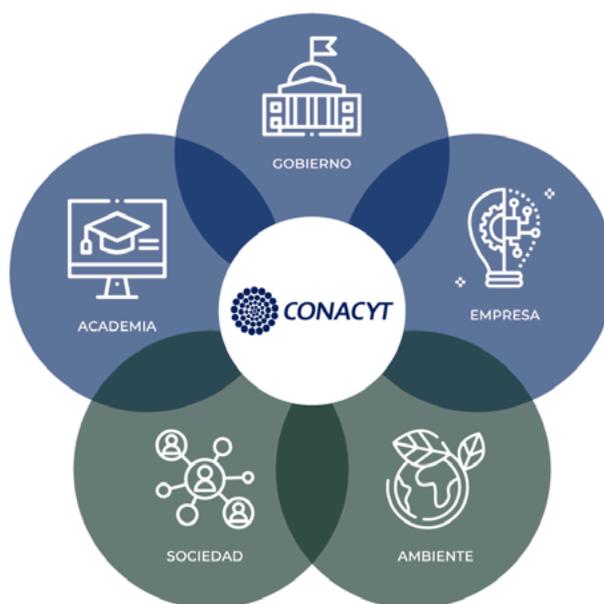


Figura 2. Modelo Pentahélice del CONACYT, que conjunta demandas de Gobierno, Academia, Industria, Sociedad y Ambiente para generar y evaluar proyectos.

Fuente: (DADTVI, 2023).

Tabla 2. Resumen de la Escala TLR, niveles del 1 al 4.

TLR	Elemento clave	Parámetros esperados
1	Investigación científica	Investigación básica. Prueba lógica: ¿el principio conceptual puede ser un principio tecnológico?
2	Aplicaciones demostradas en pruebas de laboratorio	Análisis de los artículos científicos, modelos o teorías respaldan la aplicación de la idea en algún área tecnológica.
3	Investigación de Laboratorio. Prueba experimental de factibilidad	Análisis de funcionamiento en Laboratorio. Búsquedas de patentes similares
4	Validación tecnológica a nivel laboratorio	Validación a nivel laboratorio. Estudio riguroso de Patentes y plan de licenciamiento.

Fuente: Elaboración propia con datos de DADTVI (2023).

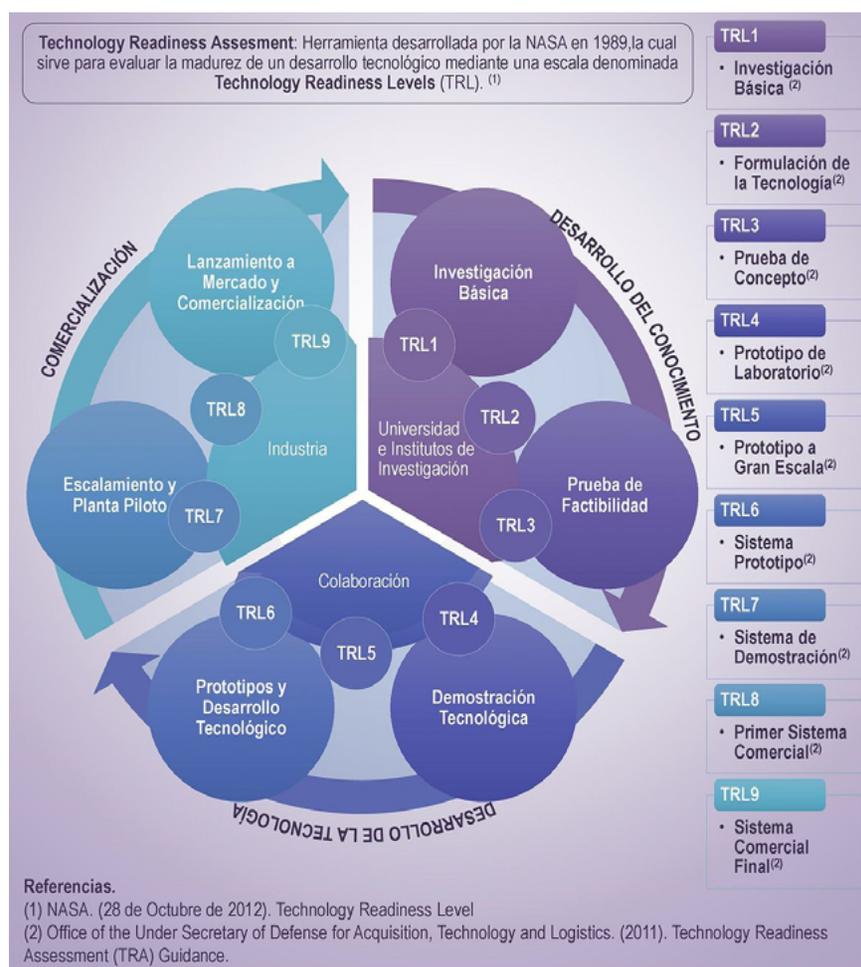


Figura 3. Nueve niveles de maduración tecnológica, del inicio al mercado.

Fuente: (Méndez, 2017).

Idea de Innovación: Pertinencia y viabilidad

Pregunta detonadora: ¿cómo se genera una idea innovadora?

Objetivos:

- Identificar tipo de innovación abordada
- Seleccionar y acotar la idea a desarrollar
- Establecer pertinencia y principios de la tecnología abordada

Acceso a la Innovación

Se ofrece un panorama de diferentes tipos de innovación en campos variados del diseño, objetos cotidianos y atractivos para los alumnos, así como de casos de ciencia y tecnología: bicicletas, balones deportivos, desalinizadores de agua, materiales orgánicos, materiales de la construcción, etc., con el objetivo de que el alumno establezca cercanía con la tarea de innovar. De acuerdo con Vigotsky, se establece una zona próxima de desarrollo (López, 2011) en el proceso de enseñanza para el descubrimiento.

Tipos de innovación

Existen principalmente dos tipos de innovación de acuerdo con su originalidad e impacto, la incremental y la radical (Arceo, 2009). De acuerdo con Stamm (2003), la innovación incremental se caracteriza por los siguientes rasgos: 1) es vigente por plazos cortos de tiempo, entre a 6 a 26 meses; 2) su trayectoria de desarrollo se puede rastrear paso a paso; 3) la idea generadora es producto de un flujo continuo de mejoras incrementales; 4) tiene un proceso en fases; 5) las competencias y habilidades para su desarrollo suelen ser cubiertas por un solo equipo de trabajo. Por otro lado, las innovaciones radicales, de acuerdo con el mismo autor, tienen los siguientes rasgos: 1) son vigentes por períodos largos, mayores a 10 años; 2) se desarrollan de manera discontinua, es decir, irrumpen sin antecedentes directos; 3) la idea generadora surge de fuentes inesperadas; 4) su proceso de desarrollo puede ser no lineal ni formal en una disciplina; 5) requiere competencias y habilidades de otras disciplinas.

Las innovaciones incrementales consisten en pequeñas modificaciones y mejoras que contribuyen, en un marco de continuidad, al aumento de la eficiencia o de la satisfacción del usuario de los productos y procesos (Moheno 2009). El Manual de Oslo (OECD y OCDE, 2018) las define como cambios de productos o procesos insignificantes, menores o que no involucran un suficiente grado de novedad, refiriéndose esta novedad a la estética u otras cualidades subjetivas del producto.

No obstante la definición del Manual de Oslo, para la legislación nacional se destaca especialmente el potencial de la innovación incremental al presentar la oportunidad de desarrollar mejoras en el desempeño de tecnologías previas, e incluso en la reconversión de tecnologías hacia la sostenibilidad que rebasa por mucho el interés esteticista. No hay que perder de vista que el objetivo del Taller es la innovación en este campo. Hay que comentar que en el mundo son escasas las innovaciones radicales.

Las mejoras en los procesos incrementales que se plantean al alumno pueden ser de cuatro tipos: 1) *Mejora Técnica*: eficiente el desempeño de algún aspecto técnico; 2) *Mejora Ambiental*: reduce el impacto ambiental de la tecnología; 3) *Mejora Económica*: abarata las tecnologías para hacerlas más accesibles a la población; 4) *Mejora Humana*: aporta más beneficios a la salud y facilita el uso de las tecnologías en su contexto social.

Como ejemplo de innovación incremental se puede mencionar el desarrollo de un sistema de transmisión de fuerza de una bicicleta que usa una flecha y engranes para sustituir la transmisión de fuerza desde los pedales a la rueda trasera mediante el uso de cadena. Este caso muestra un cambio incremental sobre la bicicleta que tiene una evolución desde 1790 cuando el francés Comte Mede De Sivrac inventó el celerífero, hasta nuestros días, sin que esto cambie la identidad de la bicicleta.

Como ejemplo de innovación radical, se puede mencionar el caso de un invento mexicano denominado Bat-Gen (Atl, 2023) desarrollado por el Dr. Gerardo Solís, que consiste en identificar y replicar en laboratorio el proceso denominado “fotosíntesis humana” en el que las moléculas de melanina o polihidroxiindol, presentes en la piel y el cabello humano, tienen la

capacidad de romper la molécula del agua, separando el oxígeno y el hidrógeno, usando el segundo de estos para generar energía y obteniendo de este invento una “pila infinita” que puede durar encendida 100 años sin depender de otra fuente de energía más que agua. Este invento radical ha sido tan difícil de asimilar que el sistema de patentes mexicano no otorgó la patente y tuvo que ser el sistema de patentes de Rusia, que comprobó, validó y entregó la patente a este invento.

Encontrar una idea

Se redactarán al menos tres ideas acerca de mejoras al desempeño de un objeto o un proceso que al cursante le sea significativo, por experiencia personal, por conocimiento formal y sobre todo, que parta de un área próxima a su experiencia profesional. Para conseguir estas tres ideas se cubren los siguientes pasos:

1. Se establece por parte del estudiante un objeto (o proceso) que capture su interés. Por ejemplo, un sistema de muro con PET.
2. Se ubica en qué aspecto técnico del sistema intuimos que puede haber mejoras.
3. Ubicamos en qué dimensión de la sustentabilidad aportará mejoras la propuesta.

Una vía para encontrar la idea de innovación que se va a desarrollar es ubicar procesos u objetos que ya existen en la realidad y preguntarnos ¿cómo podemos mejorar su desempeño? Se realiza un primer análisis que denominamos *Análisis de validez*. Este análisis (Tabla 3), busca manifestar, poner a discusión y revisar si nuestro interés es un tema previamente trabajado o es novedoso.

Tabla 3. Análisis de validez de la primera idea, ejemplo para esta publicación.

Objeto, idea a desarrollar	Aspecto técnico	Dimensión sostenible
Sistema de muro de PET reciclado	Reducir infiltración en las juntas que se generan entre cada botella de PET.	Ambiental <ul style="list-style-type: none"> - Reducir gasto energético - Reducir emisiones de CO² - Aumentar confort humano - Reducir impacto ambiental PET
		Social
		Económica

Si se consiguen tres ideas viables, el primer análisis de validez de la idea de innovación puede mostrar cuál de las 3 puede tener más ventajas y viabilidad para ser desarrollado. Se discuten colectivamente. Las observaciones del grupo más las del Asesor y las propias llevan a la selección de la idea más pertinente a ser trabajada en el TIDS. Después de esto, se selecciona la idea que se trabajará en el taller, para seguir con los análisis de la propuesta. Regularmente, la mayoría de las ideas son mejoras a procesos, sistemas u objetos que tienen un precedente, es decir innovaciones incrementales.

Pertinencia de la propuesta

En este proceso formativo para la investigación y la innovación, se ha optado por situar las propuestas de los alumnos ante la realidad, mediante la figura de la *pertinencia* y no mediante la *justificación*, por los siguientes motivos: Sabaj (2012) aporta diferentes maneras de abordar la justificación en catorce áreas del conocimiento analizadas por él (por cierto, ninguna de éstas es arquitectura), en un corpus de 162 artículos científicos indexados, encontrando como constante que “la justificación parte del concepto de fundamentar nuestros actos, creencias y conocimientos”. Por otra parte, en una conceptualización tradicional, “justificación” se define como una “creencia verdadera justificada”. Proposicionalmente: ‘s’ conoce ‘p’, si ‘p’ es verdadero y ‘s’ tiene una justificación (J) para creer p’ (Steup, 2017), es decir, es un tema de percepción del sujeto que justifica un acto.

Se ubican cinco fuentes fundamentales de la justificación: percepción, introspección, memoria, razonamiento y testimonio (Russell, 2007). En este sentido, la justificación es una fundamentación personal de las decisiones. Dada la profunda carga epistemológica que conlleva la justificación, no es práctica para los fines que se buscan en el TIDS.

Acerca de la pertinencia, citamos la siguiente definición: “Un proyecto pertinente es aquel que guarda relación de afinidad y eficacia con las necesidades formativas del entorno social y laboral, y por lo tanto es congruente con esas exigencias del medio externo” (CONACYT-PY, 2021). La pertinencia establece el grado de compatibilidad de la propuesta con el contexto que la recibe, en términos de necesidades, momento histórico, perfil sociocultural, economía, etc.

La redacción de Pertinencia es muy útil, porque es equivalente y directamente transportable a la redacción de la *Reivindicación de la Invención*, que es una de las partes fundamentales de la sustentación de un proceso de patente bajo las leyes mexicanas. Al respecto el IMPI define que: “La esencia o razón de ser de una reivindicación consiste en definir la invención, indicando sus características técnicas, precisando el alcance de la patente o modelo de utilidad (2018).

Con todos estos antecedentes, el alumno redacta la pertinencia de su propuesta. Se apoya en el análisis del contexto y análisis previos disponibles.

Tanto el análisis de validez de la propuesta como el de pertinencia, permiten tener claridad en la idea que se desarrollará. Es un primer acercamiento al alcance y la dirección hacia donde se debe trabajar la propuesta.

Indicadores de la innovación

Pregunta generadora: ¿cuánto vale una idea?

Objetivos:

- Establecer la base para cuantificar una idea
- Determinar un *Modelo de Referencia*
- Generar indicadores de innovación
- Pruebas de medición

Las innovaciones son cuantificables

Se establecen aquí las bases para estructurar una propuesta y demostrar el alcance de sus aportaciones. La base para medir o pesar las aportaciones de la propuesta, es la comparación contra un Modelo de Referencia (MR). La comparación primero será técnica, de desempeño y de dimensionamiento de los fenómenos que mejora, para después cuantificar estos efectos. Las aportaciones y el peso de una propuesta pueden ser en el aspecto económico, ambiental, social, etc., no siempre es monetario, aunque también puede llegarse a medir todos los impactos de manera económica, porque incluso los fenómenos sociales tocan la economía, al ser parte presupuestal de las políticas públicas.

Estado del conocimiento y estado de la técnica

Para identificar el *MR* ante el cuál se medirá la propuesta, se debe primero construir la base de conocimiento general que se tiene del objeto, sistema o proceso abordado, se construyen para esto el estado del conocimiento y el estado de la técnica.

Es importante mencionar que en este caso no se utiliza el concepto *estado del arte* por varias razones prácticas que se comentan a continuación: el término *estado del arte* -*state of the art*- tiene su origen en Estados Unidos a principios del siglo XX, en un Manual de Ingeniería de Henry Harrison Supplee, en el que claramente se menciona que se usa este término para referirse al estado de la técnica (Haase F-A, 2010). En la década de los 80, el término se incorpora en Latinoamérica, en las investigaciones en Ciencias Sociales para referirse al cúmulo de conocimiento generado hasta el momento, acerca de un tema determinado y a partir de entonces, por estado del arte se ha venido entendiendo una mezcla amplia de conocimiento previamente generado en torno a un asunto tratado, generando en etapas formativas de entrenamiento en investigación, confusión en el estudiante, mezclándose temas de contexto, teoría, conocimiento y técnica. Es por esto que, para nuestros fines, simplificamos los conceptos y se utiliza estado del conocimiento, entendiendo por esto el conjunto de conocimiento generado alrededor de nuestro tema de interés (Ramírez-Arellano J A, 2020), sin mezclar detalles técnicos.

Por su parte, el estado de la técnica es la descripción detallada del principio físico, fenomenológico que hace funcionar el objeto de nuestro interés, así como los componentes que lo integran. De acuerdo con Vera (2014) el estado de la técnica es el conjunto de elementos y

características técnicas que conforman un objeto o una tecnología, que además forman parte central de la reivindicación de una patente.

Posteriormente, se investiga cuál es el avance más actual del proyecto que se trabaja como parte de la propuesta, para conocer de dónde se parte y tener claridad en los componentes del objeto. De la misma manera se comienza a identificar el MR.

El modelo de referencia

El Modelo de Referencia (MR) es un concepto que se retoma de la NOM-020-ENER-2011 (DOF 2011) basada en un proceso de comparación entre un proyecto existente y otro propuesto, que mejora al primero. El MR se selecciona a través de una búsqueda de objetos similares, o los más próximos al que se está proponiendo, para establecer después en qué se diferencian. Se hace una búsqueda en medios digitales, con especial atención al estado de la técnica¹ (IMPI, 2018). En esta búsqueda, pudiera ser que ya exista un almacén prefabricado de agua de lluvia (por poner un ejemplo de MR), pero tal vez no existe uno que tiene la válvula de lavada automatizada, integrada en el ducto de colección de agua (Modelo de Innovación). En este análisis se establecerán estas diferencias.

Indicadores de desempeño

Se hacen búsquedas en Internet y bancos de datos, entre modelos existentes en el mercado, en repositorios de tesis de Universidades y en el sistema de búsqueda de patentes del IMPI llamado SIGA (SE-IMPI, 2021). Se busca el objeto más cercano al que se está trabajando.

La búsqueda se basa en el estado del conocimiento y estado de la técnica que se hizo previamente. Tiene varios propósitos, primero hacer una revisión de patentes para no inventar algo ya inventado, también para analizar las diferentes maneras en que se ha solucionado el problema que estudiamos y finalmente, identificar ventajas y desventajas del MR y el Modelo de Innovación (MI).

Se selecciona el MR, que es el modelo más cercano a la propuesta. En la Tabla 4 se presenta un MR y un MI, ambos con sus características técnicas, trabajado por uno de los alumnos del Taller.

El alumno identifica en qué tipo de Mejora está interviniendo para que su propuesta sea comparable y medible en los mismos parámetros que el objeto de referencia. Debe ser un solo aspecto de los que conforman la tecnología propuesta. Por ejemplo, el desempeño térmico de un material, el peso, gasto energético, costo de producción, rendimiento, eficacia, costo beneficio, etc. Se recomienda que el eje central de atención sea uno sólo, aunque después se analicen otros.

1 El estado de la técnica es el conjunto de conocimientos técnicos que se han hecho públicos mediante una descripción oral o escrita, por la explotación o por cualquier otro medio de difusión o información, en el país o en el extranjero. Es decir, a nivel mundial.

La comparación entre el MR y el MI, así como las Mejoras propuestas en un tema determinado, se esquematizan claramente en una tabla de comparación a la que se le llama *Radiografía de la innovación*. En la Radiografía de la Innovación se debe manifestar cuál es el *Campo de la Invención*, cuál es el *Fundamento Técnico* del proyecto y cuáles son los *Principios Técnicos* o físicos que lo hacen funcionar. Este nombre ha resultado atractivo para los alumnos y les permite comprender el sentido de análisis desglosado que tiene el ejercicio. (Figura 4).

Tabla 4. Comparación entre MR y MI, con la descripción de las características técnicas del MR (Bovedilla de concreto) y las del MI (Bovedilla de Tetra Brik).

Nombre	Datos y esquema	
MR	Bovedilla de concreto 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso por pieza entre 185 - 195 kg • Costo por pieza • Fabricado de concreto • No degradable • sin uso posterior
MI	Tetra Brik 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso de 26 g (solo el Tetra Brik) • Recolección de desechos • Ligeros • Sin costo, únicamente recolección • Degradable en un 75%

Fuente: Ejercicio guiado por Tovar-Jiménez, con elaboración en taller de Chong (2021).

Figura 4. Radiografía de la Innovación. Aspectos técnicos que mejora el Modelo de Innovación (Bovedilla de Tetra Brik) en relación al MR (Bovedilla de concreto).

Fuente: Ejercicio guiado por Tovar-Jiménez, con elaboración en taller de Chong (2021).

Campo de la invención	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia energética • Ahorro de material estructural • Reúso de material de desecho • Procedimiento y método
Fundamento técnico del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la capacidad de carga en función de la forma y la configuración conjunta de materiales de desecho y concreto reforzado, en función de la Norma Técnica Complementaria de Diseño del concreto reforzado y su hipótesis de diseño.
Principios que lo hacen funcionar (modelos numéricos de cálculo)	<ul style="list-style-type: none"> • Peralte mínimo • Momento flexionante • Momento de inercia • Área de acero longitudinal por m² (cm²/m²) • Volumen de concreto por m² (m³/m²) • Menor costo

Al final de estos análisis, se cuenta con un MR contra el cual se pesa el MI. Igualmente se identifica con claridad cuál aspecto de su desempeño donde se diseñan las mejoras. Con esta información, el proceso está ya en posibilidad de hacer un diseño de la experimentación que permita diseñar las pruebas sobre los indicadores que muestren las diferencias entre uno y otro modelo. Para esto se revisarán métodos, procedimientos, pruebas empíricas y normas a cumplir, laboratorios donde se pueden medir e incluso tiempos y costos para realizar este contraste cuantitativo entre el MI y el MR.

Una vez identificados los indicadores que permitirán comparar el desempeño del modelo de referencia contra el modelo intervenido, se establecen los métodos de prueba, empíricos, de laboratorio y marcados en normas para obtener el desempeño comparado de la innovación, indicador por indicador.

Desempeño ambiental

Pregunta generadora: ¿cómo se genera una tecnología sostenible?

Se describe ahora, una de las herramientas que se implementan en el TIDS para buscar la mayor cantidad de beneficios ambientales de los proyectos de innovación, aplicables a proyectos arquitectónicos y sus tecnologías asociadas.

Objetivos:

- Establecer la relación del proyecto con el medio en el que se implementa,
- Establecer desempeño a escala de objeto.
- Establecer desempeño a escala de conjunto o zona.
- Establecer desempeño a escala de región.

Análisis ambiental por escalas

Se utiliza la estructura del método de diseño por escalas Geodesign (Stainitz, 2012), en formato de taller colaborativo para identificar la relación del proyecto particular con el entorno inmediato y con la región. Esta relación es fundamental en diseño ambiental porque nos permite identificar qué posición ocupa el proyecto en el sistema ambiental en el que participa, así como el impacto que tiene nuestra propuesta sobre las otras dos escalas. Las escalas básicas son: 1) Objeto; 2) Conjunto; 3) Región.

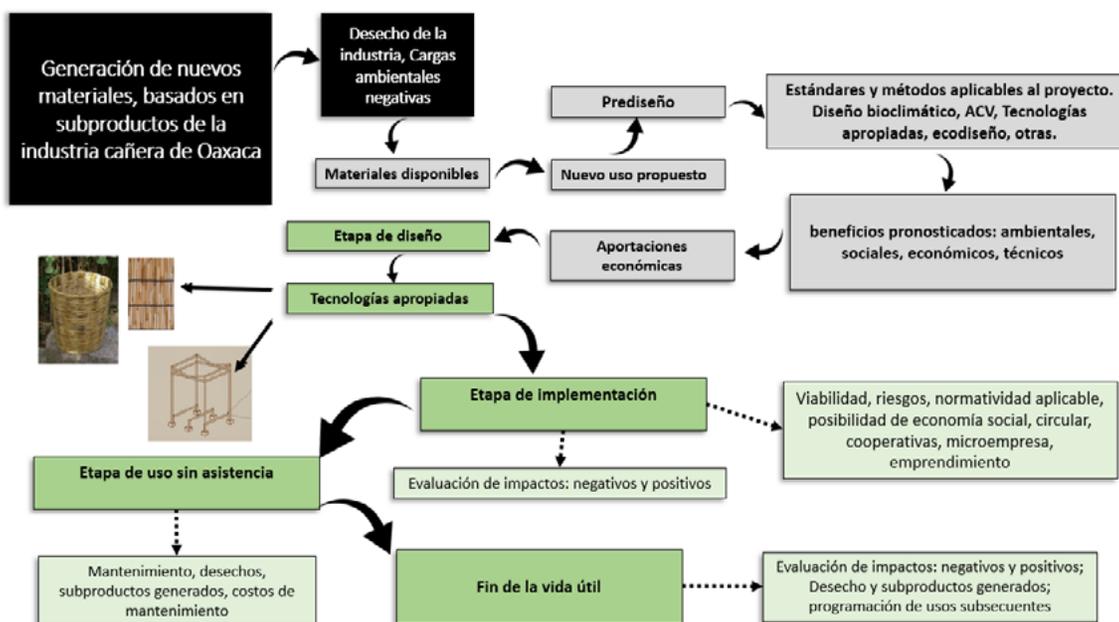
Se identifican igualmente los recursos que se requieren del medio y las emisiones que genera hacia el medio. La relación del proyecto de innovación con el entorno y con la región se desarrolla con el objetivo de analizar el flujo de materiales, energía, beneficios o impactos que se presentan entre el proyecto y el medio: L11 proyecto a proyecto; L12 proyecto al medio, L21 del medio al proyecto y L22 del medio al medio; en las que 1 representa el proyecto y 2 el medio (Yeang 2002).

En cada etapa de análisis por escalas se aplica también el análisis por contraste entre los dos extremos que se van comparado, es decir, se compara primero la escala 1 con la 2, la 2

con la 3 y la 3 con la 1. Se va aplicando un análisis entre los extremos parciales, basado en la “técnica de los extremos (flip-flop)” de acuerdo con Gibbs (2012).

Para determinar la relación entre el proyecto y el medio se hacen diagramas a tres escalas: objeto - objeto; objeto - entorno; y objeto - región. La Figura 5 muestra un diagrama realizado en uno de los TIDS.

Figura 5. Esquema de relación de la propuesta de innovación con el medio físico y los componentes socio culturales en las 3 escalas ambientales.



Fuente: Elaboración propia, basada en Trabajo final del TIDS, Hipólito (2017).

Análisis Transversal de Indicadores Ambientales

Se desarrolla un análisis que se ha nombrado *Análisis Transversal de Indicadores Ambientales (ATIA)*, que es conveniente porque uno de los requerimientos iniciales del proceso del TIDS, es el aislamiento de variables, para enfocar el trabajo en mejorar únicamente uno de los aspectos que conforman la propuesta. Sin embargo, este Análisis Transversal permite identificar los componentes del desempeño ambiental del proyecto, para también apreciar el desempeño ambiental que de manera integral se pueden presentar a partir de la propuesta y de esta manera observar siempre la interacción de los componentes del sistema, que es la base de la sostenibilidad. Igualmente se pueden identificar posibles desventajas.

Se llaman componentes transversales, porque con complementarios del aspecto central analizado, y tocan todos los proyectos y en general todas las actividades humanas. Los indicadores ambientales básicos analizados son: Energía incorporada, Agua incorporada; Impacto ambiental; Toxicidad de procesos o materiales; Potencial de reúso o reciclaje. En la Figura 6 se muestra un breve análisis transversal de indicadores ambientales que hizo un alumno del Taller.

Figura 6. Análisis Transversal de Indicadores Ambientales.

	Bovedilla de concreto	Modelo de innovación
Energía incorporada	Uso de energía para la extracción de agregados. Proceso industrial para la fabricación de cemento	Recuperación de material de desecho, reuso Solo energía para recolección
Agua incorporada	Alto consumo de agua en todas sus etapas, desde la obtención de los insumos, hasta la fabricación del elemento de referencia	Consumo de agua solo en la limpieza y enjuague del envase para su almacenamiento
Impacto ecológico ambiental	El material producido no es degradable ni es posible emplearlo en otro proceso, su único destino es para rellenos y vertederos	Del total del peso del envase 25% es aluminio y polietileno, elementos que debemos buscar alternativas para recuperarlo del envase
Potencial de reutilización y reciclaje	El material después de su uso no se puede reutilizar o reincorporar a la naturaleza sin causar daño, es un elemento inerte sin utilidad	En un envase tetrabrik recuperamos hasta el 75% del cartón utilizado, aún después de ocuparlo como elemento de cimbra
Toxicidad de materiales	Insumos tóxicos y producto final tóxico	Es posible recuperar la fibra de cartón y reutilizarla en fabricar otro cartón, Los elementos tóxicos son las tintas y el polietileno
Otros	Alto peso, volumen. Alta cantidad de agua contaminada	Alto peso, volumen. Alta cantidad de agua contaminada

Fuente: Ejercicio guiado por Tovar-Jiménez, con elaboración en taller de Chong (2021).

De esta manera el alumno comprende el alcance y las limitaciones de su propio trabajo, y a partir de éstas, puede tomar decisiones.

Los indicadores ambientales igualmente generan métodos de prueba que deberán solventarse en las propuestas, por ejemplo, carbono incorporado, agua incorporada, mejoras en consumos energéticos, mayor recuperabilidad, etc., aunque, se debe mencionar que, por la naturaleza de estos talleres, los indicadores ambientales y los indicadores de mejora de la innovación mencionados en el punto 3 del presente documento, son los mismos.

Algunos proyectos obtenidos

Se presentan finalmente algunos de los proyectos implementados (Figura 7 y 8).

A lo largo de la implementación de los TIDS, se han tenido muchos proyectos como: pintura orgánica basada en vegetación nativa de la sierra mixe y base de harinas para evitar uso de minerales; doble fachada ventilada con block de tierra para refrescamiento de fachadas en el Istmo; Block de tierra compacto armable para la autoconstrucción y acceso a la vivienda popular; casetón de tetrabrik como sustituto de casetón de poliestireno; panel acústico con base a residuos de la industria maderera de Itundujia, Oax; entre muchos otros.

Proyectos

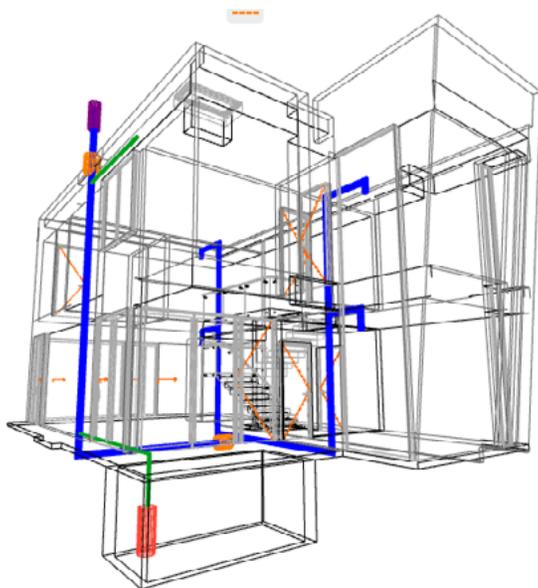


Figura 7. Sistema vertical de enfriamiento de aire indirecto. Alternativa al pozo canadiense aplicable a fachadas. Alumno Luis Pérez

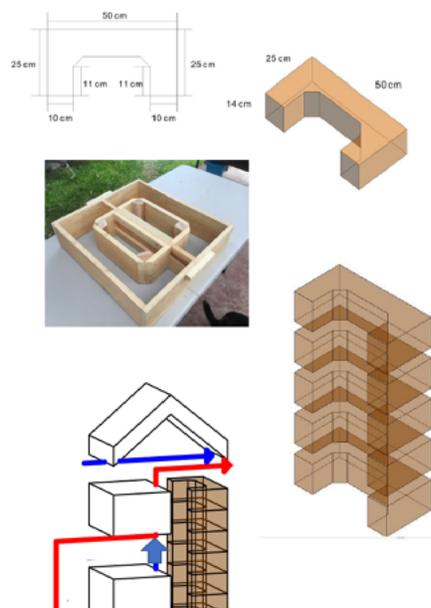


Figura 8. Sistema de doble fachada ventilada, prefabricada para el Istmo de Oaxaca. Alumno Hernán Laguna

Conclusiones

A través de este proceso de seguimiento, el alumno obtiene la estructura organizada que le permitirá conducir su idea hacia las salidas que él considere pertinentes: artículo científico, prototipado, emprendimiento, patente, beca, etc. Al finalizar el proceso de desarrollo, contraste, análisis y pruebas, la mayor parte de los proyectos trabajados en los TIDS alcanzan un nivel de madurez tecnológica TLR 3, sin embargo lo que se estima más importante, es que a partir de este momento se cuenta con una estructura organizada para determinar incluso las siguientes etapas que deberá seguir el proyecto para llegar al nivel de madurez que le posibilitará salir al mercado como un objeto aplicable a resolver un problema ambiental de la realidad.

La formación de los arquitectos en los centros de enseñanza debe responder a las necesidades que nos impone la realidad, que es compleja. Se considera que el ejercicio de la arquitectura debe ser una postura a favor de todas las formas de vida, del ser humano y de los ecosistemas en general. No se puede educar a los nuevos arquitectos para seguir únicamente a la dinámica de los mercados: hacer caber el mayor número de casas en un conjunto, construir el mismo proyecto en diferentes climas, usar materiales contaminantes, etc.

Se compartió en este documento la experiencia de enseñanza en procesos creativos e innovación para el diseño sostenible, que ha aportado gran cantidad de tecnologías aplicables a la arquitectura de manera directa o como complemento. Son sistemas que innovan sobre

todo en la manera en que el espacio habitable se adapta mejor al ecosistema donde se implementa. Cuatro de los proyectos obtenidos han sido implementados y son aptos para ser patentables.

Referencias

Chong, Jacobo. (2021). Trabajo Final Taller de Innovación en Diseño Sostenible, con metodología del docente. Trabajo terminal de Taller, Oaxaca.

CONACYT-PY. (2021). Definiciones Fundamentales. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de Paraguay. En: https://www.conacyt.gov.py/sites/default/files/DEFINICIONES_FUNDAMENTACION.pdf (último acceso: 4 de septiembre de 2021).

DADTVI (2023). Conacyt NMT, Diagnóstico de Madurez de la Tecnología. Dirección Adjunta de Desarrollo Tecnológico, Vinculación e Innovación. En: https://conacyt.mx/wp-content/uploads/sni/marco_legal/criterios/Anexo_Nivel_de_Madurez_Tecnologica.pdf. (último acceso el 26-04-2023)

DOF. (2011) Diario Oficial de la Federación, 9 de agosto de 2011. En: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5203931&fecha=09/08/2011 (último acceso: 4 de septiembre de 2022).

DOF. (2022). Programa Institucional 2020-2024 del CONACYT. Diario Oficial de la Federación. México.

FUENTE: Yolanda Patricia Méndez Torres. (2017) El camino del laboratorio al mercado. IPICYT. SLP, México.

Gibbs G. (2012). El Análisis De Datos Cualitativos En Investigación Cualitativa. Morata. Madrid, España.

Haase Fee-Alexandra (2010). *The state of the art as an example for a textual linguistic globalization effect. Code Switching, Borrowing, and Change of Meaning as Conditions of Crosscultural Communication. Revista de Divulgação Científica em Língua Portuguesa, Linguística e Literatura. En: https://web.archive.org/web/20110722002027/http://www.letramagna.com/Artigo6_13.pdf (Último acceso el 20 de abril de 2023)*

Hipólito, Ivonne. (2021). Trabajo final del Taller Innovación de Diseño Sostenible. Oaxaca: sin editorial. Oaxaca.

IMPI. (2018). Guía sobre Invenciones para solicitudes presentadas a partir del 27 de abril de 2018. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. En: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/490136/Gui_a_de_Invenciones.pdf (último acceso: 4 de septiembre de 2021).

IMPI. (2019). Conoce las universidades mexicanas que más patentan. 01 de febrero de 2019. En: <https://www.gob.mx/impi/articulos/conoce-las-universidades-mexicanas-que-mas-patentan?idiom=es> (último acceso: 3 de septiembre de 2021).

ITZ. (2023). Recursividad. Instituto Tecnológico de Zacatecas. México. (último acceso en 27-04-2023, En: <http://mapaches.itz.edu.mx/~mbarajas/edinf/Recursividad.pdf>

Jeroen PJ De Jong, Wilfred Dolfsma, Joris Meijaard. (2023). Innovation in Service Firms Explored: What, How and Why? EIM Busines and Policy Research. En: <https://www.>

researchgate.net/publication/200167211_Innovation_in_Service_Firms_Explored_What_How_and_Why

López, Alejandro. (2011). El concepto zona de desarrollo próximo y su manifestación en la educación médica superior cubana. *Revista Cubana de Educación Médica Superior*, 2011: 531-539. Cuba.

Moheno, Gerardo Arceo. (2009). El impacto de la gestión del conocimiento y las tecnologías de la información en la innovación: un estudio en las pymes del sector agroalimentario de Cataluña. Tesis Doctoral. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.

NASA. (2021). Technology Readiness Level. NASA. EEUU. (NASA s.f.). En: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level

OECD y OCDE. (2018). Oslo Manual. Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation, 4th Edition. OECD. Oslo.

Ramírez-Arellano J A. (2020). Formación para la investigación en los estados del conocimiento del COMIE: ¿Qué se hizo y qué falta por hacer? REDIECH. México. En: <https://rediech.org/wp-content/uploads/2021/03/Trazas-21-ramirez.pdf> (último acceso en mayo de 2023).

Ruiz, Antonio, y Juan Carlos Zagaceta. (2026). La innovación en las empresas mexicanas de servicios: un análisis a nivel de sectores, subsectores y ramas económicas. *Análisis Económico (Universidad Autónoma Metropolitana) XXXI, n° 76*. México

Russell, Bruce. (2007). A Priori Justification and Knowledge. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. 9 de diciembre de 2007. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2010/entries/apriori/> (último acceso: 4 de septiembre de 2021).

SE-IMPI. (2021). Sistema de Infirmación de la Gaceta de la Propiedad Industrial - SIGA. 4 de septiembre de 2021. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. En: <https://siga.impi.gob.mx/newSIGA/content/common/principal.jsf> (último acceso: 4 de septiembre de 2021).

Stainitz, Karl. (2012). *A Framework for Geodesign*. Editado por ESRI. ESRI Press. California.

Steup, Matthias (2017). The Analysis of Knowledge, en Edward Zalta (ed).» *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. En: <https://plato.stanford.edu/entries/knowledge-analysis/> (último acceso: 4 de septiembre de 2021).

Sutz, Judith. (2012). Measuring innovation in developing countries: some suggestions to achieve more accurate and useful indicators. *International Journal of Technological Learning, Innovation and Development*.

TLO - MIT. (2021). Statistics. junio de 2018. En: <https://tlo.mit.edu/engage-tlo/tlo-data/tlo-statistics> (último acceso: 3 de septiembre de 2021).

Turner, John. (1972). *Freedom to Build, dweller control of the housing process*. Macmillan. New York.

Vera Javier. (2014). *Características Técnicas de las Reivindicaciones de una Patente*. OEPM. España

Von Stamm, Bettina. (2008). *Managing innovation design and creativity*. 2nd Edition. Ed. John Wiley & Sons, London Business School. UK.

Yeang, Ken. (2002). *El rascacielos ecológico*. Gustavo Gili. Barcelona.

Energía agrovoltaica

Erika Velázquez Lavariega¹, Héctor Valerdi Madrigal²,
Francisco Rojas Caldelas²

1 Profesor investigador de la División de Ciencias Sociales y Humanidades. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.

correo: erikavlavariega1979@gmail.com

2 Profesor investigador de la División de Ciencias y Artes Para el Diseño, Departamento del Medio Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.

correo: hvm@azc.uam.mx / grandcisco@yahoo.com

Resumen

La utilización de instalaciones solares fotovoltaicas se ha vuelto una práctica frecuente en la industria agrícola. Como resultado, la búsqueda a fin de equilibrar el espacio para la tierra de cultivo y la tierra para instalar paneles fotovoltaicos puede resultar un aspecto problemático y complejo a lo largo del tiempo. Desde lo general, es posible decir que la agrovoltaica surgió como una solución dirigida a maximizar los recursos. Dicha práctica surge de combinar la producción agrícola y la producción de energía con dispositivos fotovoltaicos. El concepto conlleva varios beneficios al incluir la posibilidad de reducir la dependencia de las redes públicas y fomentar el autoconsumo de electricidad. Además, la zona de sombra creada por los equipos fotovoltaicos a modo de techado mejora el ahorro hidráulico entre cultivos, minimizando así la necesidad de riego.

La práctica de la agrovoltaica muestra un considerable potencial de impacto futuro significativo en la industria agrícola, dado que ofrece un doble beneficio en un solo espacio: por ejemplo, cosechar un kilo de tomates y al mismo tiempo recargar un dispositivo o añadir una hora de luz sin comprometer el espacio de cultivo. El objetivo de este artículo es describir de modo breve una serie de aspectos que van desde su historia derivada del uso de la energía solar, distintos beneficios, tipos de instalaciones y ventajas del uso de esta fuente alternativa de producción de energía.

Palabras clave: Fotovoltaica, agrícola, cultivo, agrovoltaica, energía, autoconsumo.

Abstract

The use of solar photovoltaic installations has become a common practice in the agricultural industry. As a result, the search to balance the space for cropland and land to install photovoltaic panels can be a problematic and complex issue over time. In general, it is possible to say that agrovoltaics emerged as a solution aimed at maximizing resources. The practice arises from combining agricultural production and energy production with photovoltaic devices. The concept brings several benefits, including the possibility of reducing dependence on public grids and encouraging self-consumption of electricity. In addition, the shaded area created by the photovoltaic equipment as a roof improves water savings between crops, thus minimizing the need for irrigation.

The practice of agrovoltaics shows considerable potential for significant future impact on the agricultural industry, since it offers a double benefit in a single space: for example, harvesting a kilo of tomatoes and at the same time recharging a device or adding an hour of light without compromising the cultivation space. The purpose of this article is to briefly describe a series of aspects ranging from its history derived from the use of solar energy, different benefits, types of installations and advantages of using this alternative source of energy production.

Keywords: Photovoltaic, agricultural, cultivation, agrovoltaic, energy, self-consumption.

Introducción

En la historia de la evolución cultural del hombre han existido diversos factores que detonan y potencializan su desarrollo. Dos merecen una mención especial: el desarrollo de la agricultura, y la tecnología. En cuanto a la agricultura, se ha atestiguado la utilización del agua para diversos sistemas de riego o bien, para calentarla poderosamente hasta vaporizarla y con su vapor se alimenten turbinas para producir electricidad. Respecto a la segunda, el desarrollo tecnológico busca constantemente el desarrollo de artefactos que promuevan la generación de un tipo de energía que auxilie al hombre en su estancia activa, sin afectar su entorno.

No obstante, el camino del desarrollo puede tener sus traspiés como ha sucedido con la tecnología contaminante que merma las características de las tierras de cultivo. Esta adversidad, vista desde lo positivo, fomenta el desarrollo de fuentes de energía renovables como medio para satisfacer la demanda mundial de energía que es una cuenta pendiente y urgente para del siglo XXI.

En este sentido incluyente de generación de energía y producción alimentaria, se aborda en este texto una visión general de la actividad agrovoltaica que se define como:

La energía agrovoltaica, también conocida como agrofotovoltaica, que consiste en aprovechar una misma superficie de terreno tanto para obtener energía solar como productos agrícolas. Es decir, los paneles solares conviven con los cultivos sobre la misma superficie. Esta técnica fue concebida originalmente por Adolf Goetzberger y Armin Zastrow en 1981, pero el concepto no comenzó a popularizarse hasta la década pasada. (Iberdrola)

El objetivo de este artículo se enfoca a describir la importancia de la energía solar como fuente renovable, no contaminante inagotable de recurso energético fotovoltaico. De la misma manera, se describe dentro de la perspectiva bioclimática su aplicación dual como recurso de producción de energía para el autoconsumo y producción de energía como un recurso de protección contra el asoleamiento excesivo de los cultivos. Todo ello como factor mitigante del cambio climático. Finalmente se exponen algunos tipos de instalaciones, ventajas, así como algunos proyectos actuales.

Energía Solar

Desde los albores de la historia, la raza humana se ha percatado del potencial energético del sol, e incluso le ha atribuido un estatus divino en diversas culturas siendo temida y adorada según sean sus efectos. Desde un punto de vista científico, la energía solar es vital para la sostenibilidad de nuestro planeta, generada mediante la fusión de helio e hidrógeno en una reacción de tipo nuclear.

Esto significa en pocas palabras que la radiación electromagnética del sol llega a la Tierra transmitida en forma de luz, calor y radiación ultravioleta. A lo largo de la historia del hombre, hemos aprendido a aprovechar la energía solar de diversas formas: térmicamente para calentar y gozar de un ambiente agradable; lumínicamente para alumbrar espacios en las edificaciones y fotovoltaicamente para convertirla en electricidad, todas ellas derivadas del

sol y que sirven como fuente inagotable de energía para combatir y atenuar los efectos del cambio climático.

Como resultado de este aprovechamiento solar en áreas de cultivo, se concibió buscar un equilibrio espacial y racionalizar el espacio distributivamente, tanto para la tierra de cultivo como para la instalación de paneles fotovoltaicos, lo cual no es fácil y puede resultar un aspecto problemático y complejo a lo largo del tiempo. Desde lo general es posible decir que la agrovoltaica surgió como una solución dirigida a maximizar los recursos.

Antecedentes

Dentro del rubro de las energías renovables no contaminantes se encuentra la energía solar, es decir, una energía limpia, obtenida del binomio energético perceptible que conforman la luz y el calor que produce el sol desde su génesis. El hombre, en su inteligencia, ha descubierto diversas vías para su utilización que van desde el uso del calor para secar la ropa, o la arcilla de ladrillos antiguos, o bien, mediante la absorción de la radiación solar a través de dispositivos fotovoltaicos para transformar la radiación en energía eléctrica.

Al convertir directamente la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico, la energía fotovoltaica es el tipo de energía más común utilizada en grandes instalaciones o parques solares. El descubrimiento fue realizado en 1839 por el físico francés Edmond Becquerel, quien notó que una celda con electrodos metálicos producía más electricidad a través de una solución conductora cuando se exponía a la luz (Solar, 2023).

Con el descubrimiento de las celdas fotovoltaicas nació la idea de combinar una agricultura respetuosa con el medio ambiente con la producción de energías renovables, esta idea fue planteada por primera vez en 1981 por Adolf Goetzberger y Armin Zastrow. Sin embargo, esta modalidad no empezó a ganar popularidad hasta los estudios de rendimiento realizados por el francés Christophe Dupraz y su equipo hace más de una década (Fundeen, 2023).

Las primeras aplicaciones de la tecnología fotovoltaica fueron los sistemas rurales de bombeo de agua, que requieren electricidad para funcionar. Comenzaron a utilizarse en comunidades fuera del alcance de la red eléctrica en México desde 1984 hasta principios de los años 90. Esta fue una intervención gubernamental la cual tuvo distintos inconvenientes con respecto a brindar a los usuarios una capacitación precisa y exhaustiva; los sistemas quedaron en el olvido porque no se resolvió el acceso a las baterías necesarias para su funcionamiento.

Desde entonces, todos los programas que se han creado han pretendido demostrar que la tecnología fotovoltaica es una herramienta imprescindible para el desarrollo del entorno agrícola en zonas que carecen de una red eléctrica y también en zonas donde es necesario mitigar la onerosa facturación de la electricidad.

Vale la pena mencionar que un tema de controversia recurrente ha sido la superficie que ocupan los sistemas fotovoltaicos en terrenos que podrían destinarse a la agricultura. Sin

embargo, la tecnología agrovoltaica se ha desarrollado recientemente y pretende resolver este problema (UNAM, 2022).

Objetivo

Un objetivo primordial de la arquitectura bioclimática es la promoción de fuentes de energía renovables y ecológicas, así pues, resulta factible reducir la emisión de los gases contaminantes derivados de las actividades del sector primario.¹ En este contexto, la energía agrovoltaica favorece la generación de energía eléctrica tanto para la distribución dentro de las instalaciones, como sucede en el caso de los invernaderos; como para el autoconsumo de las granjas, pues la electricidad obtenida puede destinarse a suministrar la energía necesaria para su funcionamiento, reduciendo su dependencia energética así como la utilización de combustibles fósiles.

Otro aspecto importante señalado es que los paneles solares [a modo de techumbre, o como parte del techo en invernaderos] mantienen protegidos los cultivos ubicados por debajo de ellos al reducir la evaporación, conservando la humedad y reduciendo la huella hídrica de las explotaciones agrícolas previas. En otros términos, la sombra generada por los paneles solares, gestionada con la tecnología de sombreado activo, resulta beneficiosa para los cultivos que requieren ambientes más frescos y húmedos, y es una solución perfecta para protegerlos de las altas temperaturas en zonas muy cálidas o con una alta radiación solar (Repsol, 2023).

Por todo lo anterior, es de sumo interés promover la utilización de instalaciones agrovoltaicas pues permiten un uso más coherente de la tierra tanto para la producción de alimentos o alimentación del ganado como para la producción de electricidad.

El uso de la energía solar en la agricultura

El sol siempre ha sido la principal fuente de energía de la Tierra y continúa siendo un foco esencial de investigación en la actualidad. En el contexto de la transición energética dirigida a la utilización de energías más limpias, la energía solar es indispensable y ofrece numerosas ventajas, especialmente en términos de protección del planeta del cambio climático. Al recolectar y aprovechar la radiación del sol, posibilita la probabilidad de reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles y las consiguientes emisiones de gases de efecto invernadero y, en última instancia, lograr una autosuficiencia energética razonable. El sol es una fuente objetiva e ilimitada de energía que está disponible todos los días y todos los años. Es una presencia constante y abundante.

A pesar de su aparente insignificancia, el hecho de que el sol ilumine en mayor o menor medida todos los lugares de la Tierra ofrece numerosos beneficios. La energía solar es una alternativa atractiva en zonas rurales, remotas o inaccesibles porque puede aprovecharse

¹ Las principales actividades del sector primario son el sector agropecuario (agricultura y ganadería), la silvicultura (explotación forestal), la apicultura, la acuicultura, la minería, la pesca, y la caza. Usualmente, los productos primarios son utilizados como materia prima en las producciones industriales.

en cualquier parte del planeta, incluso en lugares con escasa infraestructura y conectividad precaria hacia una red eléctrica. En este sentido, el sol proporciona un beneficio social al permitir que personas ubicadas en áreas remotas sin acceso a una red eléctrica regular utilicen la energía solar directamente. Un ejemplo destacable es la instalación de paneles fotovoltaicos en las techumbres.

Otras energías renovables carecen de la misma potencialidad, o al menos no se pueden utilizar con la misma facilidad, es una fuente de energía que genera más puestos de trabajo para quienes diseñan, construyen, instalan y mantienen centrales eléctricas. Al aprovechar al máximo esta oportunidad, las familias, las empresas y los gobiernos pueden invertir y, de hecho, impulsar la economía. Es así que, por la necesidad de grandes superficies de terreno tanto para la colocación de paneles solares y la obtención de alimentos, nace la idea de combinar en un mismo espacio, cultivos y paneles solares creando así la energía agrovoltaica (Communications, 2019).



Figura 1. La energía solar.

Fuente: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-energia-solar/>

Las innovaciones en torno a este modelo permiten la convivencia y la interacción de estos dos conceptos haciendo crecer el valor de la tierra y revirtiendo positivamente en las comunidades locales donde se implanta. También favorece a la conservación de la naturaleza y ayuda al mantenimiento de los ecosistemas (Renovables, 2023).

La agrovoltaica

La agrovoltaica se concibe como una práctica dual enfocada a producir de modo simultáneo productos agrícolas y energía eléctrica en una parcela de tierra determinada, dentro de este marco de interpretación, los paneles solares pueden coexistir y cohabitar con cultivos o incluso con ganado en una misma superficie.

La productividad y la eficacia de los paneles solares son actualmente objeto de numerosos estudios². La agricultura sostenible y las fuentes de energía renovable se pueden utilizar como factor de mitigación porque el cambio climático ya se reconoce como una amenaza mundial. La agrovoltaica se usa activamente en la mayor parte del mundo en razón de que es un recurso que puede ayudar al crecimiento económico de la población y al mismo tiempo que promueve el crecimiento de las áreas de bajos ingresos.

Esta forma dual de producción se emplaza en el ámbito rural; allí la energía solar se puede utilizar de varios modos, incluido un método fácil y ecológico para secar frutas o semillas. Sin embargo, también es necesario proporcionar electricidad para que el agua se pueda extraer mediante una bomba para riego o para otros fines, como sistemas de calefacción (Energcitys, 2020).



Figura 2. Cultivos y paneles solares pueden compartir el mismo espacio.

Fuente: <https://agrojardin.net/que-es-la-energia-agrovoltaica>

Es precisamente la sinergia manifiesta entre la energía fotovoltaica que produce cero emisiones y la continuidad de la agricultura capaz de producir alimentos al mismo tiempo, el componente que la sitúa como una alternativa esperanzadora contra el cambio climático al aumentar la eficiencia de la superficie sin dejar huella de carbono.

Tipos de instalación

Hay algunas opciones para su instalación, pero la más común es elevar los paneles solares varios metros por encima de la granja o pastizal utilizando sistemas de soporte fijos. Por tanto, el acceso a los cultivos o pastos de abajo es sencillo tanto para maquinaria como para animales ambulantes de esta manera permite a los agricultores aprovechar los rayos del sol sin someter sus cultivos a una radiación solar excesiva.

² Es obvio decir que existen sectores a favor y detractores que argumentan el costo, el mantenimiento y la eficiencia de los paneles solares.



Figura 3. Soportes fijos al terreno que permiten colocarlos paneles a determinada altura.

Fuente: <https://enerdos.es/agrovoltaica>

En tal sentido, los paneles fotovoltaicos distribuidos en hileras se presentan como una serie de sistemas pasivos que se utilizan para el acondicionamiento y mejoramiento del confort lumínico en la zona de cultivo; principalmente como otros sistemas de protección solar al no permitir el calor excesivo. Al estar situados a lo alto, no obstruyen la visión del agricultor y su correcta distribución permite el acomodo estratégico de distintas zonas sombreadas para la recolección del cultivo como si fuese una pérgola.

Cultivos entre paneles solares

La mayoría de las plantas, dependiendo del cultivo, sólo pueden soportar una cantidad limitada de luz solar directa antes de que su productividad disminuya realmente. Los paneles se pueden colocar entre cultivos para dar sombra a las tierras de cultivo durante una cantidad predeterminada de horas cada día, mantener la humedad en el suelo por más tiempo, permitiendo usar menos agua, mantener los niveles de producción de alimentos y conservar agua y un crecimiento de la producción.



Figura 4. Estructuras compuestas de gran altura con paneles fotovoltaicos sobre cultivos.

Fuente: <https://agroinformacion.com/>

Existen diversas opciones arquitectónicas para la disposición de los paneles solares, como se observa en la imagen 4, se puede hacer una estructura en serie de techos a dos aguas en los cuales sólo se utiliza una parte de la techumbre y la que se encuentra descubierta permite la entrada de la luz solar y la acción del viento.



Figura 5. Estructuras simples con paneles fotovoltaicos de baja altura.

Fuente: <https://esueno.com/>

En la imagen 5 se observa una serie de techumbres a modo de toldos estableciendo un sistema de protección solar que puede ser de carácter fijo; estos se instalan en las áreas de cultivo para protegerse de excesos de radiación, pero en la finalidad de no obstruir la circulación del usuario entre los cultivos dejando áreas iluminadas.

Los invernaderos: un lugar ideal para la instalación de paneles solares.

También se pueden utilizar paneles solares fotovoltaicos en invernaderos, lo que permitiría un importante ahorro energético y un aumento de la producción y también alargaría su vida útil. En consideración del hecho que, al hablarse de un invernadero como un ámbito cerrado, las plantas que se ubican por debajo de los paneles reciben sin problema suficiente luz y, al mismo tiempo, están protegidas contra el sol directo, la lluvia, el granizo y la aguanieve.

En este punto vale la pena apuntar que es crucial reducir el precio de venta de los paneles solares en el mercado para la expansión de este modelo. Además, se deberá considerar la existencia de apoyo del sector público para la puesta en marcha de estas instalaciones, como también la temporada de mayor insolación, éstos son dos factores clave para valorar y rentabilizar la conversión de cubiertas de cultivo cubiertas con plástico en espacios de captación de energía (Ecoinventos 2022).

En términos positivos de adopción, la tecnología “agrovoltaica” ya se utiliza activamente en casi todas partes del mundo. La capacidad agrovoltaica instalada mundial aumentó de unos 3 MWp a casi 3 GWp entre 2012 y 2019, según el Instituto Fraunhofer de Sistemas de



Figura 6. Paneles solares sobre invernadero.

Fuente: <https://www.fundeen.com/blog-energias->

Energía Solar, que también cita programas de subsidios gubernamentales implementados en Japón (2013), China (2014) , Francia (2017) y Estados Unidos (2018) (Magazine, 2021).

Proyectos actuales de agrovoltaica en Europa

La energía agrovoltaica pretende posicionarse como la simbiosis ideal entre la producción de energía solar y la actividad agrícola (ya sea en el cultivo o bien el pastoreo) en un mismo terreno, maximizando su extensión y multiplicando los beneficios en ambos rubros.

Aunque no es un enfoque novedoso, los proyectos agrovoltaicos son cada vez más frecuentes en todo el mundo: mientras Alemania, España, Francia, e Italia ya están trabajando en una regulación específica, de la misma forma, los proyectos agrovoltaicos son cada vez más frecuentes en los EE. UU. (Futuro-movimiento, 2022).

En el caso Ibérico, España ofrece las condiciones perfectas para el desarrollo de la energía agrovoltaica. Por sus extensas tierras de cultivo y su clima, que también recibe unas 2.500 horas de luz solar al año. Por estas circunstancias, la energía agrovoltaica es la mejor manera de incrementar la productividad de muchas tierras de cultivo de esa nación. Un ejemplo de ello es la tecnología utilizada en las fincas vitivinícolas de la Escuela de Enología San Gabriel de Aranda de Duero, España (Repsol, 2023).

De modo similar, otros ejemplos se ubican en Alemania y Holanda. La empresa de sistemas solares BayWa r.e. en Alemania y su filial holandesa, GroenLeven, están construyendo cinco proyectos piloto de energía agrovoltaica en Holanda, donde están probando cinco tipos diferentes de cultivos: arándanos, grosellas, frambuesas, fresas y moras. Vale la pena remarcar que el mayor de los proyectos se trata de una planta solar de 2,67 MW situada en un cultivo de frambuesas de 3,2 hectáreas, situado en el municipio holandés de Zevenaar, cerca de la ciudad de Arnhem, en la frontera entre los Países Bajos y Alemania.

Sin embargo, habrá que hacer una salvedad al mencionar que los módulos fotovoltaicos estándar son ineficaces para un proyecto agrícola, según las dos empresas citadas ante-

riormente. Willem De Vries, jefe de proyecto de agrovoltaica en GroenLeven, comenta que se han utilizado paneles solares monocristalinos especiales que poseen cierta opacidad. El mismo explica; las plantas debajo de los paneles deben recibir suficiente luz y, al mismo tiempo, estar protegidas contra el sol directo, la lluvia, el granizo y la aguanieve, quien considera que los requisitos especiales están relacionados con la transparencia.

“Hasta ahora se han construido dos proyectos piloto diferentes, con dos tipos de paneles con diferentes niveles de transparencia”[...]“El rendimiento de los cultivos aumenta significativamente a medida que aumenta la transparencia de los paneles”. Se utilizaron paneles de vidrio de 260 W, que pesan alrededor de 35 kg más por panel que un panel normal. Se aplicaron capas de vidrio relativamente gruesas para garantizar que los paneles resistan cualquier tipo de clima.

Existen dos formas diferentes de enfriar cultivos de forma pasiva. Los paneles primero absorben parte de la radiación. En segundo lugar, los módulos están colocados para permitir que el aire fluya entre ellos. Gracias al flujo de aire natural, la temperatura debajo de las plantas se mantiene mucho más baja que la temperatura del aire circundante y mucho más alta que la de las cubiertas hechas de aluminio estándar.

Según la empresa GroenLeven, el calor se disipará de forma rápida y pasiva a través de las estructuras de soporte. A pesar de que la cantidad exacta de luz es crucial, se descubrió que el clima debajo de los paneles solares es estructuralmente mejor que bajo la cubierta de plástico convencional. Esto se determinó a través de un sistema de seguimiento. En los días cálidos, la temperatura dentro de los paneles es 5 grados más baja que bajo cubiertas de plástico e incluso 2 grados menos que en condiciones normales (Agroempresarios, 2020).

Ventajas de la agricultura agrovoltaica

La agrovoltaica se está empezando a desarrollar con fuerza. Los proyectos alrededor del mundo que se están llevando a cabo para su estudio y posterior uso ya han arrojado mucha información y la certeza de que la agrovoltaica jugará un papel importante en el futuro del sector agrícola, en el proyecto de un mundo verde, que tiene como objetivo claro la lucha contra el cambio climático y la conservación del medio ambiente.

En este sentido, la agrovoltaica permite aprovechar al máximo la energía solar. Si se dedicara solo el 1 % de los terrenos cultivables a la producción de electricidad solar, ya sería suficiente para compensar la demanda mundial de energía.

De la misma forma existe una mejora en determinados cultivos. Aunque no todos los cultivos tienen las mismas necesidades climáticas, los paneles pueden actuar como barrera frente la radiación solar excesiva, el calor, la sequía o las fuertes precipitaciones.

La agricultura agrovoltaica genera un impacto económico positivo en el entorno. En su aspecto energético, la agrovoltaica posibilita la generación de electricidad y potencia un mayor desarrollo de las zonas rurales. Pero no solo eso, esta tendencia cada vez más extendida favorece el enriquecimiento de la zona gracias a la actividad económica que se crea a su alrededor (Vector, 2022).

Proyección a futuro

La adopción de la tecnología agrovoltaica permitiría a México, uno de los países con mayores niveles de radiación solar del mundo y el décimo exportador de alimentos, alcanzar sus objetivos de lucha contra el cambio climático sin poner en peligro la seguridad alimentaria del país y también acelerar el crecimiento de la economía.

La agrovoltaica, desde una perspectiva socioeconómica, fomentaría la creación del valor en las regiones donde se utiliza, así como el desarrollo rural, porque los proyectos pueden ser ejecutados de forma descentralizada por agricultores, comunidades y PyMEs, lo que se traduce en ingresos adicionales. Por último, otro beneficio de la generación de electricidad es que permite la instalación de servicios esenciales como cocina, suministro de agua, atención médica, comunicaciones y educación incluso en las regiones más aisladas y subdesarrolladas (Magazine, 2021).

Referencias

Communications, E. G. (2019). *Enel Green Power S.p.A. - Communications*. Retrieved Julio 2023, from <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-solar/ventajas-energia-solar>

Agroempresarios. (2020). Retrieved from *agroempresario.com*: <https://agroempresario.com/publicacion/37630/paneles-solares-especiales-para-la-agrovoltáica/?cat=124>

Ecoinventos (2022). Los invernaderos solares, el futuro de la energía agrovoltáica, disponible en <https://ecoinventos.com/invernaderos-solares-energia-agrovoltáica/> Recuperado el 1 de agosto de 2023.

Enercitys. (2020). *enercitys*. Retrieved from *enercitysa.com/blog/energia-solar-en-la-agricultura*: <https://enercitysa.com/blog/energia-solar-en-la-agricultura/#:~:text=Hay%20diferentes%20formas%20de%20aprovechar,requerimientos%20como%20sistemas%20de%20calefacci%C3%B3n>.

Enerdos. (2021). *enerdos.es*. Retrieved from <https://enerdos.es/agrovoltáica/la-union-perfecta-tierra-y-energia-solar-fotovoltaica/>

Fundeen. (2023). *Funden.com*. Retrieved from <https://www.fundeen.com/blog-energias-renovables/energia-agrovoltáica-que-es-funcionamiento>

Futuro-movimiento. (2022). *motorpasion*. Retrieved from *www.motorpasion.com*: <https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/esta-tecnica-que-auna-energia-solar-agricultura-sostenible-tiene-todo-para-triunfar-espana-salvo-detalle>

Iberdrola. Agrovoltáico. Energía agrovoltáica, cuando la agricultura y las renovables se dan la mano. disponible en <https://www.iberdrola.com/innovacion/energia-agrovoltáica#:~:text=La%20agrovoltáica%2C%20que%20busca%20la,lucha%20contra%20el%20cambio%20clim%C3%A1tico>. Recuperada el 20 de mayo de 2023

Magazine, P. (2021). *www.pv-magazine-mexico.com*. Retrieved from <https://www.pv-magazine-mexico.com/2021/02/05/agrovoltáica-energia-solar-desarrollo-y-agricultura-sostenible/> Recuperada el 10 de Julio de 2023.

Renovables, E. (2023). *fundeen*. Retrieved from *www.fundeen.com*: <https://www.fundeen.com/blog-energias-renovables/energia-agrovoltáica-que-es-funcionamiento>

Repsol. (2023). Retrieved from *Repsol.com*: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-agrovoltáica/index.cshtml#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20agrovoltáica%20favorece%20la,energ%C3%A9tica%20y%20los%20gastos%20asociados>.

Solar, E. (2023). *BBVA.com*. Retrieved from <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-energia-solar/>

UNAM, C. (2022). ciencia.unam.mx. Retrieved from <https://ciencia.unam.mx/leer/1323/tecnologia-agrovoltaica-la-combinacion-de-agricultura-y-uso-de-la-energia-solar->

Vector. (2022). Retrieved from <https://www.vectorenueables.com/es/recursos/blog/agrovoltaica-las-ventajas-de-unir-renovables-y-cultivos>

Vulnerabilidad de México por Efectos del Cambio Climático y Estrategias de Diseño Bioclimático Sostenible y Resiliente para Mitigarlo

Dr. José Roberto García Chávez¹

1 Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco. CyAD.
Departamento del Medio Ambiente. Área de Arquitectura Bioclimática.
Posgrado en Diseño Bioclimático
Correo: jgc@azc.uam.mx

Resumen

Los actuales patrones y usos de la energía tienen como base la combustión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para la realización de las diversas actividades antropogénicas, lo cual ha provocado un severo deterioro del medio ambiente y como consecuencia, fenómenos como el Calentamiento Global (CG) y el Cambio Climático (CC), que afectan al planeta. Diversos factores han inducido esta situación, entre los cuales se incluyen: Crecimiento poblacional, intensiva industrialización y expansión urbana, entre otros, alterando drásticamente los patrones del clima. En el caso específico de los centros urbanos, la intensa y acelerada emisión de GEI ha provocado diversos niveles de contaminación en la atmósfera, hidrosfera y litosfera, y fenómenos como el efecto de la Isla de Calor Urbana, lo que a su vez ha incrementado el consumo de energía eléctrica de los equipos de climatización artificial en los edificios, y en aquellos que por limitaciones económicas no se pueden adquirir, falta de confort higrotérmico y daños en la salud de sus ocupantes. En México, la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), es un caso representativo de esta situación. En este trabajo se analiza la vulnerabilidad de México por efectos del Cambio Climático y se plantean Estrategias de Diseño Bioclimático y Tecnologías Sostenibles para mitigarlo. Por las condiciones geográficas de México, el nivel de vulnerabilidad al CC es elevado, pero al mismo tiempo, el potencial de las energías renovables existentes en el país y su implementación ofrece una promisoriosa alternativa de solución. Con la aplicación de estas acciones, es viable atenuar el CC y contribuir al mejoramiento del medio ambiente, así como de la calidad de vida y de la salud de las personas.

Palabras clave: Vulnerabilidad, cambio climático, isla de calor urbana, estrategias bioclimáticas, salud.

Abstract

The current patterns and uses of energy are based on the combustion of Greenhouse Gases (GHG) to carry out various anthropogenic activities, which has caused a severe deterioration of the environment and as a consequence, phenomena such as Global Warming (GW) and Climate Change (CC), which severely affect the planet. Several factors have induced this situation, including Population growth, intensive industrialisation and urban sprawl, among others, drastically altering climate patterns. In the specific case of urban centres, the intense and accelerated emission of GHGs has caused severe levels of pollution in the atmosphere, hydrosphere and lithosphere, and phenomena such as the Urban Heat Island effect, which in turn has increased the consumption of electrical energy for artificial air conditioning equipment in buildings, and in those that cannot be purchased due to economic limitations, lack of hygrothermal comfort and damage to the health of their occupants. In Mexico, the Metropolitan Zone of the Valley of Mexico (ZMVM) is a representative case of this situation. This paper analyses Mexico's vulnerability to the effects of Climate Change and proposes Bioclimatic Design Strategies and Sustainable Technologies to mitigate it. Due to Mexico's geographical conditions, the level of vulnerability to CC is high, but at the same time, the potential of renewable energies existing in the country and their implementation offers a promising alternative solution. With the application of these actions, it is feasible to mitigate

CC and contribute to the improvement of the environment, as well as the quality of life and people's health.

Keywords: Vulnerability, climate change, urban heat island, bioclimatic strategies, health.

Introducción

La energía es indispensable para la realización de las diversas actividades del Hombre, quien desde épocas muy remotas ha estado fuertemente vinculado a ella. En un principio, las principales fuentes de energía utilizadas por el Hombre fueron: el sol, el viento, la cinética del agua, la madera y el metabolismo muscular, entre otras. Con el descubrimiento del carbón y el surgimiento de la Revolución Industrial a mediados del siglo XVIII, estas fuentes de energía, limpias y renovables comenzaron a ser sustituidas gradualmente, por los llamados combustibles fósiles convencionales: carbón, petróleo y gas natural.

A partir de la segunda mitad del siglo XX, el consumo mundial de energía primaria se ha incrementado considerablemente, hasta alcanzar en 2022: 604.04 EJ, equivalentes a 1.442725×10^{10} (14,427.25 millones de toneladas de petróleo equivalente MTOE). (IE, 2023) Figura 1.

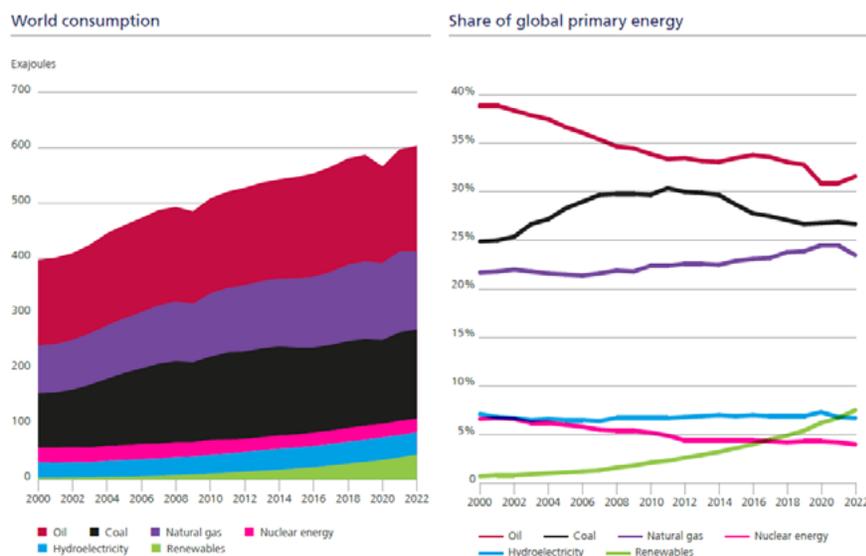


Figura 1. Consumo Mundial de Energía Primaria

Fuente: Institute of Energy. Review of World Energy, 2023. Statistical Review of World Energy <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> Recuperada en Oct 27, 2023.

Por lo que respecta a la variación de temperaturas a nivel global, en un análisis histórico comparando datos recientes en tiempo real desde 1880 hasta 2023, el incremento ha sido evidente y constante (NASA 1, 2023) (Figura 2). Estos datos del ciclo estacional muestran claramente el aumento de las temperaturas a nivel global desde 1880. y que, durante el período típico de sobrecalentamiento, que, debido a la distorsión del clima, frecuentemente

ocurre antes y se extiende por más tiempo. A veces la duración aproximada en promedio puede ser de más de seis meses, dependiendo de las condiciones geográficas y climáticas de cada lugar. En la Figura 2, la curva del año 2023 muestra claramente el incremento de temperaturas, comparado con el año 2020 (Figura 2).

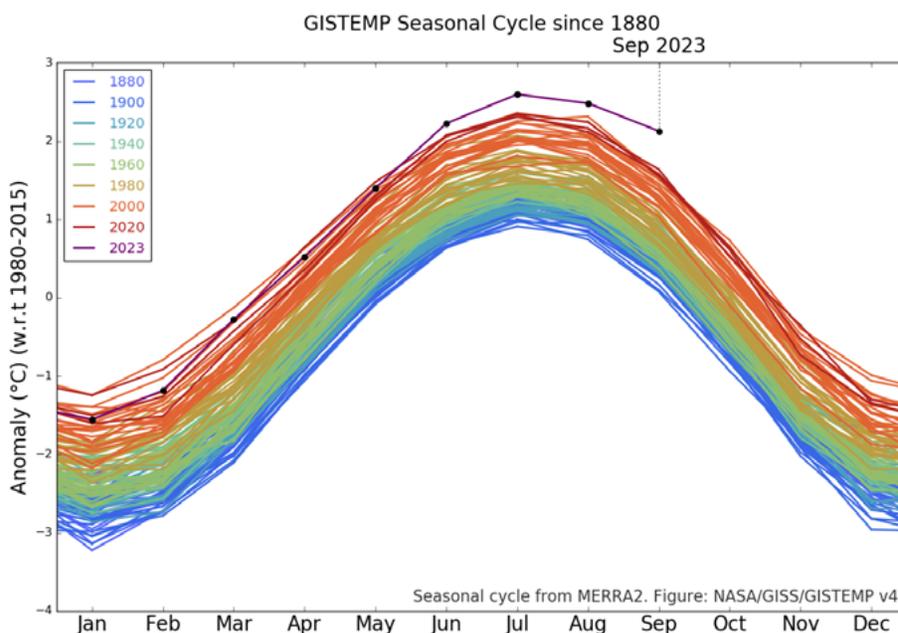


Figura 2. Variación de los ciclos estacionales de temperaturas en el planeta a partir de 1880.

Fuente: NASA 1. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/
 Recuperado: Octubre 18, 2023

Las proyecciones de temperaturas reportadas por el Grupo de Trabajo I del IPCC han reportado los diferentes escenarios que se han modelado en función del avance del tiempo (IPCC, BFS 2023) Figura 3.

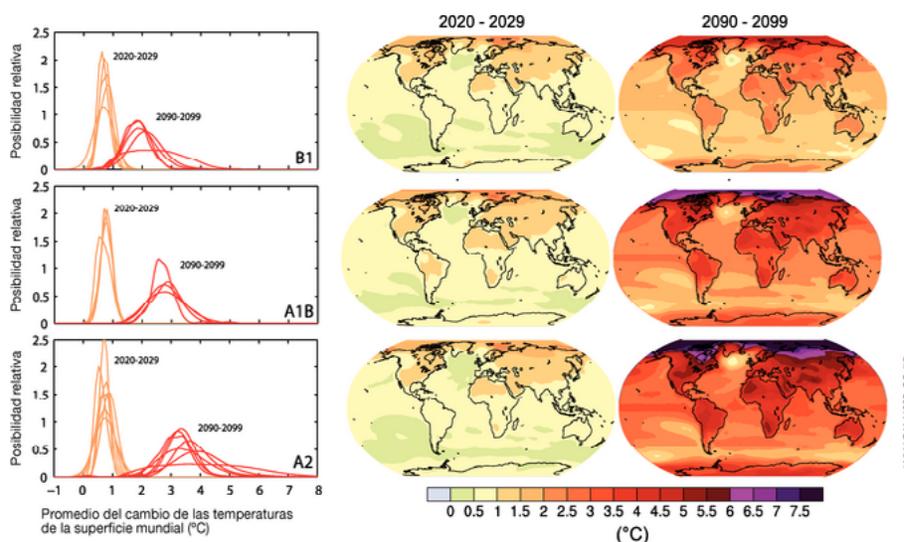


Figura 3. Proyecciones de las Temperaturas de la Superficie Terrestre.

Fuente: IPCC, 2023. https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/figure-spm-6.html. Recuperado: Octubre 18, 2023

Por otra parte, en el caso de México, el consumo de energía primaria ascendió a casi 8.73 ExaJoules en 2022, lo que representa un incremento de alrededor del nueve por ciento respecto al año anterior y la cifra más alta registrada en el periodo considerado (Statista, 2023) (Figure 4). Durante 2020, aproximadamente el 84% de la energía primaria generada en México provenía de hidrocarburos como el carbón, el petróleo y el gas natural. El consumo de energías renovables en México se ha cuadruplicado en una década, ascendiendo aproximadamente a 450 PetaJoules en 2022. En comparación con el año anterior de 2021, esto representa un descenso del 2.2%, debido principalmente a las condiciones del confinamiento y la pandemia de Covid-19. EL crecimiento de la producción y consumo de las energías renovables es mayor que el de las energías provenientes de los combustibles fósiles (Statista, 2023).

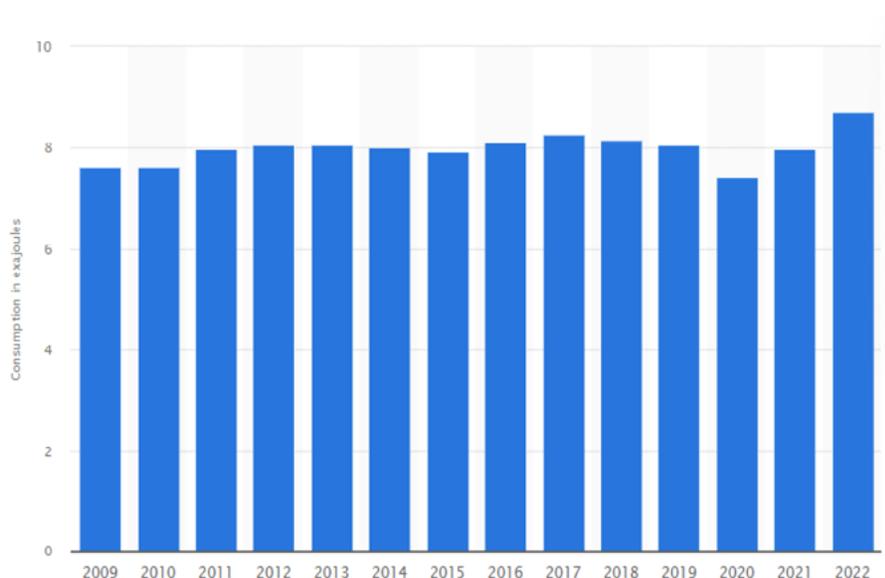


Figura 4. Producción de Energía Primaria en México de 2009 a 2022 (en ExaJoules).

Fuente: NASA 1. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/
Recuperado: Octubre 18, 2023

Consumo de Energía en las Edificaciones a Nivel Global

Los sectores de los edificios y la construcción combinados son responsables de más de un tercio del consumo mundial de energía final y casi el 40% del total de las emisiones directas e indirectas de CO² (IEA, 2023). Por lo tanto, el funcionamiento de los edificios representa el 30% del consumo mundial de energía final y el 26% de las emisiones mundiales relacionadas con la energía (el 8% son emisiones directas de los edificios y el 18% emisiones indirectas de la producción de electricidad y calor utilizada en los edificios). Las emisiones directas del sector de los edificios disminuyeron en 2022 en comparación con el año anterior, a pesar de que las temperaturas extremas aumentaron las emisiones relacionadas con los sistemas de enfriamiento y calefacción en algunas regiones. En 2022, el consumo de energía del sector de los edificios aumentó en aproximadamente un 1% (IEA, 2023).

En resumen, los edificios, con sus constantes y elevados consumos de energía, son responsables en gran medida del Cambio Climático, ya que representan un tercio del consumo mundial de energía y una cuarta parte de las emisiones de CO² (WEO, 2023) (Figura 5). De todos los géneros de edificios, los edificios residenciales son los que más energía consumen. Los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) concentran el 38% del consumo de energía y, en consecuencia, el uso de la electricidad está aumentando rápidamente.

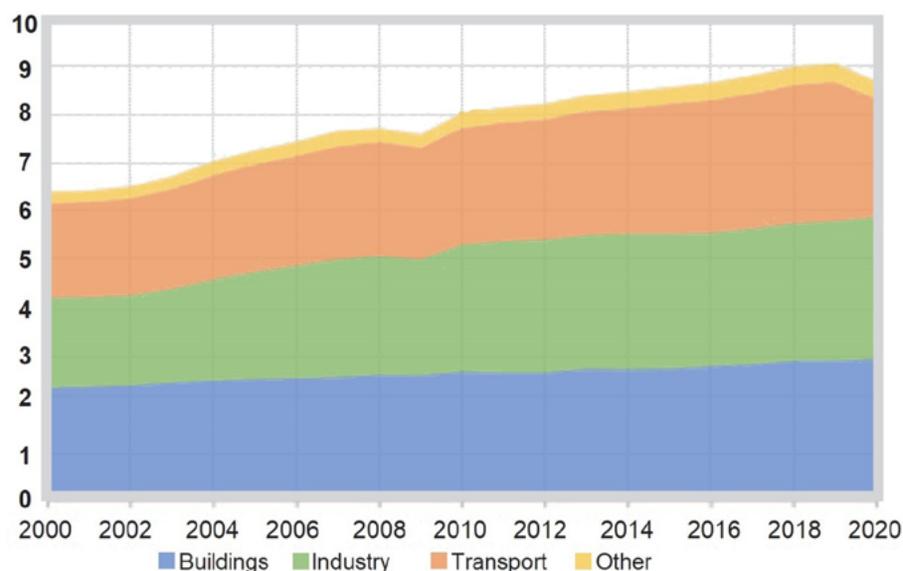


Figura 5. Consumo Mundial de Energía por Sectores.

Fuente: IEA, 2021e, IEA, 2021d, IEA, 2021b. Recuperado en octubre 18, 2023

Correlación de los Elevados Consumos de Energía y su Impacto Ambiental a Nivel Global

El consumo de energía a nivel global, proveniente principalmente de acciones antropogénica (IPCC, 2023), es el mayor factor responsable de una creciente emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera y aumento del Calentamiento Global (CG) y, en consecuencia, severas afectaciones en el medio ambiente y en sus diversos ecosistemas, provocando múltiples alteraciones en los patrones normales del clima a nivel global, con fenómenos meteorológicos cada vez más frecuentes y de mayor intensidad a nivel global.

Por otra parte, además de los elevados incrementos de temperaturas en la superficie terrestre, en la superficie marina también se han registrado incrementos cada vez más evidentes. En la Figura 7 se aprecia cómo ha aumentado la temperatura media de la superficie de los océanos del mundo desde 1880. Este gráfico utiliza la media de 1971 a 2000 como referencia para representar el cambio (NASA 2, 2023). La elección de un periodo de referencia diferente no cambiaría la forma de los datos a lo largo del tiempo. La banda sombreada muestra el margen de incertidumbre de los datos, con base en el número de mediciones recogidas y la precisión de los métodos utilizados.

Los océanos cubren más del 70% de la superficie terrestre y tienen una gran capacidad calorífica. Han absorbido el 90% del calentamiento que se ha producido en las últimas décadas debido al aumento de los Gases de Efecto Invernadero. En las capas superficiales, a pocos metros del nivel superior de los océanos, éstos almacenan tanto calor como toda la atmósfera de la Tierra (NASA 2, 2023). Los efectos del calentamiento de los océanos incluyen el aumento constante del nivel del mar debido a la expansión térmica, la decoloración de los corales, el deshielo acelerado de las principales capas de hielo de la Tierra, la intensificación y rápido impulso de los huracanes y severos cambios en la salud y la bioquímica de los océanos. El contenido de calor oceánico que hay bajo la superficie del océano, a muy poca profundidad es el “motor” que “alimenta” los huracanes y exagera su intensidad.

En eventos meteorológicos recientes a nivel mundial, se han evidenciado los efectos del aumento de la temperatura en los océanos, que se ha incrementado más de 300% en las tres últimas décadas, más que en la superficie terrestre, debido principalmente a acciones antropogénicas (NOAA, 2023) (Figura 6). Los océanos, actúan como sumideros de carbón, ya que absorben el calor y energía liberados por el continuo incremento de las emisiones de GEI atrapados en el sistema terrestre y potencian los efectos de los huracanes que a su vez se intensifican en muy corto tiempo. En la actualidad, los océanos del planeta han absorbido cerca del 90% del calor generado por el aumento de las emisiones de los GEI (UN 1, 2023). Por otra parte, el nivel medio global del mar ha aumentado entre 21 y 24 centímetros desde 1880. El aumento del nivel del agua se debe principalmente a una combinación de agua de deshielo de glaciares y capas de hielo y a la expansión térmica del agua de mar a medida que se calienta.

En 2022, el nivel medio global del mar alcanzó un récord: 101.2 mm por encima de los niveles de 1993. En muchos lugares del planeta, el ritmo de aumento del nivel del mar es superior a la media mundial, debido principalmente a acciones antropogénicas y a procesos terrestres como la erosión y el bombeo de petróleo y aguas subterráneas, entre otros factores (NOAA, 2023) (NASA 2, 2023) (Figura 6). Diversas observaciones por satélite han detectado que las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida están perdiendo hielo por el Calentamiento Global en las marinas que las rodean. Incluso una pérdida parcial de estas capas de hielo provocaría una subida de 1 metro. Si se perdieran por completo, ambas capas de hielo en el Polo Norte y el Polo Sur contendrían agua suficiente para elevar el nivel del mar 66 metros (NASA 2, 2023).

En resumen, el aumento del nivel del mar es una grave amenaza para la vida costera en todo el planeta, que provocan el incremento de la intensidad de las mareas, las inundaciones y diversos daños en las zonas costeras, donde se encuentran grandes núcleos de población en comunidades contiguas a los litorales, además de frágiles hábitats de vida de los ecosistemas, como los manglares, lagos lagunas.

Un estudio reciente ha reportado que un total de 2 715,023 hectáreas en la costa de México están expuestas a inundaciones bajo el escenario previsto de aumento del nivel del mar

para finales de este siglo (Fernández, V et. al, 2022). Lugares como el Golfo de California, el Golfo de México y el Mar Caribe, representan el 46% y el 45% de la superficie total propensa a severas inundaciones, respectivamente. Asimismo, los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit, Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo se ubican en estas regiones y presentan las mayores extensiones potenciales de inundaciones y otros riesgos colaterales por las afectaciones resultantes.

Hay múltiples ejemplos en diversos lugares del planeta donde el aumento del nivel del mar ha provocado la desaparición de comunidades que se encontraban en las inmediaciones de las playas, a nivel del mar (Figura 8), situación que continuarán presentándose debido a las consecuencias del Cambio Climático por acciones antropogénicas.

GLOBAL SEA LEVEL

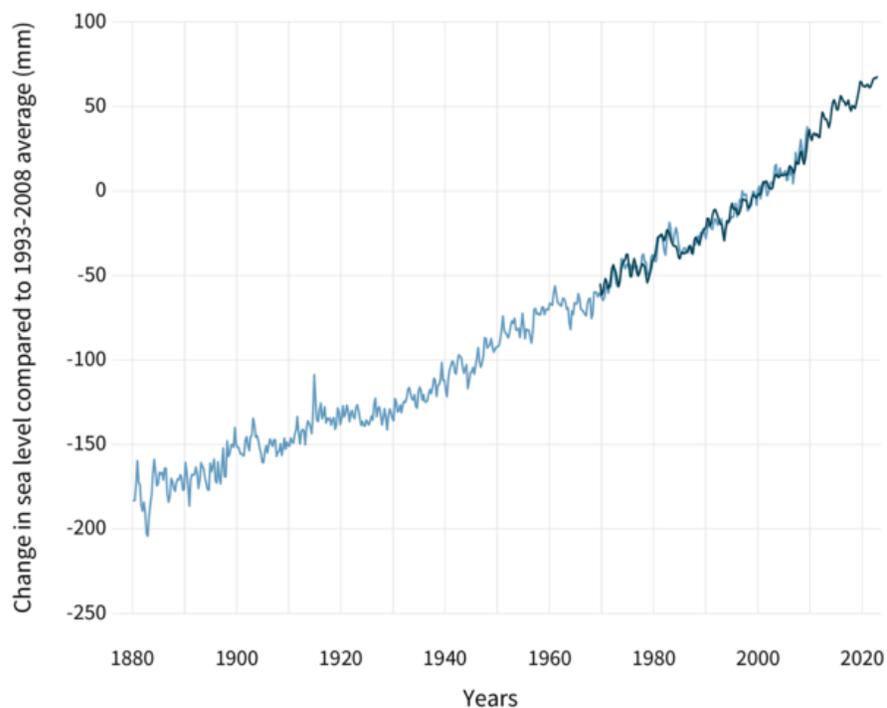


Figura 6. Incremento del Nivel del Mar a partir de 1880.

Fuente: NOAA, 2023. Climate Change. Global Sea Level

<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>

NASA 2, 2023. Global Climate Change

Recuperados en Octubre 27, 2023

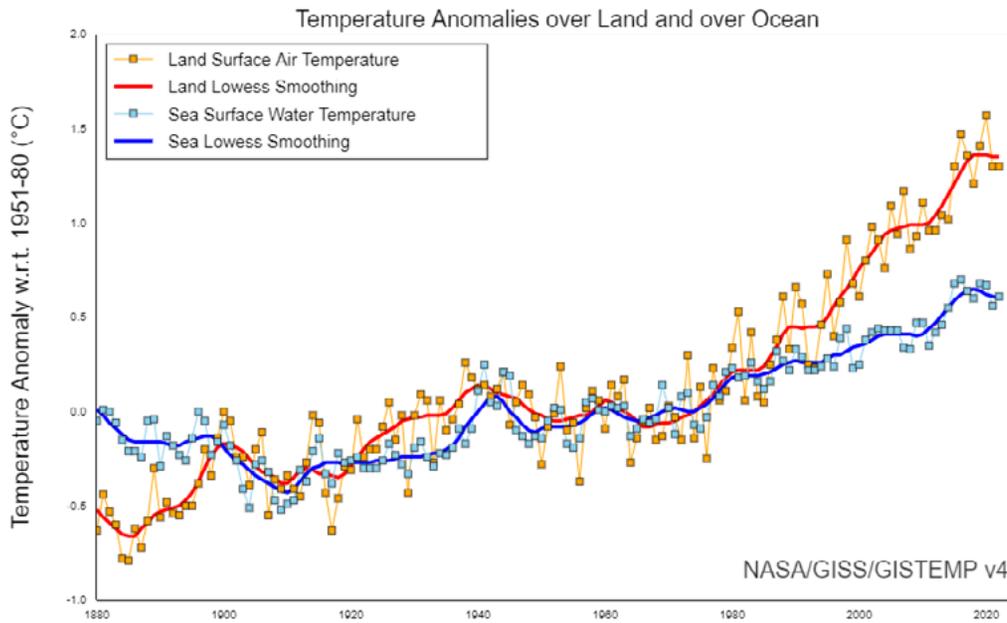


Figura 7. Variación de temperatura media de la superficie terrestre y de los océanos del mundo desde 1880.

Fuente: NASA 2, 2023. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/
Recuperado en Octubre 27, 2023



Figura 8. Impacto Potencial del Incremento del Nivel del Mar en comunidades costeras.

Fuente: Yale Climate Connections, 2021
<https://yaleclimateconnections.org/2019/09/a-brief-introduction-to-climate-change-and-sea-level-rise/>
Recuperado en: Octubre 18, 2023

Situación Ambiental en México. Vulnerabilidad Climática

En México, los impactos del Cambio Climático en el medio ambiente podrían conducir a un aumento en la intensidad de las sequías, las lluvias y los ciclones tropicales, exacerbando las desigualdades en el empleo, la salud y el acceso a los alimentos, el agua y otros recursos. Todos estos factores podrían afectar a las condiciones de seguridad en diferentes regiones y sectores del país. Eventos meteorológicos recientes evidencian esta situación. De manera particular, México presenta una muy alta vulnerabilidad climática, por diversos factores. La geografía de México lo hace vulnerable a fenómenos meteorológicos extremos, como ciclones tropicales, devastadores huracanes e inundaciones, que amenazan las insuficientes y muy obsoletas infraestructuras de transporte, energía y agua del país. Los importantes centros turísticos costeros de México están en peligro por los efectos del Cambio Climático, sobre todo por la extensión de más de 11,600 km de litorales adyacentes con los océanos pacífico y atlántico, Golfo de México y Golfo de California, entre otros (Figura 9).

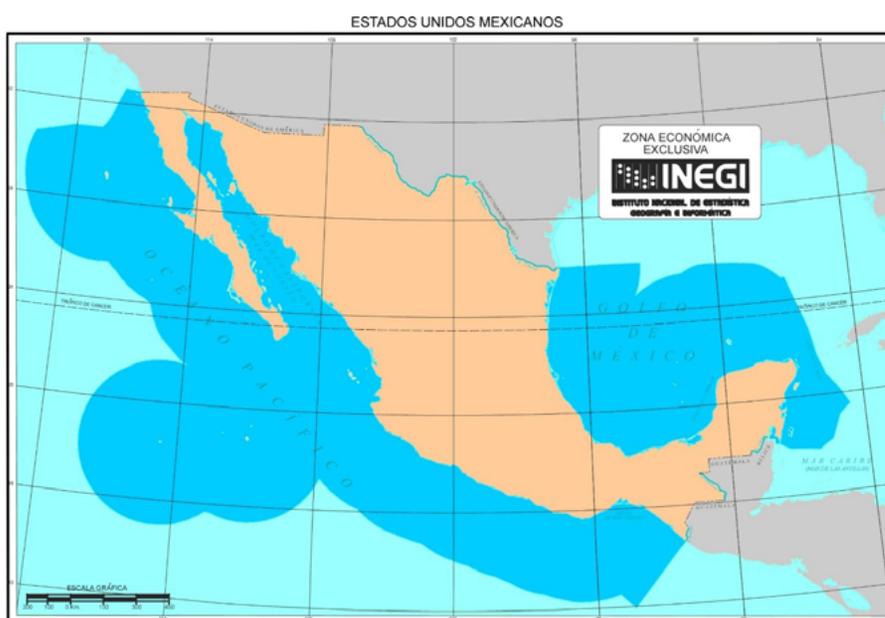


Figura 9. Superficies Marítimas y litorales de México. Zona Económica Exclusiva.

Fuente: INEGI, 2023. <https://geoweb2.inegi.org.mx/geografia/espanol/datosgeogra/extterri/frontera.cfm>
Recuperado: Octubre 27, 2023

Los litorales de México tienen una extensión de 11,122 km, exclusivamente en su parte continental y sin incluir litorales insulares, de los cuáles 7,828 km pertenecen al Océano Pacífico y 3,294 km al Golfo de México y Mar Caribe (INEGI 2023). Además, en México hay más de cuatro mil islas que se encuentran en la Zona Económica Exclusiva (ZEE), además de las que se localizan en los ríos, lagos, lagunas y presas. FUENTE: INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2020. Recientemente la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CANABIO), en su información relacionada con biodiversidad estableció un nuevo mapa de las líneas costeras de México, utilizando imágenes satelitales de alta resolución espacial y que aumenta en 680 kilómetros la extensión de costas que desde hace años tenía calculado el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 2023).

México tiene una extensión territorial de 1'964, 375 km², de los cuales 1'959, 248 km² son superficie continental y 5,127 km² son superficie insular. Además, a este territorio debe incluirse la Zona Económica Exclusiva de mar territorial, que abarca 3'149,920 km², por lo tanto, la superficie total del territorio nacional es de 5'114,295 km². Por su superficie, está en el lugar 14 a nivel mundial y es el lugar 5 con mayor territorio en América (INEGI, 2023).

Estrategias de Diseño Bioclimático Sostenible y Resiliente para Mitigar el Cambio Climático en México

La situación actual de los patrones y uso de las energías y los recursos naturales y su relación con las persistentes actividades humanas son insostenibles y ha provocado un drástico régimen climático en el que las tormentas se han vuelto más frecuentes e intensas, los periodos de sequía son ahora más largos, las inundaciones son incesantes y la formación de incendios forestales es más frecuente. Mitigar los efectos del cambio climático es crucial para minimizar los riesgos asociados al mismo. Así mismo, es muy importante adaptarse a esta nueva circunstancia climática para que sigan coexistiendo vida de todos los ecosistemas, incluyendo a los seres humanos en el planeta Tierra.

Por lo tanto, las actividades en las edificaciones deben estar orientadas a implementar acciones para contribuir a la mitigación y adaptación al Cambio Climático y tener como premisas plantear estrategias de diseño bioclimático para las diversas regiones climáticas enfocadas a lograr condiciones de confort ambiental integral para los ocupantes, así como complementarlas con la integración de tecnologías sostenibles con base en el aprovechamiento de las energías renovables.

La envolvente edificatoria juega un papel muy importante en este contexto, y debe actuar como un filtro selectivo de las condiciones del clima exterior circundante. El uso de materiales de baja energía implícita y sostenibles es esencial, así como el uso de diseños, métodos y sistemas de construcción creativos e innovadores. Además, el uso del agua en los edificios debe considerar la captación y aprovechamiento, en la medida de lo posible, de la precipitación. Otra actividad que debe tomarse en cuenta es el reciclaje y aprovechamiento de los desperdicios. Todas estas estrategias deben considerarse en su conjunto y exteriorizarse apropiada y sosteniblemente a nivel urbano y rural.

En resumen, es primordial garantizar que las necesidades energéticas y de recursos naturales de los espacios arquitectónicos se satisfagan de forma equitativa y sostenible y que la meta de lograr "Emisiones Netas Cero para 2050" (NZEB), tengan como premisa para 2030 los siguientes objetivos: Que los nuevos edificios sean 100% de "cero carbono" y los existentes lo sean en al menos un 20%, con la implementación de efectivas estrategias bioclimáticas y tecnologías sostenibles y resilientes (EU, 2021).

Un edificio de energía neta cero (NZEB) es aquel cuya eficiencia es óptima y que, a lo largo del tiempo de su operación, genera energía in situ o cercana, utilizando recursos energéticos renovables limpios, en una cantidad igual o superior a la cantidad total de energía consumida in situ.

Por otra parte, la descarbonización, que es el proceso de reducción del bióxido de carbono en la atmósfera debe tener como objetivo lograr una economía baja en el uso del carbono y alcanzar la neutralidad de carbono eliminando la combustión de combustibles fósiles. Esto implica que para que el Calentamiento Global no supere los 1.5 °C, como estableció el Acuerdo de París en la COP 21, las emisiones deben reducirse un 45% de aquí a 2030 y llegar a cero en 2050.

Conclusiones

En este trabajo se ha presentado la situación actual de las acciones antropogénicas, reportadas por diversos especialistas (IPCC, 2023), que han informado que un escenario muy probable, con base en un gran número de simulaciones disponibles de una variedad muy amplia de modelos de tal manera que se se mantienen las emisiones de Gas de Efecto Invernadero al ritmo actual o a uno superior, causarían un calentamiento mayor e inducirían muchos cambios en el sistema climático mundial durante el presente siglo XXI, que muy probablemente superarían a los observados durante el anterior siglo XX.

Si las temperaturas en el planeta llegan a 1.5° C de calentamiento global en 2040, lo que amplificará los peligros climáticos que presentarán numerosos riesgos para todos los ecosistemas, incluidos los humanos y nuestro entorno construido. Estos peligros incluyen el aumento de la frecuencia y la gravedad de las catástrofes en todo el mundo, como demasiadas han experimentado recientemente. A medio y largo plazo, la probabilidad y la gravedad de estos peligros y riesgos aumentarán drásticamente. Mitigar los resultados negativos a corto y largo plazo, y adaptarnos a nuestro planeta cambiante, depende principalmente de las acciones que debemos emprender a corto plazo.

Las estrategias de mitigación y adaptación del Cambio Climático en los edificios se agrupan principalmente en lograr condiciones de confort ambiental integral para los ocupantes, así como promover el ahorro y uso eficiente de la energía y los recursos naturales, implementando tecnologías sostenibles con base en el aprovechamiento de las energías renovables, así como el apropiado manejo de los residuos, la integración de la vegetación en los proyectos de edificación (como por ejemplo en cubiertas y muros), y la incorporación de elementos que faciliten el uso del transporte no motorizado (como la instalación de lugares para bicicletas y estaciones de carga para vehículos eléctricos), entre otras, y son aplicables en diferentes medidas tanto en edificios existentes como en edificios de nueva construcción. Incluso es posible diseñar proyectos que contemplen de forma integral todos estos aspectos desde su concepción arquitectónica.

Los edificios en los que vivimos y trabajamos, entre otras actividades, son responsables de aproximadamente el 40% del total mundial de emisiones directas e indirectas de Gases de Efecto Invernadero. El entorno construido es, por tanto, uno de los principales motores responsables del Cambio Climático. Al mismo tiempo, modificar cómo y qué construimos es una de las herramientas más eficaces para mitigar el deterioro del medio ambiente y lograr una

apropiada adaptación a él, e implica una gran responsabilidad para el sector de la construcción en todos niveles.

Las estrategias de mitigación y adaptación al Cambio Climático deben estar estrictamente relacionadas con el contexto específico en el que se ubican los edificios, de tal manera que con su aplicación en conjunto sea viable contribuir al mejoramiento del medio ambiente, así como a generar condiciones más favorables en la economía, la calidad de vida y sobre todo en salud de las personas.

Referencias

Energy Institute, 2023. Review of World Energy, 2023. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>

NASA 1, 2023. GISS Surface Temperature Analysis (v4). GISTEMP Seasonal Cycle since 1880. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/

NASA 2, 2023. Global Climate Change. Vital Signs of the Planet. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>

Fernández, V, et. al., 2022. Loss of Coastal Ecosystem Services in México: An Approach to Economic Valuation in the Face of Sea Level Rise. *Front. Mar. Sci.*, 22 July 2022 Sec. Coastal Ocean Processes. Volume 9 – 2022. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.898904>

Statista 2023. Primary Energy Consumption in Mexico from 2009 to 2022 (in ExaJoules) <https://www.statista.com/statistics/265573/primary-energy-consumption-in-mexico/>

IEA, 2023. Energy Systems. <https://www.iea.org/energy-system/buildings>

IEA, World Energy Outlook, 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

IPCC. Basic Physical Science 2023 Working Group 1 https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/figure-spm-6.html

IPCC, 2023. 6th Synthesis Report. March,2023. <https://www.ipcc.ch/ar6-syr/>

NOAA, 2023, Climate Change: Global Sea Level. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>

NASA 2, 2023. GISS Surface Temperature Analysis (v4). GISTEMP Seasonal Cycle since 1880. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/

INEGI; 2023. INEGI, 2023. <https://geoweb2.inegi.org.mx/geografia/espanol/datosgeogra/extterri/frontera.cfm>

EU 2021 Directive. Near Zero-Energy Buildings. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en

Determinación de las zonas de confort adaptativo en tres distintos climas de la república mexicana utilizando la metodología Control Potential Zone (CPZ)

Gerardo René Aranda Barajas¹

1 Profesor investigador del área de arquitectura bioclimática.
Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.
correo: aranda@azc.uam.mx

Resumen

Este trabajo presenta las zonas de confort adaptativo de tres regiones climáticas diferentes de la república mexicana utilizando la metodología *Control Potential Zone (CPZ)* desarrollada por Steven Szokolay y Michael Docherty en la nota 3 “*Climate Analysis*” del *Passive and Low Energy Architecture International* (1999).

La metodología CPZ se basa en la capacidad que tiene el ser humano para adaptarse a las condiciones y variaciones climáticas de las zonas en donde se pretenda diseñar. El proceso metodológico de la CPZ utiliza el índice adaptativo “Temperatura neutra” de Andris Auliciems (1981) y la carta psicrométrica de Givoni (1981) para determinar los requerimientos de confort y las estrategias de diseño bioclimático para conseguirlo.

La metodología fue aplicada en tres regiones climáticas de México: la ciudad de Hermosillo en el estado de Sonora al norte de la república mexicana con un clima muy árido cálido, la ciudad de México al centro del país con un clima templado subhúmedo y la ciudad de Mérida al sureste del país con un clima cálido subhúmedo.

Las tres zonas de aplicación fueron seleccionadas para observar las diferentes zonas de confort adaptativo que se generan de acuerdo a las condiciones y variaciones climáticas existentes durante los periodos más fríos y más calurosos.

Los resultados que se presentan en este documento se obtuvieron siguiendo el proceso metodológico propuesto por los autores y para enriquecer aún más el contenido y los procesos de análisis espacial y bioclimático le fueron incorporados mapas de clima y de ubicación.

Palabras clave: Confort, Zona de confort, arquitectura Bioclimática, clima, estrategias de diseño bioclimático.

Abstract

This paper presents the adaptive comfort zones of three different climatic regions of the Mexican Republic using the Control Potential Zone (CPZ) methodology developed in note 3 “Climate Analysis” of the Passive and Low Energy Architecture International (Szokolay and Docherty, 1999).

The CPZ methodology is based on the capacity of the human being to adapt to the climatic conditions and variations of the areas where it is intended to be designed. The CPZ methodological process uses Andris Auliciems’ (1981) “Temperature Neutral” adaptive index and Givoni’s (1981) psychrometric chart to determine comfort requirements and the bioclimatic design strategies to achieve them.

The methodology was applied in three different climates in Mexico: the city of Hermosillo in the state of Sonora in northern Mexico with a very arid warm climate, the city of Mexico City in central Mexico with a temperate sub-humid climate and the city of Merida in southeastern Mexico with a warm sub-humid climate.

The three application zones were selected to observe the different adaptive comfort zones that are generated according to the climatic conditions and variations during the coldest and hottest periods.

The results presented in this document were obtained following the methodological process proposed by the authors and to further enrich the content and the spatial and bioclimatic analysis processes, climate and location maps were incorporated.

Keywords: Comfort, comfort zone, bioclimatic architecture, climate, bioclimatic design strategies.

Introducción

La arquitectura bioclimática desde sus etapas iniciales plantea como objetivo fundamental el generar espacios arquitectónicos que brinden condiciones de confort para sus ocupantes a través de la utilización de estrategias de diseño bioclimático que respondan a las variaciones climáticas que existen en el lugar donde se proyecta.

Previo a la etapa en donde se determinan las estrategias de diseño, es necesario realizar procesos de búsqueda, acopio y análisis de información climática que resulta necesaria para conocer las influencias que el clima ejerce sobre los ocupantes de la edificación, posteriormente, en función de los efectos que produce el clima se pueden determinar las condiciones de confort deseables en los espacios interiores.

La etapa en donde se determinan las condiciones de confort deseable es una de las más importantes debido a que es aquí en donde gestan las propuestas de estrategias de diseño que darán forma y propósito al objeto arquitectónico bioclimático y sustentable.

Derivado de esta necesidad, este artículo muestra el proceso de construcción de la zona de confort adaptativa para invierno y verano, así como su umbral inferior y superior en tres regiones climáticas diferentes de la república mexicana utilizando la metodología CPZ propuesta por Szokolay y Docherty.

Herramientas de análisis climático y de confort

La zona de confort puede entenderse como aquella zona en donde los elementos del clima se relacionan complejamente para generar en el cuerpo humano sensaciones confortables, esta zona se encuentra al centro entre el umbral de insolación por calor y el punto de congelación por frío.

De acuerdo con Olgay (2010), los efectos de los elementos climáticos pueden agruparse y expresarse en una gráfica única, para ello, dos de las más importantes gráficas de análisis bioclimático que se han desarrollado en la arquitectura bioclimática son el Diagrama Bioclimático de Víctor Olgay (2010) y la Carta Psicrométrica de Baruch Givoni (1981), ambas herramientas bioclimáticas permiten generar procesos sencillos de análisis en donde se relacionan y comparan las condiciones climáticas entre sí contra las zonas en donde se espera que el ocupante expresará sensaciones de confort y bienestar sin que se presenten grandes esfuerzos o tensiones para alcanzar el equilibrio térmico.

Las zonas de confort graficadas en el centro del diagrama de Olgay se encuentran rodeadas por elementos climáticos que representan o indican la naturaleza correctiva necesaria

para recuperar las sensaciones de confort, por su parte, alrededor de las zonas de confort graficadas en la carta de Givoni se encuentran las estrategias de diseño bioclimático que deben ser aplicadas si las condiciones climáticas exteriores son desfavorables para el confort higrotérmico, tanto las correcciones como las estrategias de diseño propuestas en cada una de las herramientas se encuentran condicionadas a la existencia de elementos climáticos y arquitectónicos que puedan apoyar la tarea de conseguir sensaciones confortables.

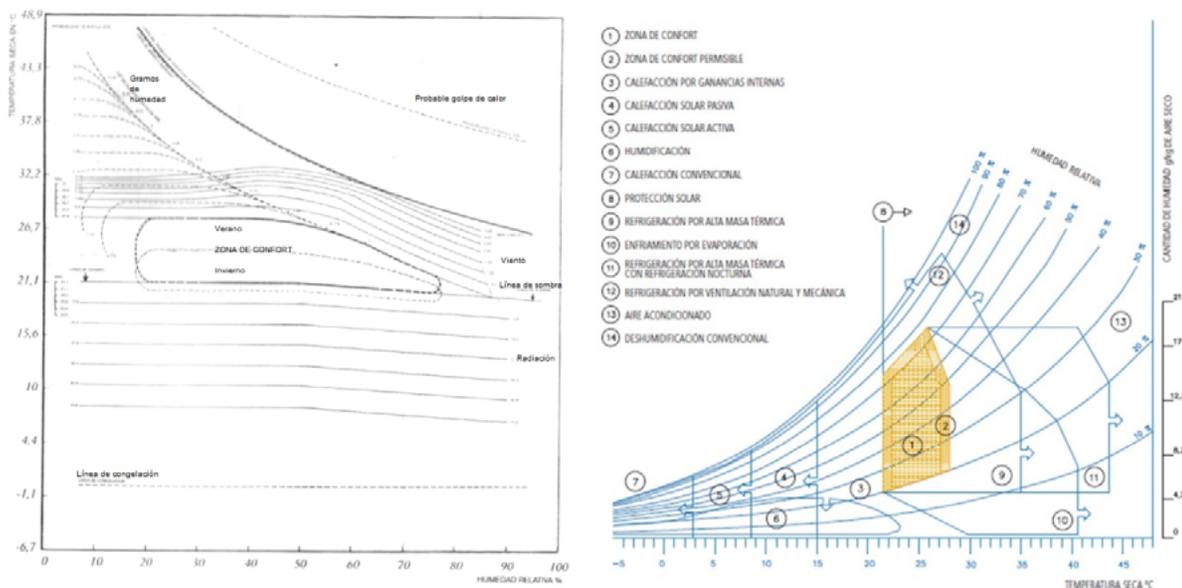


Figura 1. Diagrama Bioclimático de Olgay y Carta Psicrométrica de Givoni.

Fuente: Olgay (2010) y Canarias (s.f.)

Si bien, en los diagramas se establece una zona de confort y una zona de confort permisible, estas zonas no son de uso general ya que su determinación fue realizada considerando condiciones climáticas, aislamientos térmicos y actividades propias de regiones o lugares específicos, por ejemplo, el diagrama bioclimático de Olgay y las zonas de confort establecidas solamente pueden ser aplicadas en habitantes de zonas climáticas moderadas de Estados Unidos que no se encuentren situadas por encima de los 305 metros de altura sobre el nivel del mar (msnm) con un aislamiento térmico normal o clo^1 con un valor de 1^2 con una actividad sedentaria o realizando un trabajo ligero³.

Ante esta situación, se considera necesario establecer una zona de confort adaptando las variables y calculando los valores de acuerdo con las condiciones climáticas de cada uno de los lugares en donde se realice un proyecto arquitectónico con enfoque bioclimático y sustentable.

1 La ropa o clo es uno de los factores más importantes de aislamiento térmico y que por lo tanto impide la disipación del calor metabólico en el ser humano.

2 $1 clo$ es el aislamiento que provee una vestimenta de oficina con ropa interior de algodón.

3 La actividad o el trabajo físico genera calor metabólico muscular (met), $1 met$ es una unidad que mide el calor producido por el cuerpo humano y equivale a $58.2 W/m^2$, considerando que el cuerpo humano en promedio tiene una superficie de $1.8 m^2$, en actividad sedentaria o de reposo el cuerpo humano produce entre $100 W$ y $104.76 W$ (Auliciems y Szokolay, 2007).

Descripción de modelos utilizados

Temperatura neutra y Zona de confort adaptativa

Es común que los proyectistas utilicen herramientas de análisis de clima y confort en donde los valores de las zonas de confort fueron establecidos de acuerdo con datos climáticos representativos para un lugar o región en particular, ante esta situación, si no existe un proceso de cálculo que utilice las condiciones climáticas propias del lugar de emplazamiento como variables, se pueden realizar diagnósticos y propuestas arquitectónicas que no respondan correctamente a las variaciones del clima del lugar, y, consecuentemente, el espacio arquitectónico demandará grandes cantidades de energía, tendrá poca calidad ambiental y contará con un bajo equilibrio térmico interior.

Se ha demostrado que en la determinación de las condiciones de confort existen aspectos, además de los ambientales y personales, que influyen de manera directa en la sensación térmica y en la aceptación del ambiente climático que experimentan los seres humanos (González, E. et al.) estos aspectos pueden definirse como preferencias personales que difieren de individuo a individuo y que se determinan de acuerdo a procesos y adaptaciones que surgen de entornos socioculturales, de adaptación climática y de conducta frente a las condiciones socio-ambientales existentes en cada lugar.

Aún cuando es posible determinar los límites a los que el ser humano puede encontrarse en condiciones de confort térmico, diversos estudios han demostrado que el cuerpo humano tiene una amplia capacidad de adaptación a las condiciones climáticas del lugar en donde se encuentra y, por lo tanto, es recomendable determinar las condiciones a las cuáles se espera que exista un equilibrio térmico dentro de los espacios interiores aplicando índices de confort adaptativo como la temperatura neutra.

En este contexto, Szokolay (2008) menciona que los ajustes que realiza el ser humano para adaptarse a las condiciones climáticas no sólo son fisiológicos, también se presentan procesos psicológicos en donde el individuo se acostumbra y acepta las condiciones dominantes como normales y por lo tanto las percibe adecuadas, este modelo de adaptación térmica se le conoce como Modelo Psicofisiológico y se consigue a partir del índice de confort adaptativo temperatura neutra o neutral que se entiende como la temperatura en la cual existe nulo esfuerzo fisiológico realizado por el cuerpo para adaptarse al ambiente térmico, esta temperatura neutral es la media de temperaturas preferidas según una larga muestra (Morillón, 2004).

Auliciems (1981⁴) desarrolló el modelo de percepción térmica que se basa en el modelo de adaptación térmica, en este modelo se encuentran interactuando complejamente procesos afectivos, cognitivos y:

- Condiciones térmicas ambientales
- Mecanismos de termorregulación del cuerpo
- Sensaciones térmicas
- La satisfacción ante el ambiente térmico
- Las preferencias y experiencias térmicas, y
- Los ajustes tecnológicos y de comportamiento del individuo

Auliciems (2013) menciona que existe una correlación directa entre la adaptación de los seres humanos ante las sensaciones térmicas percibidas y la genética, a partir de su modelo de adaptación y neutralidad térmica Auliciems adapta la ecuación desarrollada inicialmente por Humphreys⁵ quedando de la siguiente manera:

$T_n = 17.6 + 0.31 \cdot T$, y posteriormente

$T_n = 17.8 + 0.31 \cdot T$,

Esta última es la que se utiliza en este artículo para calcular los valores de la temperatura de neutralidad térmica.

Donde:

T_n = Temperatura de neutralidad térmica

T = Temperatura media

Zona de confort a partir de la T_n y ± 2.5 °C de amplitud térmica

Para graficar la zona de confort en la carta psicrométrica utilizando el enfoque adaptativo se debe seguir el siguiente procedimiento:

Se determinan los periodos en donde se presentan las temperaturas más bajas y las más altas de acuerdo con el valor de la temperatura media.

Se calcula la T_n del periodo a analizar utilizando la ecuación de Auliciems.

A partir del cálculo de la temperatura neutra es posible determinar la zona de confort sobre la carta psicrométrica, para ello, se traza la T_n sobre la línea que representa el 50% de humedad relativa, posteriormente la zona de confort puede ser graficada con una amplitud de 5 °C, es decir, -2.5 °C para el límite inferior (ZCi) y +2.5 °C para el límite superior (ZCs).

4 En el año de 1978 Humphreys sienta las bases del modelo de adaptabilidad al relacionar la neutralidad térmica con el clima prevaleciente de un lugar en particular.

5 Ecuación de neutralidad térmica de Humphreys $T_n = 11.9 + 0.534 \cdot T_{oav}$

Determinación de las zonas de confort adaptativo en tres distintos climas de la república mexicana utilizando la metodología Control Potential Zone (CPZ)

El umbral de la zona de confort determinado por el valor de Z_{Ci} y el Z_{Cs} se trazan sobre la misma línea de 50% de humedad relativa, la pendiente de inclinación (dT) de la zona de confort son trazados sobre las líneas de la Temperatura efectiva (TE) de la carta psicrométrica.

El límite superior e inferior para la humedad relativa se establecen de acuerdo con la recomendación de Auliciems y Szokolay (2007), es decir, 12 g/kg para el límite superior y 4 g/kg para el límite inferior.

El método para determinar la zona de confort para invierno y verano o para cualquier periodo que se pretenda analizar debe seguir el mismo procedimiento.

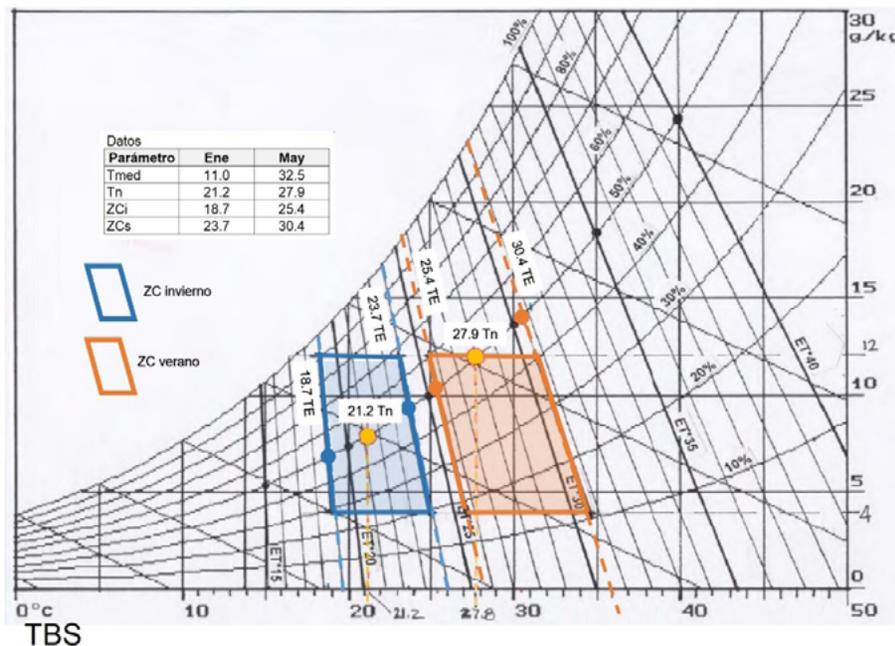


Figura 2. Zona de confort para invierno y verano de acuerdo con la T_n y la T_E .
Fuente: Auliciems y Szokolay (2007).

Metodología Control Potential Zone (CPZ) o de la Zona de Control Potencial

La metodología CPZ permite determinar el rango de condiciones exteriores bajo las cuales las estrategias de control pueden asegurar confort térmico interior, esta tarea se realiza definiendo la zona de temperatura y humedad exterior en donde las estrategias de control bioclimático tienen el potencial de crear condiciones de confort interior aceptables.

El proceso metodológico CPZ utiliza el enfoque adaptativo para generar las zonas de confort, esta cualidad permite que las zonas de confort generadas a partir de este proceso se adapten a las particularidades y variaciones climáticas existentes.

De acuerdo con Szokolay-Docherty (1999) y Víctor Fuentes (2014) para determinar la zona de confort, así como los límites inferior, superior y la pendiente o intersección (dT), se debe seguir el siguiente procedimiento:

- 1.- Se selecciona la temperatura media del periodo a analizar y se determina la T_n utilizando la ecuación de Andris Auliciems.
- 2.- Se traza la T_n en la curva correspondiente al 50 % de Humedad Relativa (HR) de la carta psicrométrica.
- 3.- Sobre la misma curva correspondiente al 50% de la HR se marcan el límite inferior (ZCi) y superior (ZCs) de la ZC con una amplitud térmica de 4 °C: -2 °C para el límite inferior y +2 °C para el límite superior.
- 4.- Se determina el valor de la pendiente de la intersección (dT) para el límite inferior y superior de la zona de confort de acuerdo a la siguiente ecuación.

Donde:

$dT^6 =$ Intersección del límite inferior (ZCi) o superior (ZCs) de la ZC

$T = T_n - 2^\circ\text{C}$ (ZCi) ; $T_n + 2^\circ\text{C}$ (ZCs)

HA= Humedad Absoluta

- 5.- Se traza la parte superior e inferior (líneas horizontales) de la ZC en las líneas correspondientes a los valores de 12 g/kg y 4 g/kg.

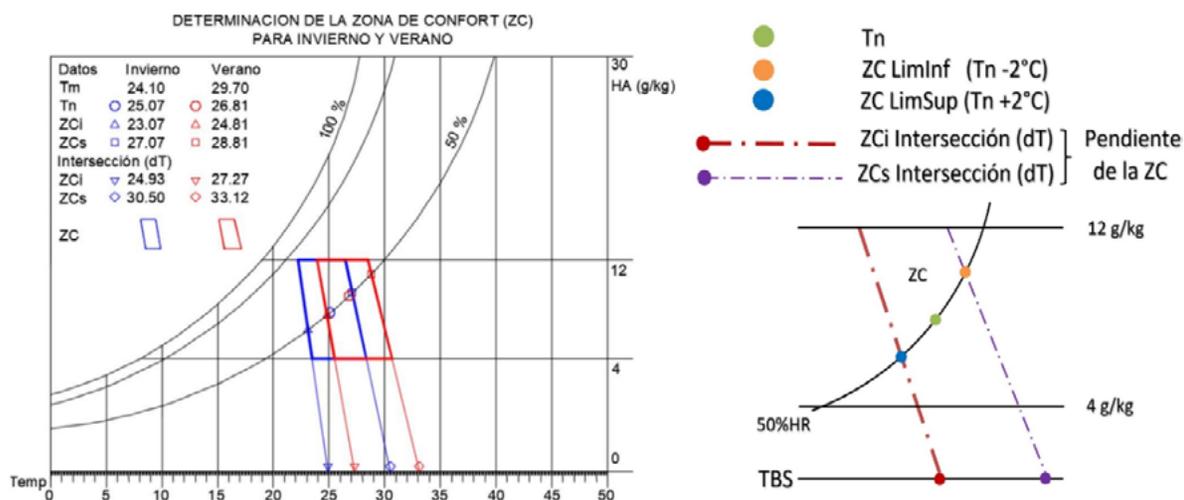


Figura 3. Ejemplo para la determinación de la ZC y la dT.

Fuente: Elaboración propia con datos de Szokolay & Docherty (1999) y Víctor Fuentes (2014).

Posterior a la delimitación del ZCi y ZCs se traza el valor de la temperatura mínima normal ($T_{mín}$), máxima normal ($T_{máx}$) y temperatura media (T_{med}) para determinar los requerimientos bioclimáticos de calentamiento o enfriamiento de acuerdo con el periodo de análisis.

6 Temperatura en la base de la carta psicrométrica sobre la línea de la TBS que corresponde a 0 g/Kg de humedad absoluta (Fuentes, 2014).

Para el caso del periodo frío, si la $T_{mín}$ y la T_{med} se encuentran por debajo del Z_{Ci} entonces existe necesidad de aplicar alguna estrategia de control para aumentar las temperaturas, caso contrario no existe necesidad de control.

Para el periodo caluroso, si la $T_{máx}$ y la T_{med} se encuentran por encima del Z_{Cs} existe necesidad de reducir las temperaturas, si es que las temperaturas se encuentran por debajo no existe necesidad de control.

Casos de aplicación

El objetivo principal de este artículo es mostrar la aplicación de la metodología CPZ para determinar las zonas de confort adaptativo para invierno y verano en tres climas distintos de la república mexicana:

- Alcaldía Azcapotzalco en la Ciudad de México
- Municipio de Hermosillo en el estado de Sonora
- Municipio de Mérida en el estado de Yucatán

Azcapotzalco: la alcaldía se encuentra al noroeste de la Ciudad de México en la parte central del país; colinda al norte con el municipio de Tlalnepantla de Baz, al noroeste con Naucalpan de Juárez, al sur con la alcaldía Miguel Hidalgo, al sureste con la alcaldía Cuauhtémoc y al este con la alcaldía Gustavo A. Madero. En esta zona predomina el clima templado subhúmedo.

Mérida: el municipio de Mérida es la capital del estado de Yucatán, se encuentra al noroeste del estado, en el sureste de México; colinda con los municipios de progreso, Ucú, Umán, Abalá, Timucuy, Kanasín, Tixpehual, Tixkokob, Yaxkukul, Conkal y Chicxulub. En esta zona predomina el clima cálido subhúmedo y una pequeña franja climática semiárida cálida al norte.

Hermosillo: el municipio de Hermosillo es la capital del estado de Sonora, se encuentra al oeste del estado, en el noroeste de México; colinda al oeste con el Golfo de California, al norte y noreste con Carbó y San Miguel de Horcasitas, al este con Ures, Mazatán y al sureste con La Colorada y Guaymas. En esta zona predomina el clima muy árido semicálido en la oeste, noroeste y norte, y en la parte este, sureste y sur el clima es muy árido cálido.

La selección de los casos de aplicación obedece a la zona climática a la que pertenece cada municipio, debido a la gran extensión territorial de México y a las grandes diferencias en el relieve y la altitud existe una gran variedad de climas en el país, en la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas particulares (INEGI, 2018) el país se encuentra clasificado en tres grandes regiones climáticas, al norte la región cálida extrema, al centro la región templada y al sur la región tropical, en el mapa de la parte superior se puede observar que cada uno de los municipios analizados se encuentra en una región climática diferente.

Alcaldía o Municipio	Entidad federativa	Superficie (km ²)	Altitud (msnm)		Tipo clima	Descripción temperatura
			Mínima	Máxima		
Azcapotzalco	Ciudad de México	33.5	2238	2260	C(w1)	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes mas frío entre -3 °C y 18 °C y temperatura del mes mas caliente bajo 22 °C.
Mérida	Yucatán	858.41	9	10	Awo	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes mas frío mayor de 18 °C.
					Bs1(h)w	Semiárido cálido, temperatura media anual mayor de 22 °C, temperatura del mes mas frío mayor de 18 °C.
Hermosillo	Sonora	14,880.20	200	282	BWh(x')	Muy árido, semicálido, temperatura media anual entre 18 °C y 22 °C, temperatura del mes mas frío menor de 18 °C, temperatura del mes mas caliente mayor de 22 °C.
					BW(h)(x')	Muy árido, cálido, temperatura media anual mayor de 22 °C, temperatura del mes mas frío mayor de 18 °C.

Figura 4. Datos generales de los casos de aplicación.

Fuente: Mapas de clima y temperaturas horarias en los casos de aplicación.



Figura 5. Datos generales de los casos de aplicación.

Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO y Andrew Marsh.

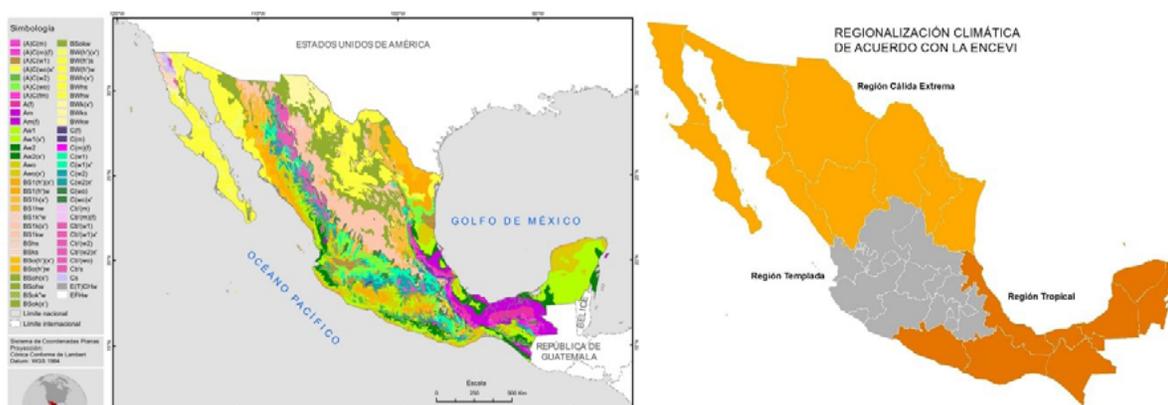


Figura 6. Mapas clima Köppen-García y ENCEVI.

Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO y ENCEVI.

Determinación de las zonas de confort adaptativo en tres distintos climas de la república mexicana utilizando la metodología Control Potential Zone (CPZ)

Determinación de la ZC de acuerdo a la metodología CPZ

De acuerdo con el proceso metodológico del modelo CPZ, la primera etapa es determinar el periodo frío y el periodo caluroso de acuerdo con la temperatura media registrada durante todos los meses del año:

En la Ciudad de México el periodo frío corresponde al mes de enero, para los municipios de Mérida y Hermosillo este periodo se presenta durante el mes de diciembre.

El periodo caluroso para la Ciudad de México y el municipio de Mérida corresponde al mes de mayo, para el municipio de Hermosillo este periodo se presenta en el mes de julio.

ID	Nombre	Entidad federativa	Parámetros	Unidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
9025	Hacienda la Patera	Ciudad de México	Tmed	°C	13.0	14.2	15.7	17.2	18.3	17.3	16.5	16.6	16.3	15.5	14.1	13.5	15.7
31044	Mérida (OBS)	Yucatán	Tmed	°C	24.3	25.1	25.8	27.0	28.2	27.7	27.5	27.3	27.2	26.4	25.3	23.8	26.3
26040	Hermosillo (OBS)	Sonora	Tmed	°C	17.0	18.5	21.6	24.6	28.3	33.1	33.9	32.9	31.5	27.0	21.1	16.7	25.5

Localidad	Periodo frío	Periodo caluroso
CDMX	Enero	Mayo
Hermosillo	Diciembre	Mayo
Mérida	Diciembre	Julio

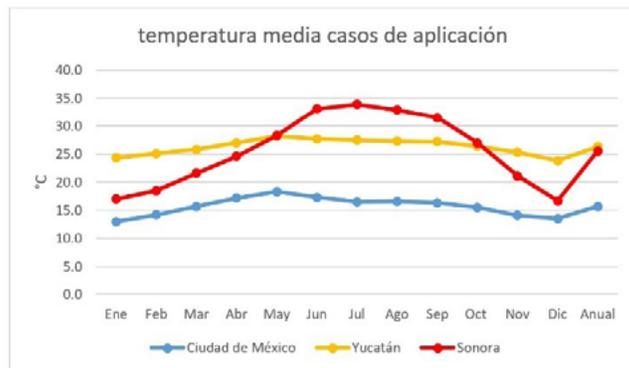


Figura 7. Periodo frío y cálido en las tres zonas de aplicación.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN.

Se calcula la Tn utilizando la ecuación de Andris Auliciems para la temperatura media del mes más frío y más caluroso de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$T_n = 17.8 + 0.31 * T$$

Se determina el valor del ZCi y del ZCs con una amplitud térmica de 4 °C, el valor del ZCi corresponde a la Tn-2 °C, el valor del ZCs corresponde a la Tn+2 °C.

ID	Nombre	Entidad federativa	Periodo Frío				Periodo Caluroso			
			Tmed	Tn	ZCi	ZCs	Tmed	Tn	ZCi	ZCs
9025	Hacienda la Patera	Ciudad de México	13.0	21.8	19.8	23.8	18.3	23.5	21.5	25.5
31044	Mérida (OBS)	Yucatán	23.8	25.2	23.2	27.2	28.2	26.5	24.5	28.5
26040	Hermosillo (OBS)	Sonora	16.7	23.0	21.0	25.0	33.9	28.3	26.3	28.3

Figura 8. Cálculo de la Tn, el ZCi y el ZCs para el mes más frío y más caluroso de los casos de aplicación.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN utilizando la ecuación de temperatura neutra de Auliciems.

Se trazan la Tn, el ZCi y el ZCs sobre la curva correspondiente al 50 % de la HR de la carta psicrométrica para los periodos de estudio.

ID	Nombre	Entidad federativa	Periodo Frío				Periodo Caluroso			
			Tmed	Tn	ZCi	ZCs	Tmed	Tn	ZCi	ZCs
9025	Hacienda la Patera	Ciudad de México	13.0	21.8	19.8	23.8	18.3	23.5	21.5	25.5
31044	Mérida (OBS)	Yucatán	23.8	25.2	23.2	27.2	28.2	26.5	24.5	28.5
26040	Hermosillo (OBS)	Sonora	16.7	23.0	21.0	25.0	33.9	28.3	26.3	28.3

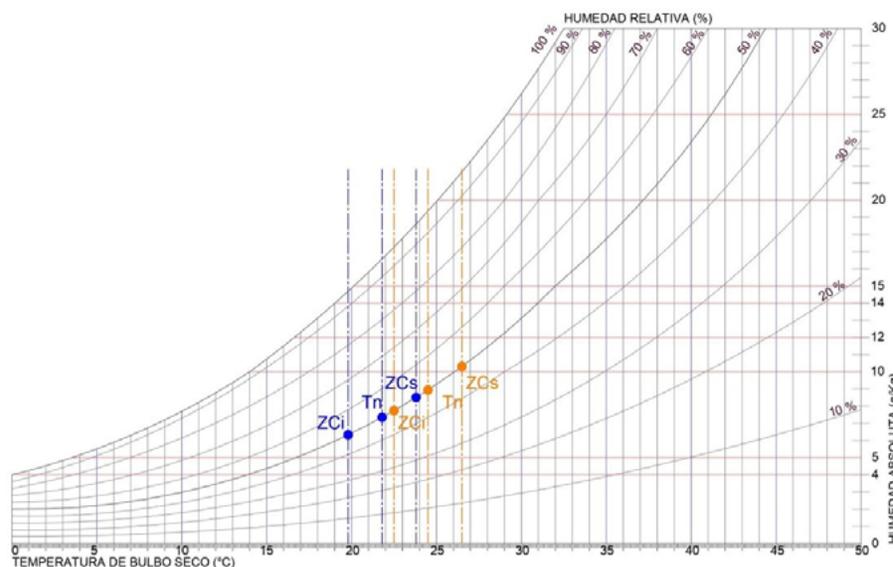


Figura 9. Posicionamiento de la Tn, el ZCi y el ZCs del mes más frío y más caluroso sobre la carta psicrométrica.

Fuente: Elaboración propia.

Se determina el valor de la pendiente de la intersección (dT) para el límite inferior y superior de la zona de confort de acuerdo a la siguiente ecuación:

Donde:

dT= Intersección del límite inferior (ZCi) o superior (ZCs) de la ZC

T= Tn-2°C (ZCi) ; Tn+2°C (ZCs)

HA= Humedad Absoluta

Invierno		Verano	
Tn	21.8	Tn	23.5
ZCi	19.8	ZCi	21.5
ZCs	23.8	ZCs	25.5
dT ZCi	21.1	dT ZCi	23.3
dT ZCs	26.6	dT ZCs	29.0

Figura 10. Cálculo de la intersección o pendiente del ZCi y el ZCs para el mes más frío y más caluroso.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN utilizando la hoja de cálculo de Víctor Fuentes (2012).

Determinación de las zonas de confort adaptativo en tres distintos climas de la república mexicana utilizando la metodología Control Potential Zone (CPZ)

Se traza el límite superior e inferior (líneas horizontales) de la ZC para la humedad relativa, los límites se trazan sobre las líneas correspondientes a los valores de 12 g/kg y 4 g/kg, estos valores son los recomendados por Auliciems y Szokolay en la nota 3 del PLEA.

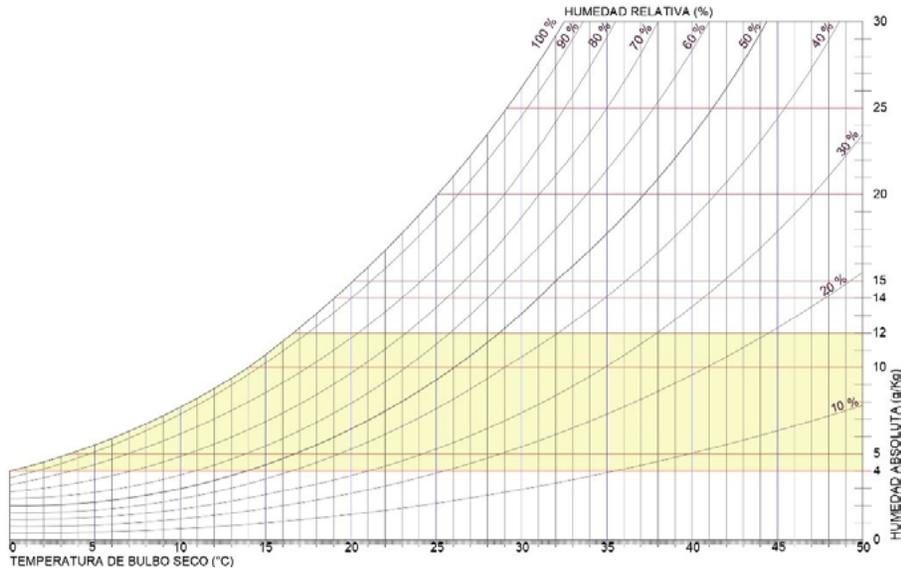


Figura 11. Límite superior e inferior de la humedad en la Zona de confort.

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con Auliciems y Szokolay (2007).

Se traza las zonas de confort para invierno y verano de acuerdo con las temperaturas de confort adaptativo que fueron calculadas.

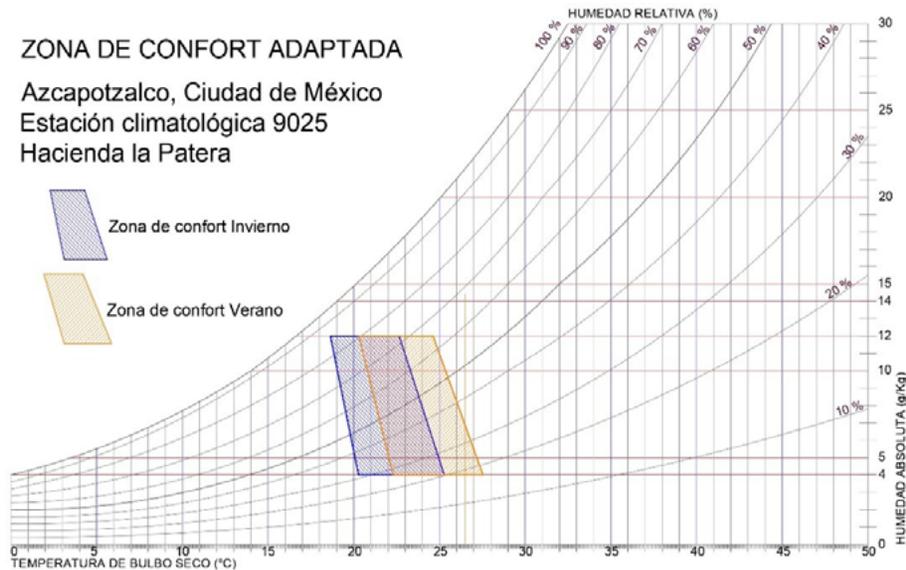


Figura 12. Zona de confort adaptada de acuerdo con el modelo CPZ.

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con Szokolay y Docherty (1999).

Finalmente se traza el valor de la $T_{mín}$, $T_{máx}$ y T_{med} para comparar las condiciones térmicas existentes con las condiciones de confort deseables y así poder determinar los requerimientos bioclimáticos de calentamiento o enfriamiento de acuerdo con el periodo de análisis.

Para el caso del periodo frío, si la $T_{mín}$ y la T_{med} se encuentran por debajo del Z_{Ci} existe necesidad de aplicar alguna estrategia de control para aumentar las temperaturas, si las temperaturas se encuentran por encima del Z_{Ci} o dentro de la zona de confort no existe necesidad de estrategias de diseño bioclimático.

Para el periodo caluroso, si la $T_{máx}$ y la T_{med} se encuentran por encima del Z_{Cs} existe necesidad de reducir las temperaturas, si es que las temperaturas se encuentran por debajo del Z_{Cs} o dentro de la zona de confort no existe necesidad de estrategias de diseño bioclimático.

Resultados

Utilizando la metodología CPZ se delimita la zona de confort deseable sobre la carta psicrométrica, con la zona delineada es posible conseguir condiciones térmicas interiores aceptables a partir del uso de estrategias de diseño bioclimático que respondan en armonía a las condiciones climáticas exteriores y a los constantes flujos de energía que se producen entre el medio edificado y el medio natural circundante.

La metodología CPZ utiliza el índice de confort adaptativo para calcular la temperatura neutra y los límites superior e inferior de la zona de confort, la delimitación de la zona se basa en la temperatura media del lugar seleccionado, esta condición permite que las propuestas de diseño se adapten y respondan de manera correcta a las condiciones higrotérmicas exteriores.

A continuación, se presenta la zona de confort de invierno y verano para los tres casos seleccionados ubicados en regiones climáticas diferentes de México.

Alcaldía Azcapotzalco, Ciudad de México

En un clima templado subhúmedo como el que existe en la Ciudad de México se observa que la zona de confort para invierno y verano se sobreposicionan debido a la baja oscilación en las condiciones térmicas.

De acuerdo con los valores de la temperatura media del mes más frío y del mes más caluroso existe una oscilación de 5.3 °C lo que se considera como una oscilación Isotermal (García, 1900), es decir, existe poca diferencia entre la temperatura media registrada durante el periodo frío y el periodo caluroso.

Las zonas de confort del clima templado subhúmedo el valor del Z_{Ci} del periodo caluroso se encuentra dentro de la zona del mes más frío, lo mismo sucede con el valor del Z_{Cs} del mes más frío que se encuentra dentro de la zona del periodo caluroso, estos valores se encuentran muy cerca de la temperatura neutra de cada uno de los dos periodos.

Determinación de las zonas de confort adaptativo en tres distintos climas de la república mexicana utilizando la metodología Control Potential Zone (CPZ)

La sobreposición de las dos zonas se extiende por aproximadamente 3 °C y se detienen a unos 0.5 °C de la temperatura neutra de cada uno de los periodos utilizados como casos de estudio.

ID	Nombre	Entidad federativa	Periodo Frío				Periodo Caluroso			
			Tmed	Tn	ZCi	ZCs	Tmed	Tn	ZCi	ZCs
9025	Hacienda la Patera	Ciudad de México	13.0	21.8	19.8	23.8	18.3	23.5	21.5	25.5
31044	Mérida (OBS)	Yucatán	23.8	25.2	23.2	27.2	28.2	26.5	24.5	28.5
26040	Hermosillo (OBS)	Sonora	16.7	23.0	21.0	25.0	33.9	28.3	26.3	28.3

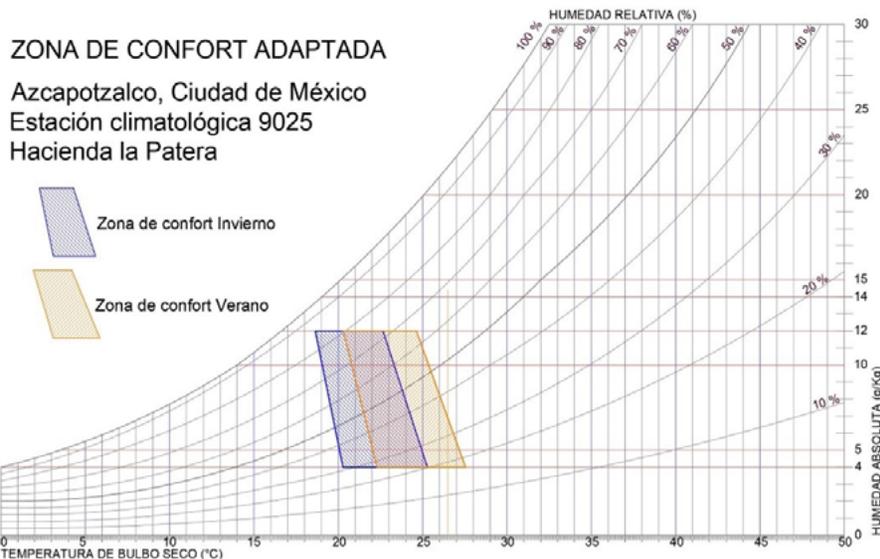


Figura 13. Zona de confort para la alcaldía Azcapotzalco de acuerdo con el modelo CPZ.

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con el método CPZ.

Mérida, Yucatán

En Mérida existe un clima cálido subhúmedo, debido a las condiciones climáticas existentes se observa que la zona de confort para invierno y verano se sobreponen debido a la baja oscilación en las condiciones térmicas.

De acuerdo con los valores de la temperatura media del mes más frío y del mes más caluroso existe una oscilación de 4.4 °C lo que se considera como una oscilación Isotermal, esta diferencia que se presenta en Mérida es aún más baja que la que se presenta en el caso de la Ciudad de México para los mismos periodos.

En las zonas de confort del clima cálido subhúmedo el valor del ZCi del periodo caluroso se encuentra dentro de la zona del mes más frío, lo mismo sucede con el valor del ZCs del mes más frío que se encuentra dentro de la zona del periodo caluroso, estos valores se encuentran muy cerca de la temperatura neutra de cada uno de los dos periodos.

La sobreposición de las dos zonas se extiende por aproximadamente 3.5 °C y se detienen a unos 0.7 °C de la temperatura neutra de cada uno de los periodos utilizados como casos de estudio.

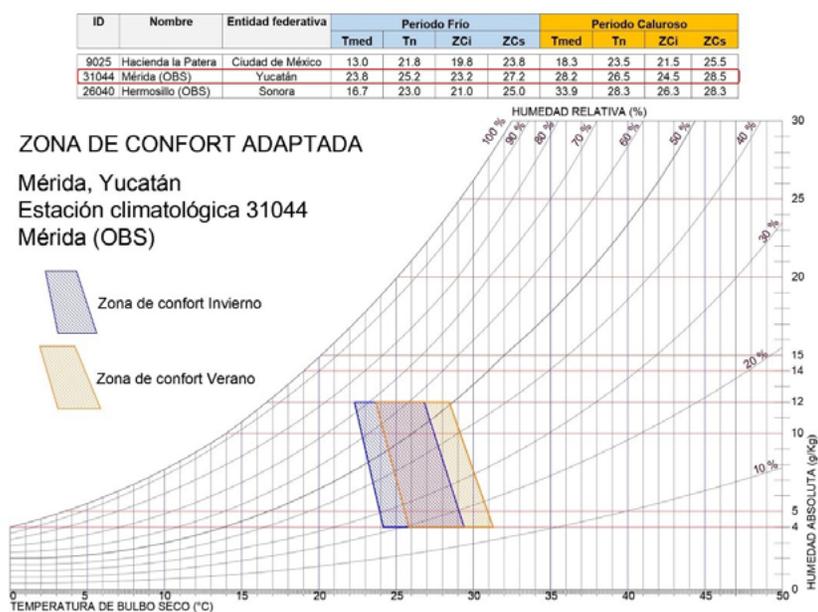


Figura 14. Zona de confort para la Ciudad de Mérida de acuerdo con el modelo CPZ.

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con el método CPZ

Hermosillo, Sonora

En el caso de la ciudad de Hermosillo en donde existe un clima cálido seco, se observa que la zona de confort para invierno y verano nunca se superponen y, por el contrario, se desarrollan de manera independiente debido a la alta oscilación térmica.

De acuerdo con los valores de la temperatura media del mes más frío y del mes más caluroso existe una oscilación de 17.2 °C lo que se considera como una oscilación muy extrema, esta diferencia que se presenta en Hermosillo es tres veces más grande que la observada en los otros dos casos de aplicación.

Esta situación invariablemente modifica la zona de confort y los procesos psicofisiológicos que deben ser utilizados por los habitantes de estas regiones para conseguir condiciones de satisfacción térmica.

El valor de ZCi de las zonas de confort para el periodo de invierno de la Ciudad de México y de la ciudad de Hermosillo se encuentra cerca de los 20 °C de temperatura efectiva, para el caso de la Ciudad de Mérida este valor se incrementa cerca a los 25 °C. Para el caso del valor de ZCs en los dos primeros casos se encuentra cercano a los 25 °C, este mismo valor en la ciudad de Mérida se eleva cerca de los 30 °C de temperatura efectiva.

Para el periodo caluroso, no existen coincidencias sensibles en los valores de ZCi y ZCs de las zonas de confort, en la Ciudad de México el valor de ZCi se encuentra por encima de 22 °C de temperatura efectiva, para la ciudad de Mérida este valor se encuentra cerca de los 26 °C y en la Ciudad de Hermosillo el valor es superior a los 28 °C. Para el caso del valor de ZCs en la Ciudad de México este valor es superior a los 27 °C de temperatura efectiva, para la

Determinación de las zonas de confort adaptativo en tres distintos climas de la república mexicana utilizando la metodología Control Potential Zone (CPZ)

ID	Nombre	Entidad federativa	Periodo Frio				Periodo Caluroso			
			Tmed	Tn	ZCI	ZCs	Tmed	Tn	ZCI	ZCs
9025	Hacienda la Patera	Ciudad de México	13.0	21.8	19.8	23.8	18.3	23.5	21.5	25.5
31044	Mérida (OBS)	Yucatán	23.8	25.2	23.2	27.2	28.2	26.5	24.5	28.5
26040	Hermosillo (OBS)	Sonora	16.7	23.0	21.0	25.0	33.9	28.3	26.3	28.3

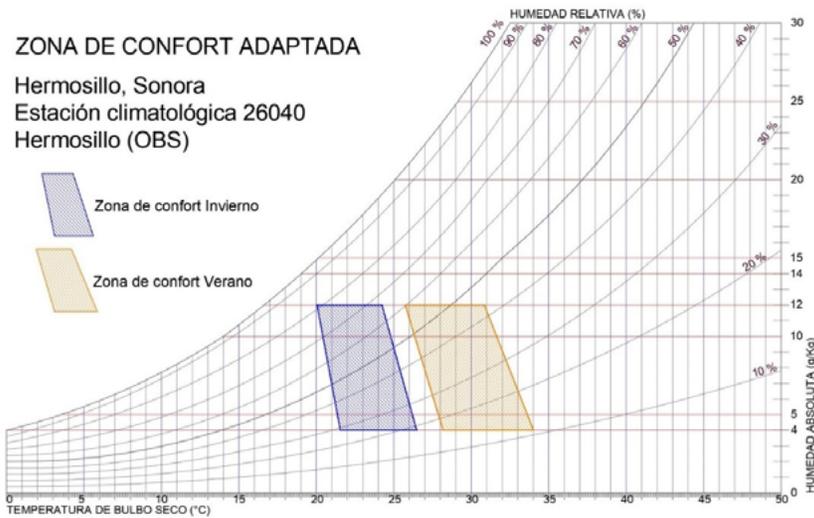


Figura 15. Zona de confort para la ciudad de Hermosillo de acuerdo con el modelo CPZ.

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con el método CPZ.

ciudad de Mérida este valor es superior a los 31 °C y para la ciudad de Hermosillo este valor es de aproximadamente 34 °C.

Conclusión

Generando las zonas de confort para invierno y verano utilizando el proceso metodológico CPZ es posible observar con claridad que existen diferencias en las condiciones térmicas deseables que deben ser conseguidas en los espacios interiores de la arquitectura para cada uno de los casos de aplicación.

Estas diferencias se deben fundamentalmente a las condiciones y variaciones climáticas preexistentes en cada uno de los climas seleccionados, y, por consiguiente, los procesos de adaptación a los que son sometidos los habitantes de cada región para conseguir condiciones térmicamente equilibradas en la arquitectura presentan diferencias notables.

Las zonas de confort adaptativo indican las directrices y estrategias de diseño que deben seguir los proyectistas para generar espacios arquitectónicos confortables, que se encuentren en armonía con las condiciones ambientales exteriores y con una gran eficiencia en el uso de las energías para conseguir condiciones de bienestar térmico.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos se concluye que es recomendable utilizar índices de confort adaptativo para determinar las zonas de confort y los requerimientos bioclimáticos ajustados a las condiciones y variaciones climáticas existentes, por consiguiente, será posible generar espacios arquitectónicos confortables a través de la incorporación de sistemas de control ambiental pasivo y de estrategias de diseño bioclimático adecuadas a cada lugar de estudio.

Referencias

Auliciems, A. & Szokolay, S. (2007) note 3 *Thermal Comfort*. (2ª ed.) PLEA. Australia. University of Queensland.

Auliciems, A. (1981). *Towards a Psycho-Physiological Model of Thermal Perception*. *Int. J. Biometeor.* 1981, vol. 25, number 2, pp. 109-122.

Auliciems, A. (2013). *Thermal sensation and cell adaptability*. *Int J Biometeorol* 58: 325-335.

De Luxan, M., Reymundo, A., Marzol, M. (2012). Manual de diseño bioclimático para Canarias Parte II. Instituto Tecnológico de canarias. España

Docherty, M. & Szokolay, S. (1999) note 5 *Climate Analysis PLEA*. Australia. University of Queensland.

Fuentes, V. (2014). Mapas bioclimáticos de la República Mexicana. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México.

García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (5ª ed.). México: Instituto de Geografía-UNAM.

Givoni, B. (1981). *Man, Climate and Architecture* (reimpresión 2ª ed.). Gran Bretaña, Gilliard Printers.

González, E. et al (2009). Sobre el confort térmico: temperaturas neutrales en el trópico húmedo. Palapa, vol. IV, núm. 1, enero-junio, 2009, pp. 33-38. México.

Morillón, D. (2004). Atlas del bioclima de México. Instituto de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Olgay, V. (2010). *Arquitectura y Clima*. (1ª ed. 6ª tirada). Barcelona. Gustavo Gilli.

Szokolay, S. (2008). *Introduction to Architectural Science The Basic of Sustainable Design* (2da ed.). Estados Unidos: Uniprint.

Páginas de internet consultadas

Andrew Marsh (2017). *Weather Data*. en <https://drajmarsh.bitbucket.io/weather-data.html>

Climate Consultant 6.0 (2019). California Energy Commission. Puede consultarse en <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/climate-consultant/request-climate-consultant.php>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], (1998). Climas Catalogo de metadatos geográficos. en http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html_xsl&_indent=no.

Instituto de Geografía e Informática [INEGI] (s.f.) Conjunto de datos vectoriales. Unidades climáticas. en <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>

Servicio Meteorológico Nacional [SMN] (s.f.) Normales Climatológicas por Estado. en <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>

Análisis crítico de la envolvente del edificio de referencia en la Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001

Víctor A. Fuentes Freixanet¹, Aníbal Figueroa Castrejón¹

¹ Profesor investigador del área de arquitectura bioclimática.
Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

Resumen

Este documento analiza la Norma Oficial Mexicana “NOM-008-ENER-2001 (SENER, 2001), EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICACIONES, ENVOLVENTE DE EDIFICIOS NO RESIDENCIALES”, publicada en el Diario Oficial de la Federación en miércoles 25 de abril del 2001.

“Esta norma limita la ganancia de calor de las edificaciones a través de su envolvente con objetivo de racionalizar el uso de energía en los sistemas de enfriamiento[...] optimiza el diseño desde el punto de vista del comportamiento térmico de la envolvente, obteniéndose como beneficios, entre otros, el ahorro de energía por la disminución de la capacidad de los equipos de enfriamiento y un mejor confort de los ocupantes” (DOF, 2001).

Como se observa en su objetivo, la norma está diseñada principalmente para reducir cargas de aire acondicionado y no en sistemas pasivos bioclimáticos.

Palabras clave: NOM-008-ENER-2001, eficiencia energética, arquitectura bioclimática

Abstract

This document analyzes the Official Mexican Standard “NOM-008-ENER-2001, ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS, ENVELOPE OF NON-RESIDENTIAL BUILDINGS”, published in the Official Gazette of the Federation on Wednesday, April 25th, 2001.

“This standard limits the heat gain of buildings through their envelope in order to rationalize the use of energy in cooling systems [...] It optimizes the design from the point of view of the thermal behavior of the building envelope, and others benefits, such as, energy savings due to the decrease in the capacity of the cooling equipment and better comfort of the occupants” (DOF, 2001).

As seen in its objective, the standard is designed primarily to reduce air conditioning loads and not on bioclimatic passive systems.

Keywords: NOM-008-ENER-2001, energy efficiency, bioclimatic architecture.

Definición del problema

Los autores consideran que la NOM-008 no responde adecuadamente a las diferentes condiciones climáticas de México debido a que el edificio de referencia no toma en cuenta variables críticas como la orientación real del edificio de proyecto (o al menos orientaciones intermedias, ya que sólo considera los cuatro puntos cardinales). Por otro lado, únicamente considera geometrías ortogonales. Si el edificio del proyecto tiene superficies curvas en muros o cubiertas no es posible evaluarlas. El edificio de referencia no tiene sombreado, por lo que, al compararlo con un edificio proyectado con dispositivos de control solar, tiene muchas probabilidades de pasar la norma. La NOM-008 únicamente considera el valor global de transferencia de calor (K) pero no otras variables dinámicas del comportamiento térmico del muro, por lo que la inercia térmica, amortiguación y retardo no se toman en cuenta, favoreciendo de esta forma al aislamiento térmico y dejando de fuera el efecto de masividad de los materiales. Además, la norma no considera la ventilación natural, que es una estrategia clave de climatización pasiva.

Análisis del Método de Cálculo: consideraciones del edificio de referencia

La norma emplea un método de cálculo estático, que se basa en el concepto de temperatura equivalente. Que es “una temperatura indicativa, de la temperatura exterior promedio, durante el periodo de uso de sistemas de enfriamiento”. Estos valores se enlistan en tablas por ciudad que incluyen la superficie inferior, techo, muros masivos, muros ligeros, tragaluces, domos y ventanas, en donde también se definen coeficientes de transferencia de calor para superficies opacas como techos y muros y el factor de ganancia solar promedio para superficies acristaladas. Todos estos valores se asocian a los cuatro puntos cardinales. El edificio de referencia emplea valores fijos de conductividad en función de la ciudad en donde se ubica el proyecto.

El método consiste en calcular los dos edificios, el proyectado contra el de referencia, comparando los resultados. Si el presupuesto energético del edificio proyectado es menor que el del edificio de referencia, se cumple con la norma.

El método de cálculo se hace a través del “Formato para informar del Cálculo del Presupuesto Energético”, que se compone de las siguientes secciones:

1. Datos Generales
 - 1.1 Propietario
 - 1.2 Ubicación de la Obra
 - 1.3 Unidad de Verificación
2. Valores para el cálculo de la Ganancia de Calor a través de la Envolvente
 - 2.1 Ubicación
 - 2.2 Temperatura Equivalente Promedio
 - 2.3 Coeficiente de Transferencia de Calor “K” del edificio de referencia

- 2.4 Factor de Ganancia de Calor Solar “FG”
- 2.5 Barrera de Vapor
- 2.6 Factor de Corrección de Sombreado Exterior “SE”
- 3. Cálculo del Coeficiente Global de Transferencia de Calor de las Porciones de la Envolvente
 - 3.1 Descripción de la Porción
- 4. Calculo Comparativo de la Ganancia de Calor
 - 4.1 Datos Generales
 - 4.2 Edificio de Referencia
 - 4.2.1 Ganancia por Conducción (partes opacas y transparentes)
 - 4.2.2 Ganancia por Radiación (partes transparentes)
 - 4.3 Edificio Proyectado
 - 4.3.1 Ganancia por Conducción (partes opacas y transparentes)
 - 4.3.2 Ganancia por Radiación (partes transparentes)
- 5. Resumen de Cálculo
 - 5.1 Presupuesto Energético
 - 5.2 Cumplimiento

Orientaciones

La norma sólo considera las orientaciones de los puntos cardinales.

“Norte: cuyo plano normal está orientado desde 45° a oeste y menos de 45° al este del norte verdadero. Este: cuyo plano normal está orientado desde 45° al norte y menos de 45° al sur del este verdadero. Sur: cuyo plano normal está orientado desde 45° al este y menos de 45° al oeste del sur verdadero. Oeste: cuyo plano normal está orientado desde 45° al sur y menos de 45° al norte del oeste verdadero.” (SENER, 2021).

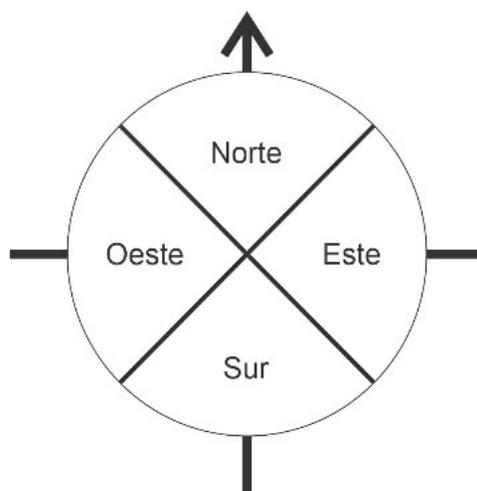


Figura 1. Rangos de orientación considerado por la NOM-008-ENER-2001

Fuente: elaboración propia.

Es decir que todos los puntos inter cardinales no están considerados. Por ejemplo, si una de las fachadas del proyecto tiene una orientación noreste (NE) con un acimut de 136° , se debe considerar como orientación norte (N). No obstante, la radiación que reciben estas dos orientaciones es muy distinta. La norma lo maneja como una comparación del edificio de referencia contra el proyectado bajo las mismas condiciones, sin embargo, los ángulos de incidencia solar reales sobre las fachadas son totalmente distintos, y por lo tanto las ganancias solares por conducción y radiación también lo son.

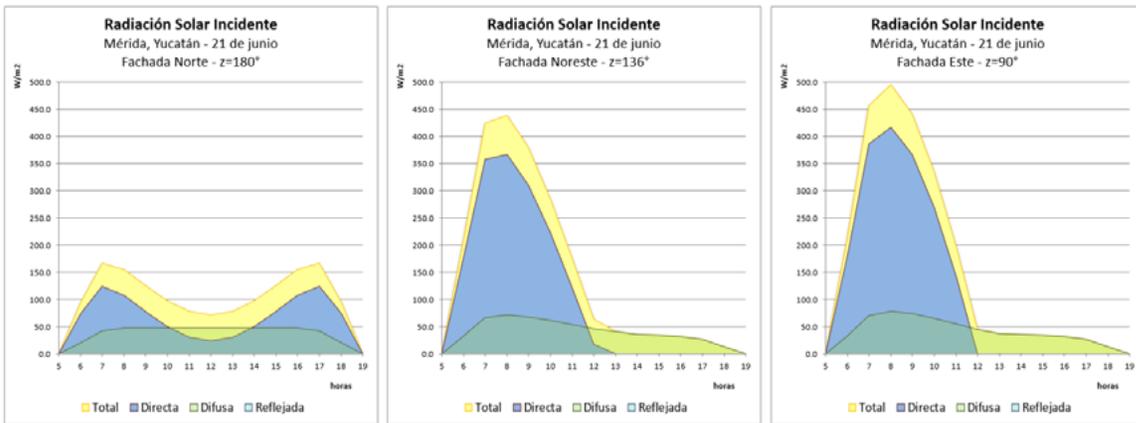


Figura 2. Radiación solar incidente teórica para la ciudad de Mérida, Yucatán el 21 de junio para las fachadas Norte ($z=180^\circ$); Noreste ($Z= 136^\circ$) y Este ($z= 90^\circ$).

Fuente: elaboración propia.

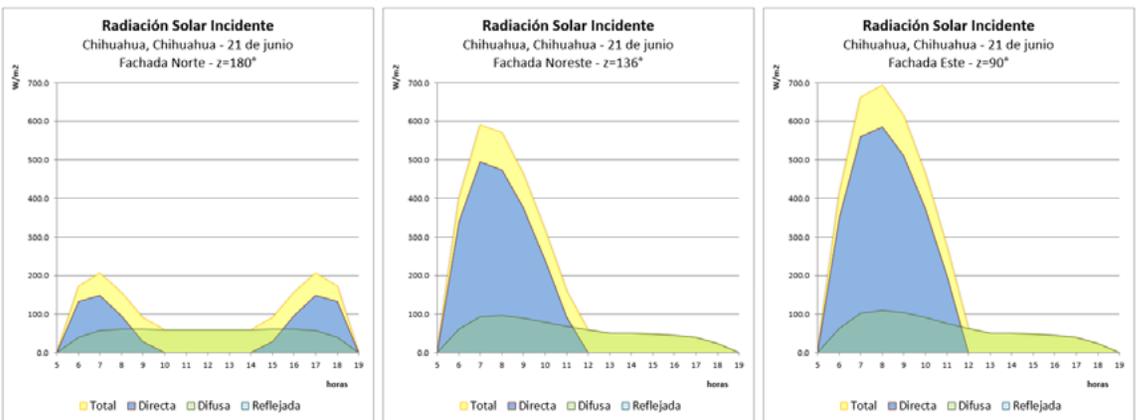


Figura 3. Radiación solar incidente teórica para la ciudad de Chihuahua, Chihuahua el 21 de junio para las fachadas Norte ($z=180^\circ$); Noreste ($Z= 136^\circ$) y Este ($z= 90^\circ$).

Fuente: elaboración propia.

Otras geometrías

Un problema similar se presenta con la geometría o forma de la envolvente del edificio. Las techumbres se consideran como tal cuando el ángulo de la normal de su superficie exterior tiene respecto a la vertical va desde 0° hasta 45° ; una pared cuando este ángulo es mayor a 45° y hasta 135° ; una superficie inferior, cuando el ángulo es mayor a 135° y hasta 180° ; y los pisos generalmente de 180° o con pendiente. A excepción de los pisos, todas las demás superficies pueden ser opacas o transparentes.

Es decir que, cualquier techumbre que tenga una inclinación hasta 45° de pendiente se considere igual que una techumbre plana. Aunque se considera en área real de la techumbre inclinada y no la proyectada sobre la horizontal, la incidencia de los rayos solares no se toma en cuenta.

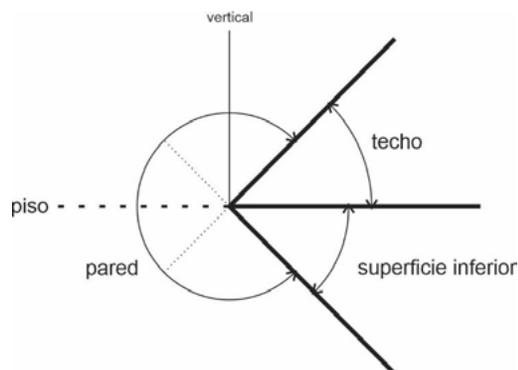


Figura 4. Ángulos de las partes que conforman la envolvente.

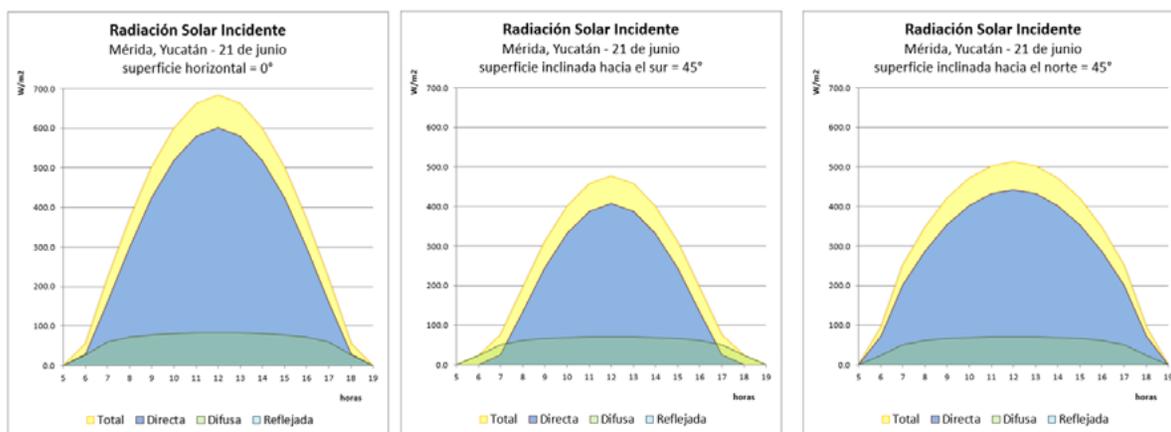


Figura 5. Radiación solar incidente teórica en la ciudad de Mérida, Yucatán, para una superficie horizontal y con pendiente de 45° hacia el sur y hacia el norte.

Fuente: elaboración propia.

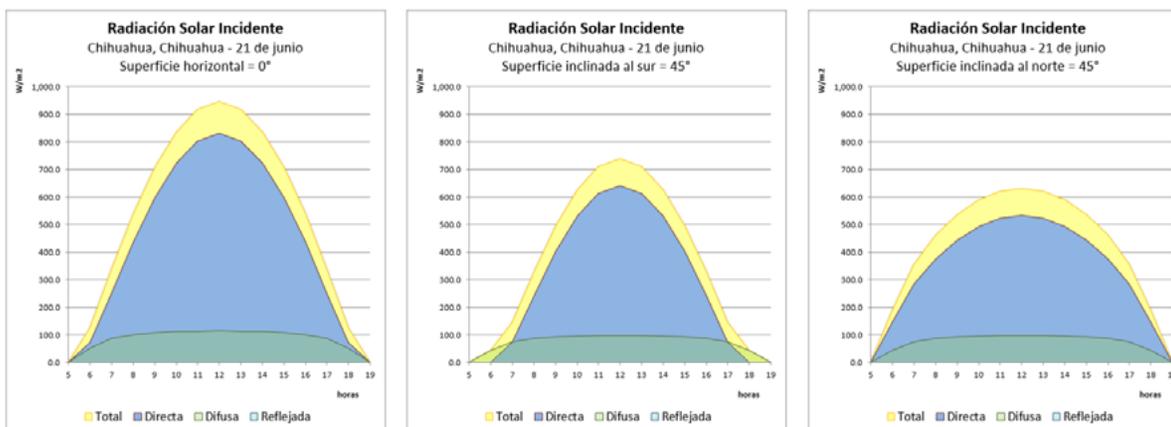


Figura 6. Radiación solar incidente teórica en la ciudad de Chihuahua, Chihuahua, para una superficie horizontal y con pendiente de 45° hacia el sur y hacia el norte.

Fuente: elaboración propia.

Patios

En edificios con patio, las fachadas interiores se deben considerar igual que fachadas exteriores de acuerdo con su orientación, sin embargo, no se precisa el método para calcular el sombreado que se da a través de los mismos paramentos. Pero, sobre todo, no se considera el efecto micro climático y los enormes beneficios que ofrece un patio.



Figura 7. Patio de la casa de los Montejo, Mérida Yucatán (1542-1549).

Fuente: México Desconocido. <https://www.mexicodesconocido.com.mx/casa-montejo-merida-yucatan.html>



Figura 8. Patio del Palacio de Gobierno de Chihuahua (1882-1892). Turiméxico.

Fuente: Turiméxico. <https://www.turimexico.com/estados-de-la-republica-mexicana/chihuahua-mexico/palacio-de-gobierno-chihuahua/>

El patio es un elemento arquitectónico importante de acondicionamiento térmico de todos los espacios que lo conforman. En los patios se produce estratificación térmica y flujos convectivos del aire que permiten bajar las temperaturas y al mismo tiempo reducir las oscilacio-

nes térmicas. Si el patio tiene vegetación, fuentes o espejos de agua, logra crear microclimas importantes que pueden reducir la temperatura más de 5 °C con respecto a la temperatura exterior (Galán-Marín, 2018).

Radiación y Sombreado (doble fachada, pantallas)

El edificio de referencia considera que sus fachadas tienen un 60% de muro y un 40% de ventanas sin dispositivos de control solar, y en la azotea se tiene el 5% de la superficie transparente, simulando un tragaluz. El área de ventana está en función de las condiciones climáticas del lugar, por lo que es un error considerar 40% de ventana para todos los casos independientemente del sitio del proyecto.

Mahoney (Docherty & Szokolay, 1999), a través de sus tablas, define que las aberturas están en función de la temperatura, la oscilación térmica, la humedad y la precipitación de cada lugar. Y define que éstas podrán ser grandes, medianas pequeñas o muy pequeñas.

Tabla 1. Áreas de aberturas recomendadas por Mahoney.

Áreas de aberturas según las Tablas de Mahoney		
Lugar	Área mínima	Área máxima
Chihuahua	10%	20%
Toluca	20%	30%
Ciudad de México	20%	30%
Mérida	30%	50%
Acapulco	50%	80%

La ventana es un elemento muy importante en el diseño bioclimático, ya que cumple con varias funciones. A través de ella se permite el asoleamiento de los espacios, así como su iluminación de manera natural. También permite la comunicación visual con el exterior. Debe permitir la ventilación natural para renovar el aire de las habitaciones y climatizarlas naturalmente. Y además debe controlar los ruidos provenientes del exterior.

En los climas cálidos y templados, las ventanas requieren de protección solar. Grandes superficies vidriadas sin protección solar provocarán sobrecalentamiento en el interior de los espacios al permitir el paso directo de la radiación solar. El edificio de referencia de la Norma 008, no considera control solar ni en las ventanas ni el domo, por lo que sobredimensiona sus ganancias solares, por lo que un edificio con mayor porcentaje de ventanas que tengan sombreado tendrá menores ganancias por radiación y por lo tanto mayores posibilidades de pasar la norma.

Temperaturas Interiores y Confort

El edificio de referencia considera una temperatura interior fija de 25 °C, independientemente del lugar de que se trate. Sin embargo, los estudios de confort adaptativo han demostrado que las personas tienen cierto grado de adaptación por lo que las temperaturas de confort o de neutralidad térmica varían de lugar a lugar.

Conductividad y Masividad

Con la NOM-008 se elabora un cálculo térmico de estado estacionario, es decir que no considera la variable del tiempo. Por ello sólo toma en cuenta el coeficiente global de transferencia de calor (K) a partir de la resistencia térmica de los elementos constructivos. La conductancia superficial exterior se considera fija en $13 \text{ W/m}^2\text{K}$, aun cuando este valor depende de la velocidad del viento exterior.

Tabla 2. Temperatura neutra y zona de confort.

Temperatura neutra y zona de confort				
Lugar	Temperatura media anual °C	Temperatura neutra °C	Zona de confort	
			maxima	minima
Toluca	13.1	21.9	24.4	19.7
Ciudad de México	18.3	23.5	26.0	21.3
Chihuahua	19.0	23.7	26.2	21.5
Mérida	26.3	26.0	28.5	23.8
Acapulco	27.9	26.4	28.9	24.2

Al ser un método de cálculo de estado estacionario, no se considera la inercia térmica, el amortiguamiento ni el retardo térmico, y tampoco las propiedades dinámicas de difusividad ni efusividad térmica. Por lo que el efecto de masa es despreciado, dando mayor importancia al aislamiento.

Tabla 3. Propiedades térmicas de algunos materiales.

Propiedades térmicas de algunos materiales					
Material	Conductividad	Densidad	Calor específico	difusividad	efusividad
	λ W/mK	ρ kg/m ³	Cp J/kgK	a m ² /s	b J/m ² K s
Poliuretano espuma rígida	0.025	30	1400	5.95E-07	3.24E+01
EPS Poliestireno expandido	0.035	25	1400	1.00E-06	3.50E+01
Fibra mineral (placa)	0.035	35	1000	1.00E-06	3.50E+01
Fibra de vidrio (colcha)	0.040	12	840	3.97E-06	2.01E+01
Block Hebel	0.110	550	896	2.23E-07	2.33E+02
Madera de pino	0.140	600	2720	8.58E-08	4.78E+02
Aglomerado	0.150	800	2500	7.50E-08	5.48E+02
Tablaroca	0.170	690	900	2.74E-07	3.25E+02
Durock	0.200	1125	1500	1.19E-07	5.81E+02
Tierra con paja	0.300	400	900	8.33E-07	3.29E+02
Adobe	0.600	1600	1480	2.53E-07	1.19E+03
Ladrillo de arcilla común	0.840	1700	900	5.49E-07	1.13E+03
Ladrillo cerámico	0.870	1800	840	5.75E-07	1.15E+03
Adobe (block)	1.250	2050	1000	6.10E-07	1.60E+03
Tierra apisonada	1.250	1540	1260	6.44E-07	1.56E+03
Block de concreto	1.630	2300	1000	7.09E-07	1.94E+03
Concreto reforzado	1.800	2400	1050	7.14E-07	2.13E+03
Acero inoxidable	17	7900	460	4.68E-06	7.86E+03
Acero normal	50	7800	450	1.42E-05	1.32E+04
Aluminio	160	2800	880	6.49E-05	1.99E+04
Cobre	380	8900	380	1.12E-04	3.58E+04

Ventilación

La ventilación natural es una de las principales estrategias de climatización natural en la arquitectura bioclimática, sin embargo, la norma no considera a la ventilación natural en sus cálculos. Ya que la norma está diseñada para disminuir las cargas térmicas de aire acondicionado, supone que los edificios son herméticos, sin ventilación natural. Sin embargo, los espacios requieren de la ventilación natural, tanto para renovar el aire y garantizar una buena calidad, como para disipar las cargas térmicas generadas en su interior.

Recordemos que el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (Arnal, 2005) establece que “el porcentaje mínimo de ventilación del 5% del área del local”.

Tabla 4. Requerimientos de Renovación de aire (RCDF).

Local	Cambios de Aire por hora
Vestíbulos, locales de trabajo, reunión en general, sanitarios de uso público y baños domésticos	6
Baños públicos, cafeterías, restaurantes, cines, auditorios y estacionamientos	10
Cocinas en comercios de alimentos	20
Centros nocturnos, bares y salones de fiesta	25

Fuente: elaboración propia.

Ejemplos en Chihuahua y Mérida

Se evaluaron dos edificios idénticos, uno en la ciudad de Mérida, Yucatán y otro en Chihuahua, Chihuahua.

Las dimensiones de los edificios son: 50 m de largo, 30 m de ancho y 20 m de altura. Con un 50% de acristalamiento en todas las fachadas.

Los sistemas constructivos considerados son:

MURO			
Material	Espesor (m) ϵ	Conductividad Térmica (W/m K) λ (h)	M aislamiento térmico (m ² KW) ϵ/λ (1/h)
he	1	13	0.0769
APLANADO CON MORTERO CEMENTO ARENA	0.02	0.63	0.0317
BLOQUE DE CONCRETO 15X15X40	0.15	0.21	0.7143
APLANADO CON MORTERO CEMENTO ARENA	0.02	0.63	0.0317
hi	1	8.1	0.1235
Para obtener el aislamiento térmico total, sumar la M de todos los materiales más la convección exterior e interior [Fórmula $M = \sum M$]			M 0.9782 m ² KW
Coeficiente global de transferencia de calor de la porción (K) [Fórmula $K = 1/M$]			K 1.0223 W/m ² K

Análisis crítico de la envolvente del edificio de referencia en la Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001

TECHO

	Material	Espesor (m) ϵ	Conductividad Térmica (W/mK) λ (h)	M Aislamiento térmico (m ² K/W) ϵ/λ (1/h)
	he		1	13
COMPONENTE HOMOGENEA	IMPERMEABILIZANTE	0.0045	0.17	0.0265
	FILTRO IMPERMEABILIZANTE	0.002	0.174	0.0115
	ENTORTADO	0.05	0.63	0.0794
	RELLENO TEZONTLE	0.3	0.186	1.6129
	FALSO PLAFÓN Tablaroca	0.019	0.17	0.1118
hi		1	6.6	0.1515
M Parcial			M_{parcial}	2.0704

	Grosor (m) g	Conductividad Térmica (W/mK) λ	Aislamiento térmico (m ² K/W) g/λ	Fracción F	$F/(M_{parcial} + g/\lambda)$	
	COMPONENTE HETEROGENEA	LOSA 5 cm	0.10	1.74	0.0575	0.8421
TRABES 30 cm		0.30	1.74	0.1724	0.1579	0.07040
AIRE HASTA LOSA		1.00	0.025	40.0000	0.8421	0.02002
AIRE HASTA TRABE		0.70	0.025	28.0000	0.1579	0.00525
					0.491410	

Para obtener el aislamiento térmico total, sumar la M de todos los materiales más la convección exterior e interior [Fórmula $M = \sum M$]

M 2.0350 m² K/W

Coefficiente global de transferencia de calor de la porción (K) [Fórmula $K = 1/M$]

K 0.4914 W/m² K

VENTANA

	Material	Espesor (m) ϵ	Conductividad Térmica (W/mK) λ (h)	M Aislamiento térmico (m ² K/W) ϵ/λ (1/h)
	he		1	13
VIDRIO CLARO		0.006	1	0.0060
		1	8.1	0.1235
hi		1	8.1	0.1235

Para obtener el aislamiento térmico total, sumar la M de todos los materiales más la convección exterior e interior [Fórmula $M = \sum M$]

M 0.2063799 m² K/W

Coefficiente global de transferencia de calor de la porción (K) [Fórmula $K = 1/M$]

K 4.8454 W/m² K

Fuente: elaboración propia.

En ambos casos los edificios no pasaron la norma. Para poder hacerlo se hicieron algunos ajustes. En el caso de Mérida, el edificio pasó la norma simplemente agregando 0.10 m de aislante de poliestireno en la losa y los muros. Aún sin ningún sistema de control solar en las ventanas.

En el caso de Chihuahua, tampoco pasó la norma con el aislante de poliestireno, por lo que se redujo el área de ventanas al 40% en todas las fachadas. Con esto ya pasó la norma, aún sin protección solar en las ventanas.

Al considerar únicamente el coeficiente global de transferencia de calor (valor U, o K en la norma), no importa en donde se ubique el aislamiento, ya sea en el exterior, o el interior. Sin embargo, su ubicación si tiene un comportamiento distinto en función de las propiedades dinámicas, como lo demuestra Szokolay (Szokolay, 2004).

COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Material	Espesor (m) ℓ	Conductividad Térmica (W/m K) λ (h)	Aislamiento térmico (m ² K/W) ℓ/λ (1/h)
he	1	25	0.04
CONCRETO REFORZADO	0.15	1.4	0.11
AISLANTE DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)	0.075	0.035	2.14
hi	1	7	0.14
No importa la ubicación del aislante			
		M	2.43
		K	0.41

PROPIEDADES DINÁMICAS

Ubicación del aislante	Retardo térmico (h) ϕ	factor de decremento μ	Admitancia (W/m ² K) γ
POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) AL EXTERIOR	6.28	0.30	5.41
POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) AL INTERIOR	5.03	0.56	0.44
diferencia	1.25	0.26	4.97

Conclusiones

La Norma NOM-008-ENER-2001 tiene la intención de limitar las ganancias de calor a través de la envolvente de los edificios no habitacionales. Pero de origen su objetivo es reducir cargas de los equipos de aire acondicionado, por lo que no considera sistemas pasivos de acondicionamiento. Es por eso que la norma se cumple simplemente con agregar aislamiento térmico.

Las propiedades dinámicas de los materiales, su inercia térmica, la ventilación natural y las ganancias internas, entre otros, no se consideran. El control solar, aunque si se toma en cuenta no tiene tanta importancia como el aislamiento. En los casos analizados con climas extremos la norma se cumplió simplemente con aislamiento sin ningún sistema de control solar, en climas donde evidentemente son necesarios.

Apostar únicamente al aislamiento es un error, ya que el aislamiento actúa en dos sentidos, impidiendo que el calor entre, pero también impidiendo que salga. Además, la ubicación del aislamiento también es importante en el comportamiento que tendrá la envolvente del edificio.

Un edificio con grandes acristalamientos sin control solar tendrá grandes ganancias por radiación, por más aislado que esté el edificio, si el edificio tiene muchas ganancias internas por las personas que en el laboran y por los equipos electrónicos o electromecánicos, provocarán un aumento considerable de la temperatura interior. Muchas de las cargas internas se pueden disipar fácilmente con ventilación natural, pero ésta no es considerada por la norma.

En un clima extremo como lo es el caso de Chihuahua, se presentan requerimiento tanto de calefacción en invierno como de enfriamiento en verano, por lo que usar las temperaturas medias para los cálculos no es útil. Se pueden usar los "Días Grado", es decir los requerimientos de enfriamiento y calentamiento de una localidad, sin embargo, éste es un parámetro usado por los ingenieros mecánicos y especialistas en aire acondicionado. Por lo que

fácilmente pueden omitirse los sistemas pasivos y todos los principios de la Arquitectura Bioclimática.

Un edificio energéticamente eficiente debe empezar por disminuir la demanda de energía del edificio a través de un buen diseño bioclimático. Y no tratar de arreglar solamente con aire acondicionado las deficiencias de diseño.

Referencias

- Arnal, L. (2005). *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. Editorial Trillas.
- Docherty, M., & Szokolay, S. V. (1999). *Climate Analysis*. Queensland, Australia: Passive and Low Energy Architecture (PLEA).
- Galán-Marín, C. e. (2018). El patio como elemento clave en la eficiencia energética de edificios. El caso de Córdoba. *XI Bienal Ibérica del Patrimonio Cultural* (págs. 67-75). Salamanca: AR&PA.
- SENER. (25 de abril de 2001). NOM-008-ENER-2001. Ciudad de México, México: Diario Oficial de la Federación (DOF).
- Szokolay, S. V. (2004). *Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design*. Oxford, UK: Elsevier - Architectural Press.

Análisis de las características termofísicas de sistemas de ventana y los vidrios arquitectónicos para la envolvente del edificio

Aníbal Figueroa Castrejón¹, Víctor A. Fuentes Freixanet¹

¹ Profesor investigador del área de arquitectura bioclimática.
Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

Resumen

Actualmente existe una tendencia mundial al uso de envolventes de vidrio en los edificios de casi cualquier clima. Por otra parte, hay una gran diversidad de vidrios arquitectónicos y cada vez es más amplia la oferta de vidrios dobles y térmicos selectivos (Low E). Este trabajo analiza la información que es importante entender para comparar las propiedades y características de los sistemas de ventana y tomar en cuenta sus ventajas y desventajas al usarlos en la envolvente de un edificio en México.

Palabras Clave: Iluminación natural, control solar, coeficiente de transferencia de calor, sistemas de ventana, coeficiente de ganancia de calor solar.

Abstract

There is currently a worldwide trend towards the use of glass enclosures in buildings in almost any climate. On the other hand, there is a great diversity of architectural glasses and the offer of double and selective thermal glasses (Low E) is increasingly wider. This work analyzes the information that is important to understand to compare the properties and characteristics of window systems and take into account their advantages and disadvantages when using them in the building envelope in Mexico.

Keywords: Daylighting, solar control, heat transfer coefficient, window systems, solar heat gain coefficient.

Introducción. Arquitectura de Cristal

Es común encontrar edificios de oficinas e incluso vivienda con porcentajes cercanos al 100% de acristalamiento en las fachadas de cualquier orientación y en todos los climas de México. Esto se debe a estilos internacionales que se copian indiscriminadamente. Se supone que este es un manejo de materiales “modernos”. Esta tendencia se inició en el siglo XIX con proyectos como los del inglés Joseph Paxton el Palm House en Kew (1844) y el Cristal Palace (1851). Los maestros de la Bauhaus alemana popularizaron los edificios de con fachadas de vidrio. Walter Gropius construye la fábrica Fagus en 1911 y hace cien años Mies Van der Rohe publicó el Proyecto para un Edificio de Oficinas (1921) a base de “muros cortina” que fue usado como modelo para una gran cantidad de edificios de vidrio en el siglo XX.¹

Durante la segunda parte del siglo XX, muchos constructores descubrieron que las fachadas de vidrio tienen ventajas por su gran rapidez de construcción y calidad de acabado. Aun cuando su costo es mayor, la reducción del tiempo y mano de obra las hacen más rentables.

Adicionalmente, los edificios de vidrio se asocian con mayor limpieza, menor costo de mantenimiento, mayor luminosidad y acceso al sol.



Figura 1. Mies Van der Rohe. Proyecto para un Edificio de Oficinas (1921).

Fuente: Gastón, C. (2012) “Mies: Concursos en la Friedrichstrasse”, Universidad de Sevilla, España

¹ Lauret, Benito (2018). Evolución Histórica del Muro Cortina, Lucernarios y Vidrio Estructural. Ed. Universidad Politécnica de Madrid, España.

Todo esto ha llevado a asociar a las construcciones acristaladas con un mayor estatus social. Por eso es importante entender sus ventajas y desventajas en los climas de países como México.

En este trabajo se revisan las propiedades termo físicas de los vidrios y las consecuencias de usarlos en el diseño de la envolvente de los edificios.

¿Para qué ponemos ventanas?

Los vidrios y ventanas cumplen muchas funciones vitales en las edificaciones.

Iluminación Natural

Probablemente la más evidente es que permiten iluminar los espacios interiores. Es a través de las ventanas que la iluminancia exterior penetra en los espacios, distribuyéndose a través de múltiples reflexiones instantáneas. Esta es la razón básica por la que ponemos ventanas. Sin embargo, al colocar muebles en los espacios, se limita la reflexión la luz en el piso, sobre todo cuando estos se encuentran cercanos a la ventana y muros, ya que son superficies donde ocurre la reflexión interna.

Ventilación Natural

La segunda función más relevante de los sistemas de ventana es la ventilación natural. En este sentido, cuando son operables, tienen la ventaja de poder regular fácilmente los intercambios de aire entre el interior y el exterior simplemente abriendo o cerrando una porción de ellos. En los ambientes urbanos, esta función se ha complicado por la presencia de gases contaminantes que deterioran la calidad del aire exterior y la presencia cada vez más intensa de ruido ambiental producida por equipos de sonido y maquinaria y particularmente por el tráfico vehicular.

Etimológicamente *ventana* proviene del latín “ventus” (viento) así como también window “wind” en inglés. En un inicio las ventanas sólo eran vanos abiertos que permitían la entrada del viento, y para controlarlo se cubrían con telas, pieles, cuernos o papel. La invención de la ventana se les atribuye a los romanos, quienes incluyeron micas o piedras translúcidas para cubrirlas, y más adelante incorporaron el vidrio soplado. Inicialmente las ventanas eran fijas; fue hasta el siglo XVII que se hicieron operables cuando se creó el bastidor de madera para sujetar el vidrio y así para permitir la entrada de aire del exterior, ventilar y renovar el aire interior. Por otra parte, el vidrio flotado apareció hasta principios del siglo XX.

Ventanas Herméticas

El uso de una ventana hermética, sin ninguna porción operable, es muy reciente. Tiene su origen en el desarrollo de los sistemas de aire acondicionado que se patentaron en 1902² y se han usado extensivamente desde la segunda mitad del siglo XX, sobre todo para edificios

² Gonzalez Baez, Conti.(2022). Historia del Aire Acondicionado. Consultado el 19 sept 2023 en <http://elaireacondicionado.com/articulos/historia-del-aire-acondicionado>

de oficinas, hotelería, comercio, industrias y algunos tipos de vivienda. Uno de los problemas que plantean los sistemas de ventanas herméticas es que los espacios internos dependen enteramente de la energía eléctrica para operar los sistemas electromecánicos que controlan la temperatura interior, y en algunos casos regulan la ventilación al intercambiar y filtrar el aire entre el exterior e interior. Si estos no operan correctamente, la calidad y temperatura del aire interior se deterioran produciendo el llamado Síndrome del Edificio Enfermo. La Organización Mundial de la Salud ha determinado que el 30% de los edificios, incluyendo los de construcción reciente, presentan estos problemas que afectan directamente la salud de los usuarios.³

Aislamiento del Exterior

Por otra parte, las ventanas nos aíslan del clima exterior constituyen una barrera a elementos climáticos como la lluvia, el viento, el ruido, los olores desagradables, los animales, etc. Sin embargo, no son el elemento constructivo de la envolvente más eficiente como aislante térmico, ya que su coeficiente global de transferencia de calor o valor U puede ser varias veces mayor que el de un muro convencional.

Efecto Invernadero

Uno de los efectos más notables de las ventanas es que generan el denominado “efecto invernadero”, que implica que una parte de la componente directa de la energía incidente en forma radiante entra al espacio y se absorbe. Al cambiar de longitud de onda la mayoría de los vidrios no permiten que una porción de esta energía regrese al exterior, por lo que aumenta la temperatura interior. Este es el principio básico del calentamiento solar directo para los edificios a través de las ventanas en fachadas que reciben radiación solar.

Los primeros en tomar ventaja de este fenómeno físico fueron los romanos, quienes desarrollaron el *Specularium* que fue uno de los primeros invernaderos para cultivar flores, verduras y frutas, documentado en el siglo I por Plinius Secundus.⁴

Ver y ser visto

Adicionalmente, no se puede soslayar la importancia de las ventanas de para ver hacia el exterior y percibir el clima, el lugar donde estamos, la hora que es y la estación del año. Por todo ello, las ventanas nos orientan y dan información relevante del ambiente exterior que nos rodea y más aún la luz y los rayos solares son indispensables para el cuerpo y muchas funciones metabólicas. Sin embargo, en algunos casos, esta misma característica puede ser generadora de distracción, accidentes de trabajo o alteraciones psicológicas. Por lo tanto, es importante seleccionar cuidadosamente la parte del entorno que los usuarios observan a través de las ventanas.

3 World Health Organization (1988). Indoor Air Quality, Biological Contaminants. Ed WHO, Copenhagen, Denmark

4 Gaius Plinius Secundus (79). Natural History. Enciclopedia Britannica consultada en [https:// https://www.britannica.com/biography/Pliny-the-Elder](https://www.britannica.com/biography/Pliny-the-Elder)

Del mismo modo que podemos ver del interior hacia el exterior, se puede ver desde el exterior hacia el interior, habiendo siempre una mejor visión del espacio más oscuro hacia el espacio más iluminado. Esta característica es excelente en el caso de aparadores o áreas de exhibición de mercancías (autos, ropa, muebles), pero puede ser muy perturbadora en espacios privados, ya que se pierde la privacidad visual, sobre todo en las noches cuando el interior está más iluminado y el exterior, oscuro.

Dispositivos de Control Solar

Un elemento importante en el diseño de las fachadas y sus áreas de vidrio es la inclusión de diferentes dispositivos de control solar. Existen muchas alternativas para estos elementos arquitectónicos siendo los más comunes los volados, parteluces y mallas perforadas.

Su efectividad variará de acuerdo al clima, la latitud, orientación y dimensiones de las ventanas. En términos generales serán muy poco eficientes en la orientación norte. Los volados funcionarán correctamente en orientaciones Sur y Sureste para bloquear el sol de primavera y verano y permitir el asoleamiento invernal. En las otras orientaciones se debe realizar un análisis detallado y en caso de ser necesario combinar dos o más dispositivos de sombreado.

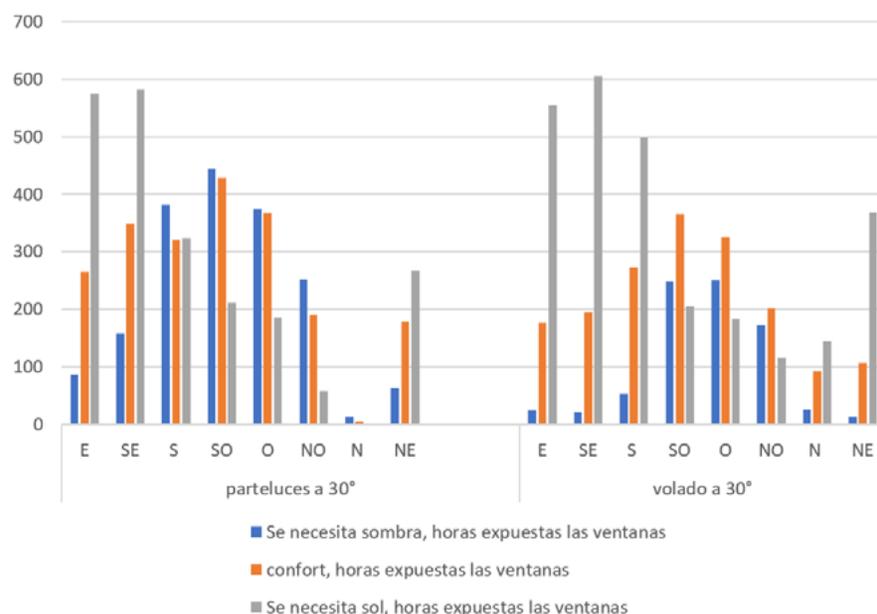


Figura 2. Comparación de Parteluces a 30° y Volados a 30° para San Luis Potosí en diferentes orientaciones.

Fuente: Programa Climate Consultant (2019)⁵

Radiación Incidente en Zonas de Trabajo

La radiación directa incidente en zonas de trabajo no es deseable ya que produce problemas tales como el sobrecalentamiento de las personas y equipos, contrastes de iluminación muy

⁵ UCLA Energy Design Group's Tool (2019). Climate Consultant Program. Consultado en <https://www.sbse.org/resources/climate-consultant>

altos en áreas de trabajo, reflejos en los monitores de computadoras y deslumbramiento. Lo que justifica la necesidad de dispositivos de control solar o Sistemas de cortinas, persianas o mallas en diversas orientaciones.

Deslumbramiento

Además del deslumbramiento por incidencia directa de la radiación solar en las zonas de trabajo que produce niveles inadecuadamente altos de iluminación natural, también es común tener deslumbramientos por contraste en sistemas de ventana muy grandes o mal ubicados en los que vemos a personas u objetos contra un fondo más brillante que ellos. Esto reduce nuestra percepción de los detalles y apreciamos solamente siluetas. Ambas situaciones ocasionan afectaciones físicas como dolor de cabeza, falta de agudeza visual y que a mediano y largo plazo enfermedades de la vista.

Sistemas de Cortinas, Persianas y Mallas

Se debe tomar en cuenta que en la mayoría las ventanas se coloca algún tipo de sistema de cortina, persiana o malla móvil generalmente al interior como sistema de control solar, de privacidad e incluso como aislante térmico.

Estos pueden ser de materiales y tipos muy variados, siendo los más comunes el PVC, aluminio, madera o tela. Sin embargo, no existe información específica sobre el efecto de los diferentes tipos de cortinas y persianas en el comportamiento térmico de los sistemas de ventana disponibles en el mercado mexicano.



Figura 3. Luis Barragán (1947) Ventana de la Casa de Luis Barragán en Tacubaya.

Fuente: Fotografía A. Figueroa

Áreas de vidrio en la envolvente del edificio

Para determinar la transmisión de Energía a través de la envolvente es necesario determinar las áreas que componen la fachada del edificio. La proporción de vidrio en las fachadas debe corresponder con el clima y tiene consecuencias termo físicas relevantes ya que afecta de manera directa la transmisión de calor a través de la envolvente y también la ganancia o pérdida de calor en forma radiante.

Hay que tomar en cuenta que los vidrios permitirán el paso de energía de manera diferente a los muros, debido a que los muros solamente conducen el calor y las superficies acristalada además de conducir energía, transmiten la radiación.

La conductividad térmica de los sistemas de ventanas es muy relevante en el balance general de la envolvente. En términos generales los vidrios son altamente conductivos debido a su poco espesor. En México en la mayoría de las ventanas se instalan vidrios sencillos de 3, 4 o 6 mm, incluso en edificios comerciales. El uso de vidrio doble con cámara de aire es incipiente y muchos usuarios y constructores no lo incluyen por tener un precio más alto.

Menos frecuente aún es el uso de vidrios dobles con gases inertes que en otros países están disponibles y son de uso común y obligatorio.

Adicionalmente, en los últimos años ha ocurrido un avance tecnológico en el desarrollo de vidrios selectivos o de baja conductividad que presentan características termo físicas muy diferentes al vidrio común y a los vidrios dobles simples.

La proporción adecuada de vano macizo de cada fachada depende del clima y la orientación. En términos generales, autores como Mahoney y Evans⁶ proponen distintos porcentajes de vidrio para las diferentes ciudades de México, por ejemplo:

Tabla 1. Cálculo de las Áreas de Aberturas en la Envolvente con Tablas de Mahoney.

Lugar	Área mínima de abertura	Área máxima de abertura
Mérida	30%	50%
Chihuahua	10%	20%
Toluca	20%	30%
Ciudad de México	20%	30%
Acapulco	50%	80%

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, Mahoney y Evans recomiendan reducir el uso de vidrio a un porcentaje de la fachada y en ningún caso se considera un 100% de acristalamiento. En los climas cálido-húmedos aumenta el porcentaje de ventana, que debe ser operable debido a los requerimientos de ventilación.

⁶ Königsberger H, Mahoney C, Evans J. (1971). *Climate and House Design*. Ed United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Center for Housing, Building and Planning, USA

Es importante observar que el edificio de referencia de la NOM-008-ENER toma como porción de ventana solamente un 10% de la envolvente del edificio y NOM-020-ENER considera un 40% de acristalamiento en las fachadas sin ningún dispositivo de sombreado independientemente del clima o la orientación.

En contraste, en un estudio reciente (UAM, 2022) realizado sobre la vivienda periurbana de auto construcción en la zona metropolitana de la Ciudad de México encontramos que, en los casos analizados, el porcentaje de ventana en muro es de apenas entre el 4% y el 20%. Lo que indica que el área de vidrio está determinada por factores térmicos y económicos.

Tipos de Vidrios Arquitectónicos

Aun cuando la oferta comercial de vidrios arquitectónicos se ha multiplicado en los últimos años para incluir vidrios con características especiales como autolimpiado, con color, reflejantes, espejo, templado o laminados⁷, podemos establecer que existen básicamente tres tipos de vidrios arquitectónicos de uso común: monolítico o sencillo, doble o Duovent® y de Baja Emisividad o Low E.

Sencillo

Los vidrios sencillos monolíticos están formados por un solo cristal. En la mayoría de las vidrierías locales están disponibles en espesores de 3 mm, 4 mm y 6 mm claros, así como Filtrasol en 6 mm. Estos son el tipo de vidrio de uso común en la mayoría de las casas habitación y edificaciones comerciales por su accesibilidad, fácil colocación y bajo costo.

Doble Acristalamiento

Los vidrios dobles tipo Duovent®, están formados por dos o más cristales separados entre sí por cámaras de aire deshidratado resultando un aislante efectivo. La separación entre los vidrios se hace con un perfil metálico entre ellas, en cuyo interior se introduce un producto desecante y se asegura la estanqueidad con un doble sellado perimetral. Un sistema tipo Duovent® correctamente realizado no presenta condensación. No se trata solamente de un doble acristalamiento, por lo que el procedimiento de preparación de los vidrios se debe realizar en condiciones controladas para asegurar su calidad y efectividad. Asimismo, estos vidrios requieren manguetas diseñados específicamente para ellos.

Vidrios Low E o Selectivos con Doble Acristalamiento

Los vidrios selectivos son vidrios fabricados mediante un proceso de revestimiento aplicado a una hoja de vidrio flotado en una de sus caras. Su comercialización inició a partir de la década de los 1980's y existen diferentes tipos de acuerdo con el procedimiento empleado para su elaboración. Se instalan generalmente en arreglos o sistemas de doble acristalamiento tipo Duovent® y en la mayoría de los casos solo una de las caras tiene un recubrimiento selectivo y esta se coloca hacia el espacio intermedio para protegerla de la intemperie y aumentar su vida útil.

⁷ Saint-Gobain Glass (2023). Catálogo de Vidrios Arquitectónicos. Consultado en: <https://mx.saint-gobain-glass.com/es-MX/product/>

La variedad de opciones comerciales de vidrios Low E es muy amplia al combinar diferentes espesores, coloraciones y recubrimientos selectivos aplicados con diversos métodos.

Propiedades Térmicas de los Vidrios

Coefficiente Global de Transferencia de Calor (Valor U)

El Coeficiente Global de Transferencia de Calor (Valor U) es la cantidad de energía que se transfiere a través de un sistema o elemento constructivo por cada metro cuadrado y grado Kelvin de diferencia. Está asociado con los tres modos de transferencia de energía por conducción, convección y radiación superficial de los materiales. Es dependiente de la diferencia de temperatura entre el espacio interior y la superficie exterior. El flujo de calor se dará siempre de mayor a menor temperatura.

En primera instancia se compararon tres tipos de vidrio y dos sistemas constructivos de muro y tres sistemas constructivos de cubierta.

De los vidrios analizados uno es monolítico, otro con doble acristalamiento tipo Duovent® y uno tipo Duovent con un vidrio selectivo (Low-E) de la marca Saint Gobain.

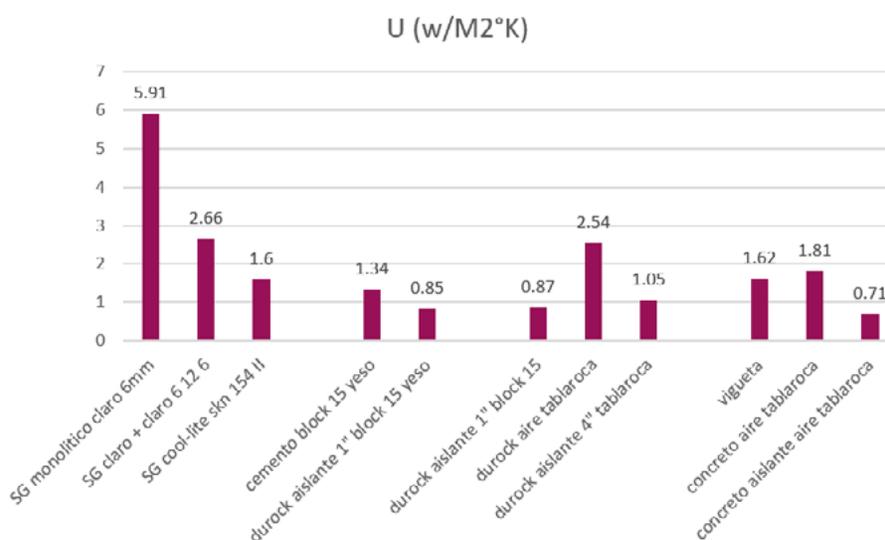


Figura 4. Valor U de distintos acristalamientos y materiales constructivos.

Fuente: elaboración propia.

Se observa que los vidrios sencillos monolíticos tienen una transferencia de calor muy alta (>5.7 W/m² K), de más del doble que todos los demás vidrios tipo Duovent® (2.66 W/m² K) y más del triple (< 1.81 W/m² K) que los vidrios Low-E y que cualquier sistema constructivo de muro o de losa. Esto quiere decir que se conduce una gran cantidad de energía a través de ellos. Esta será más alta mientras mayor sea el diferencial de temperatura. En términos generales su uso no es conveniente, ya que presenta una alta transferencia de calor lo que hará que durante el día los espacios se puedan sobrecalentar y en la noche se enfríen rápidamente. Esto será particularmente crítico en lugares con grandes diferencias entre la temperatura interior deseada y la temperatura exterior.

En términos generales los vidrios tipo Duovent® reducen la transferencia de calor por conducción un 60% con respecto al vidrio sencillo lo que impactará en la temperatura interior. En las construcciones con aire acondicionado o calefacción será notable la diferencia entre vidrios Duovent y vidrios sencillos, ya que se reducirá el consumo de energía y el dimensionamiento de los sistemas de aire acondicionado. Sin embargo, en los espacios sin aire acondicionado los vidrios fijos tipo Duovent® funcionan como un aislante en los dos sentidos, dejan pasar menos calor, pero al mismo tiempo impiden que este salga, lo que puede resultar contraproducente para edificaciones con una alta carga térmica interna en días o climas cálidos.

Finalmente, en cuanto a su valor U, los nuevos vidrios Low E empleados en sistemas de ventanas de doble acristalamiento son los que más reducen la transferencia de calor respecto a los dos grupos anteriores. Este tipo de vidrios tienen beneficios significativos en los espacios acondicionados artificialmente con cargas internas moderadas en climas extremos.

Los sistemas constructivos de muros y cubiertas sin aislante tienen valores similares a los vidrios selectivos. Si se les incluye aislante, el coeficiente global de transferencia de calor disminuye aproximadamente un 50%.

Por lo tanto, en términos generales por razones térmicas es importante reducir las áreas acristaladas de la envolvente del edificio al mínimo requerido.

Coefficiente Global de Transferencia de Calor de los Sistemas de Ventanas

Adicionalmente al tipo de vidrio empleado, el sistema de ventana incluye además a los manguetes o marcos necesarios para su colocación y operación. Dependiendo del material con el que estén hechos, el valor U global de la ventana variará. Los materiales más comunes usados actualmente en México para los marcos de ventana son el aluminio, el acero en forma de perfil o tubular y recientemente se ha incrementado la oferta de ventanas de Policloruro de Vinilo (PVC).

Dependiendo de su diseño, la cancelería puede tener un área entre el 5% y el 30% del tamaño del vano. Esta superficie establece los llamados “puentes térmicos” por los que se conduce la energía de lado con mayor temperatura al lado más frío.

En México son muy comunes las ventanas metálicas de acero en perfiles sólidos o tubulares, por su bajo costo, resistencia y seguridad; o de aluminio por su resistencia a la corrosión, hermeticidad y bajo mantenimiento. Sin embargo, estos materiales tienen los valores más altos de transferencia térmica.

Otra opción son las ventanas de madera que tienen un valor U más bajo, pero requieren maderas duras, mantenimiento constante y tienen baja hermeticidad.

Finalmente encontramos ventanas de PVC en diferentes configuraciones para darles mayor resistencia mecánica. Estas ventanas tienen un coeficiente de transferencia térmica bajo, son herméticas, ligeras y requieren poco mantenimiento, pero su costo es el más elevado.

El diseño, la elección del material de la cancelería y el tipo de vidrio afectan de manera importante el comportamiento térmico de las superficies vidriadas exteriores.

		MARCO en el 30%			
		Metálico	Madera	PVC	
		VALOR U	U=5.7	U=2.5	U=1.8
VIDRIO en el 70%	MONOLITICO				
	4mm	U=5.7	5.7	4.7	4.5
	Duovent 4-12-4	U=2.9	3.7	2.7	2.5
	Low E 4-12-4	U=1.7	2.9	1.9	1.7

Tabla 2. Coeficiente Global de Transferencia de Calor del Sistema de Ventana. (Valor U, vidrio más marco).

Fuente: Carmody, J (2012)

De los datos anteriores se concluye que el material que compone al marco tiene un efecto significativo sobre el comportamiento térmico total de la ventana. Se observa que una ventana metálica de aluminio o acero, aún con un vidrio Duovent®, tiene valores muy cercanos a una ventana con marco de material No Metálico como PVC o Madera y vidrio claro monolítico. Existe poca diferencia entre un vidrio Low E en marco metálico y un Duovent en madera o PVC. El mejor sistema es un vidrio Low E en un marco de PVC. También hay que considerar el nivel de sellado y mantenimiento de la ventana. Esto implica que la selección del material y el diseño de la manguetería del sistema de ventana son un elemento importante en el desempeño térmico de la envolvente de una edificación que con frecuencia es soslayado.

Transmisión de Luz Visible (VLT)

La Transmisión de Luz Visible (VLT o Visible Light Transmission) es la cantidad de luz visible que se transmite a través un sistema de acristalamiento. El VLT también es un número con valor de 0 a 100 equivalente al porcentaje; cuanto más bajo sea su valor menor será la cantidad de luz visible que se transmitirá a través del sistema. Esto determinará los niveles de iluminación natural al interior de los locales y la cantidad de luminarios que se deberán prender durante el día.

En este caso debemos notar que los vidrios monolíticos son los que permiten la mayor transmisión de luz visible (88%) y por lo tanto requieren ventanas más pequeñas para proporcionar iluminación natural al interior. Los arreglos de doble vidrio (Duovent) reducen adicionalmente entre un 10 y 20% el paso de la luz con respecto al vidrio monolítico. En cuanto a los vidrios selectivos existen diferencias muy importantes en su valor VTL, desde 76% hasta el 41% dependiendo del tipo de vidrio, su color y acabado. Para valores de 51% o menos, la reducción de la iluminación natural al interior es muy significativa requiriéndose el doble del área de ventana e incrementando el consumo eléctrico por iluminación y gasto de mantenimiento de las lámparas.

Análisis de las características termofísicas de sistemas de ventana y los vidrios arquitectónicos para la envolvente del edificio

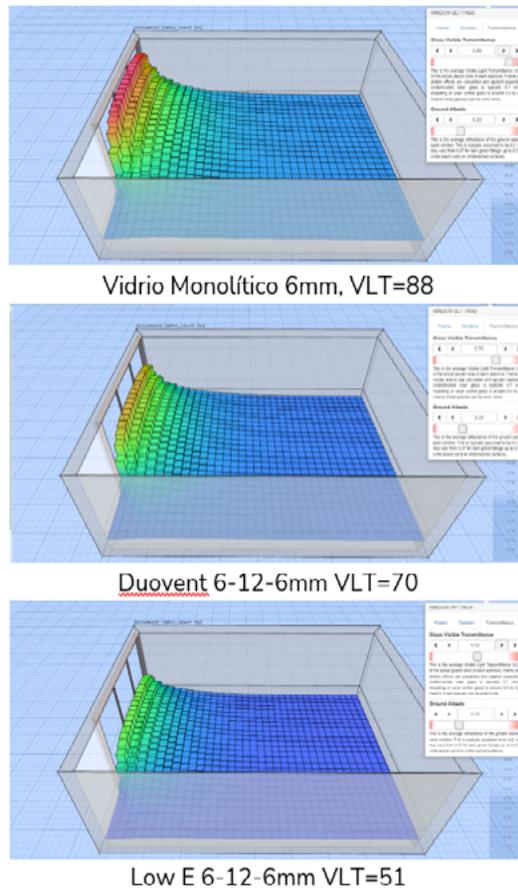


Figura 5. Distribución de la iluminación interior medida en Factor de Luz Natural (DF) en una oficina de 8.4 x 6.5 x 3.05m pintada en color blanco con orientación norte y una sola ventana de 4.75 x 3.05. Programa Marsh, Andrew (2023). Dynamic Daylighting.⁸

Fuente: elaboración propia.

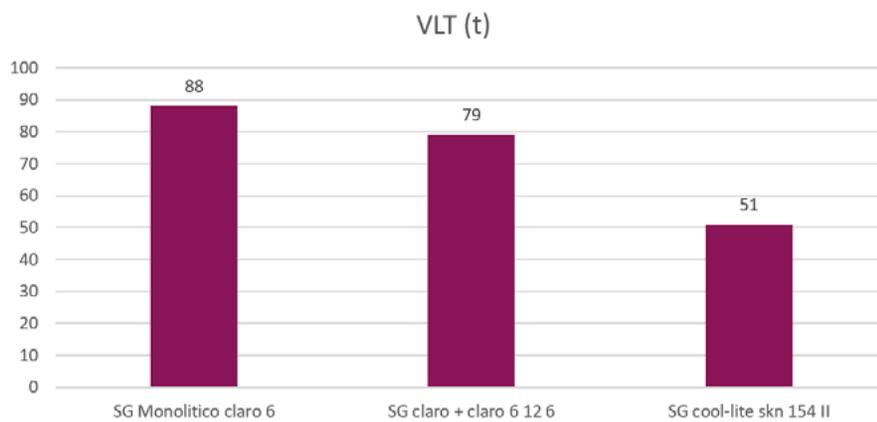


Figura 6. Transmisión de luz visible de diferentes sistemas de acristalamiento.

Fuente: Saint-Gobain (2023)

⁸ Marsh, Andrew (2019). Dynamic Daylighting Program. Consultado en: <https://andrewmarsh.com/software/daylight-box-web/>

Coeficiente de Ganancia de Calor Solar (SHGC)

El Coeficiente de Ganancia de Calor Solar (SHGC o Sun Heat Gain Coefficient) cuantifica la capacidad del sistema de acristalamiento para bloquear la radiación solar. El SHGC es la fracción de la radiación solar que se transmite a través de una ventana respecto a la radiación solar incidente, así como la cantidad de energía que es absorbida por el vidrio y reirradiada al interior. El SHGC se expresa en porcentaje o en un valor entre 0 y 100. Conforme el valor sea menor, en la misma proporción se reducirá la ganancia solar y se incrementará su efecto de sombreado.

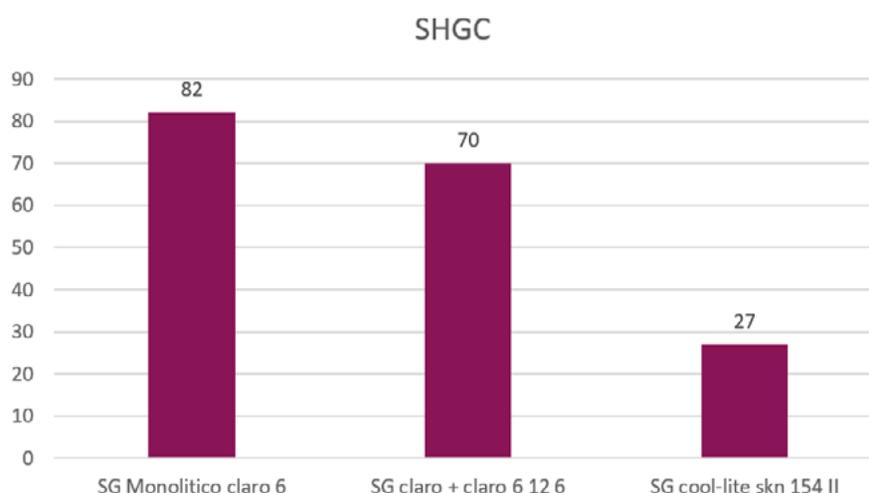


Figura 7. Coeficiente de Ganancia de Calor Solar de diferentes sistemas de acristalamiento.

Fuente: Saint-Gobain (2023)

Los vidrios monolíticos dejan pasar más del 80% del componente calorífico de la radiación solar, por lo que en un clima frío como Toluca ayudarán al calentamiento diurno de los espacios interiores y en un clima cálido como el de Mérida deben ser evitados porque producirán sobrecalentamiento al estar expuestos al sol. Los sistemas de acristalamiento tipo Duovent dejan pasar el 70% de la radiación comportándose de forma similar a los vidrios monolíticos, pero al tener un menor coeficiente de transferencia de calor (valor U) producirán espacios más cálidos día y noche que pueden ser idóneos para ubicaciones frías como Xalapa, Toluca o las partes más elevadas del Valle de México. Por otra parte, los sistemas de baja emisividad (Low-E) reducen hasta un 27% el calor por radiación solar, siendo idóneos para climas cálidos todo el año como Veracruz, Acapulco o Mérida.

Light Solar Gain (LSG)

Muchos fabricantes proponen evaluar el desempeño de los sistemas de acristalamiento usando el Coeficiente de Ganancia de Luz Solar que es un factor de relación entre la Transmisión de Luz Visible (VLT) y el Coeficiente de Ganancia de Calor Solar (SHGC), cuya fórmula es:

$$LSG=VLT/SHGC$$

El LSG entonces una relación entre la cantidad de luz natural que se transmite a través de un vidrio y la cantidad de energía que pasa a través de él.

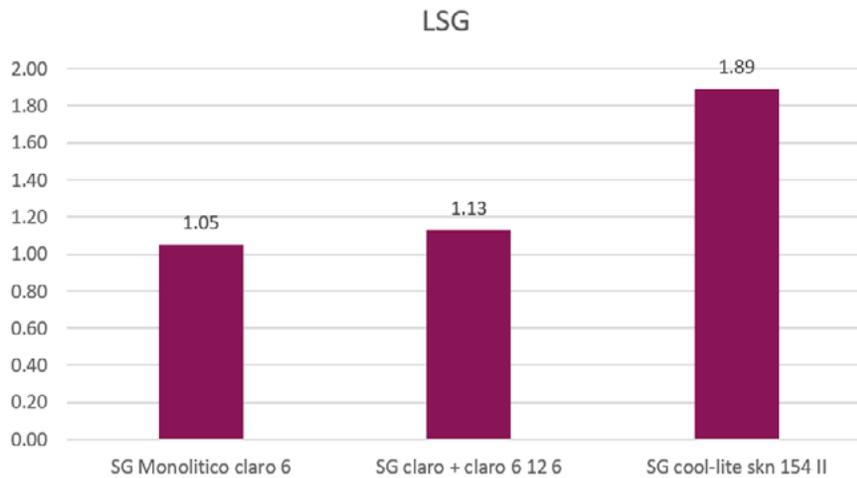


Figura 8. Ganancia de Luz Solar (LSG).

Fuente: Saint-Gobain (2023)

Podemos observar que los vidrios monolíticos y Duovent tienen un LSG muy similar, entre 1.05 y 1.13, mientras que el vidrio selectivo (Low-E) tiene un valor de 1.89.

En los climas cálidos todo el año mientras mayor sea este factor, el sistema de acristalamiento tendrá un mejor desempeño, ya que deja pasar más luz con menor ganancia de calor.

Sin embargo, para climas cálido secos extremos, con veranos muy calurosos e inviernos muy fríos este indicador no es tan significativo, ya que da mucha importancia a la reducción de la ganancia directa tanto en verano como en invierno.

Estimación del Comportamiento Térmico

Para comprobar el efecto del acristalamiento Duovent vs Low E en un espacio se seleccionó un área de oficina, realizando un análisis estático o estacionario de un día típico de mayo y de diciembre para un local de 6.9 x 6.9 m en la planta alta de un edificio con tres ventanas de 1.3m x 3.0m cada una.

Los cálculos sólo consideran las ganancias de calor por radiación y conducción, no se consideran las ganancias internas ni ventilación; por lo que se toma como un local hermético, sin aire acondicionado en un clima cálido; por lo que el comportamiento térmico se manifestará como incremento de la temperatura interior que es solamente indicativo para comparar el desempeño de los sistemas de acristalamiento.

Los muros interiores y el piso se consideran adiabáticos, por lo que no presentan cargas térmicas.

Se desarrolló un cálculo estacionario donde los muros están contruidos con block de cemento de 15 cm, aplanado de mortero por ambos lados y coeficientes superficiales en ambas caras.

La losa se ha calculado como una losa nervada acabada hacia el exterior con una capa de mortero y enladrillado, y hacia el interior una cámara de aire y un plafón de yeso, con sus correspondientes coeficientes superficiales.

Los valores de la conductividad de los materiales fueron tomados del Centro de Investigaciones en Energía de la UNAM y pueden diferir de los valores indicados en la NOM-008-ENER-2001

Estos datos se han conservado idénticos para los casos analizados, cambiando únicamente las características de transmisividad y conductividad de los vidrios. Se han comparado únicamente un sistema Duovent con dos vidrios de 6 mm separados por 12mm de aire seco y un sistema Low E con la misma conformación, pero donde uno de los vidrios tiene aplicado un recubrimiento selectivo. Los resultados de este cálculo son los siguientes para los meses de mayo y diciembre:

Desempeño térmico en la Esquina Sur-Oeste del edificio

Se simuló un espacio de las dimensiones y características anteriormente descritas ubicado en la esquina suroeste de un edificio en la Ciudad de Mérida. El espacio tiene tres ventanas de 1.3m x 3m cada una. Una está orientada al sur y las otras dos al poniente. Con los siguientes resultados:

Tabla 3. Cálculo estático sin ventilación del caso de estudio.

Fuente: Elaboración propia

Mayo	sin sombra	al 50%	Diferencia %
<u>Duovent</u>	66.6 °C	54.7 °C	82.1%
Low-E	53.0 °C	44.9 °C	84.7%
diferencia en grados	13.6 °C	9.8 °C	
Diferencia en %	79.6%	82.1%	

Diciembre	sin sombra	al 50%	Diferencia %
<u>Duovent</u>	68.2 °C	52.6 °C	77.1%
Low-E	49.6 °C	43.3 °C	87.3%
diferencia en grados	18.6 °C	9.3 °C	
Diferencia en %	72.7%	82.3%	

Se observa que, en todos los casos, el sombreado en ventanas tiene un efecto en la reducción de la temperatura. El 50% de sombreado solo se está proponiendo en las ventanas por lo que los muros y losas reciben la misma cantidad de radiación en todos los casos. Esto ocasiona que en la oficina analizada la temperatura disminuya solamente entre el 18% y el 20% entre los espacios sin sombreado y aquellos con 50% de sombra en las ventanas.

La reducción de temperatura interior entre el sistema Duovent y el sistema Low-E es entre el 20% y 27% en función de la época del año. Esta disminución se mantiene en ambos casos con y sin sombreado.

También podemos observar que en esta orientación la temperatura máxima se alcanza en diciembre con 68.2 °C con cristal Duovent sin sombra y la temperatura mínima corresponde a ese mismo mes con vidrio Low E sombreado al 50% con 43.3 °C. La diferencia de temperatura interior entre ambas condiciones es de 24.9 °C.

Comparación del desempeño térmico en dos orientaciones del mismo edificio

Los diferentes locales se comportarán de forma distinta en función de su orientación, dimensiones, área de ventanas y muros, nivel en que se encuentren y las ganancias internas de cada uno determinadas por los equipos, el nivel de ocupación, las actividades que se realicen, el uso de los sistemas de iluminación, etc.

En general, los locales que tendrán la menor carga térmica estarán ubicados en la fachada norte. Los espacios del cuarto nivel tienen la ganancia adicional de la azotea por lo que es importante aislarla térmicamente y con acabado de color claro.

Efectuamos otra simulación numérica con las mismas dimensiones, características constructivas y localización en la esquina noreste y comparamos los resultados con el cálculo anterior para el mes de mayo. Nuevamente el espacio tiene tres ventanas de 1.3 m x 3.0 m cada una. Una está orientada al norte y las otras dos al oriente. Para esta simulación únicamente se calculó el vidrio Low E.

Tabla 4. Comparación de temperaturas máximas del vidrio Low E en mayo.

Fuente: Elaboración propia

Mayo	sin sombra	al 50%	%
Noreste	43.0 °C	42.0 °C	97.7%
Suroeste	53.0 °C	44.9 °C	84.7%
diferencia en grados	10.0 °C	2.9 °C	
%	81.1%	93.5%	

Sin sombra, se observa una reducción de temperatura del 19% entre la esquina Noreste en comparación con la esquina Suroeste, debido a las diferencias de asoleamiento sobre en la fachada norte. Cuando se tiene sombreado la diferencia se reduce al 6.5%.

En la fachada noreste el efecto de sombreado de las ventanas es mínimo (2.3%), debido a que la porción al norte casi no recibe asoleamiento.

Análisis de Características y Costos

Finalmente, es necesario comparar los precios por metro cuadrado de los sistemas acristalamiento y dispositivos de sombreado. Para el análisis de costo de los sistemas de acristalamiento y dispositivos de sombreado es importante tomar en cuenta el precio unitario y sus características termo físicas.

De forma inicial se revisaron solamente tres sistemas: Monolítico de 10 mm, Claro + claro 6-12-6, Low E templado + claro y un sistema de sombreado a base de lámina perforada al 50%.

En noviembre del 2022, el precio unitario de un sistema de ventana de aluminio con vidrio monolítico claro de 10 mm es de \$2,800 pesos, el sistema claro + claro 6-12-6 es de \$4,400 pesos y el sistema Low E templado + claro es de \$4,650 pesos.

Todos los análisis indican que no es conveniente emplear vidrio monolítico, ya que aun cuando es el más económico y deja pasar más luz natural, no tiene características termofísicas compatibles con el clima cálido todo el año de ciudades como Mérida, Veracruz o Acapulco.

Como se puede observar en la Tabla 5, en la mayoría de sus parámetros termofísicos el Sistema Low-E es mejor que el sistema Duovent y el Monolítico Claro.

Tabla 5. Comparación de Características Termofísicas y Costos.

Fuente: Saint-Gobain (2023) y elaboración propia.

ANÁLISIS DE VIDRIOS ARQUITECTONICOS	Transmisión de Luz Visible	Coefficiente Global de Transferencia de Calor	Sun Heat Gain Coeficiente	Light Solar Gain	Precio
	VLT	U en W/m ² K	SHGC	LSG=VLT/SHGH	\$
Monolítico claro 6	88	5.91	0.86	1.05	\$2,800
Duovent claro 6,12,6	79	2.66	0.70	1.13	\$4,400
Low E SKN154	51	1.60	0.26	1.96	\$4,650

El sistema de ventana de vidrio monolítico de 6mm es el más económico. Los otros sistemas tienen incrementos es del 58% y 65% respecto al monolítico. La diferencia no es de más del 100% porque el precio del sistema de ventana incluye el vidrio, marco de aluminio y colocación, donde los costos de manguete y colocación son similares. Por otra parte, la diferencia de costo del sistema Duovent con el sistema Low E es pequeña (\$250 pesos/m²).

Finalmente, los dispositivos externos de control solar a base de lámina de aluminio de 2mm de espesor, troquelada y desplegada, con una superficie abierta del 50% y el sistema estructural secundario necesario para su colocación tiene un precio unitario de \$7,000 pesos/m² y un Coeficiente de Ganancia de Calor Solar de al menos 0.50. Por ello su desempeño que es inferior al sistema Low-E.

Conclusiones

Los valores de transmisión de luz visible (VLT) son más altos para el vidrio monolítico (88%) que el Duvent (79%) y Low-E (51%), por lo que desde un punto de vista de iluminación natural el primero es el más recomendable.

Sin embargo, los coeficientes Globales de Transferencia de Calor (valor U) y de Ganancia de Calor Solar (SHGC) son determinantes en el comportamiento térmico de la edificación en un clima cálido todo el año. Como lo analizamos, el efecto del valor U del sistema Low-E presenta una reducción de la Transferencia de Calor respecto a todos los casos.

Adicionalmente la reducción de la radiación incidente al interior es crítica. Esta se puede lograr con dispositivos de sombreado exterior o a través del Coeficiente de Ganancia de Calor Solar del Vidrio. En este caso el cristal claro monolítico deja pasar el 81% de la ganancia de calor solar, el sistema claro + claro 6-12-6 tiene un SHGC del 70%, mientras que el Low-E deja pasar solamente el 27%. Esta es una diferencia determinante en el proyecto con respecto al uso de dispositivos de control solar tipo malla que reducen el asoleamiento solamente en un 40% aproximadamente y son más costosos.

Si no se emplea el sistema de ventana adecuado al clima, lugar y orientación del proyecto los efectos negativos del acristalamiento como sobrecalentamiento o sobre enfriamiento, falta de calidad del aire interior, sobre exposición a la radiación directa, etc. pueden ser mayores que sus beneficios.

Referencias

Gonzalez Baez, C. (2022). Historia del Aire Acondicionado. Consultado el 19 sept 2023 en <http://elaireacondicionado.com/articulos/historia-del-aire-acondicionado>

Konigsberger H, Mahoney C. & Evans J. (1971). *Climate and House Design*. Ed United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Center for Housing, Building and Planning, USA

Lauret, B (2018). Evolución Histórica del Muro Cortina, Lucernarios y Vidrio Estructural. Ed. Universidad Politécnica de Madrid. España

Marsh, A. (2019). *Dynamic Daylighting Program*. Consultado en: <https://andrewmarsh.com/software/daylight-box-web/>

Plinius Secundus, G (79). *Natural History*. Enciclopedia Britannica consultada en <https://www.britannica.com/biography/Pliny-the-Elder>

Saint-Gobain Glass (2023). Catálogo de Vidrios Arquitectónicos. Consultado en: <https://mx.saint-gobain-glass.com/es-MX/product/>

UCLA Energy Design Group's Tool (2019). *Climate Consultant Program*. Consultado en <https://www.sbse.org/resources/climate-consultant>

World Health Organization (1988). *Indoor Air Quality, Biological Contaminants*. Ed WHO, Copenhagen, Denmark

La celosía tipo persiana de las ventanas tradicionales colimenses como un dispositivo de procuración de la privacidad, ventilación y protección solar

Alfonso Cabrera Macedo¹, Carlos Javier Esparza López¹, Jorge Armando Ojeda Sánchez¹, Camilo Caicedo Moncayo¹

¹ Profesor investigador de la Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima, Km. 9, Ctra. Colima-Coquimatlán, C.P. 28400, Coquimatlán, Colima, México
Correo: cabrera_macedo@ucol.mx

Resumen

Las ventanas de la arquitectura tradicional – convencional de Colima son parte de los componentes más característicos de la fisonomía urbana de los centros históricos del Estado. El presente documento analiza desde una perspectiva histórica los tipos esenciales que la arquitectura vernácula ofrece al acervo constructivo de esta provincia de México. La adaptación a condiciones climáticas, materiales y técnicas totalmente diferentes a las de su origen geográfico se describen desde un punto de vista cultural local.

El estudio de su función como un dispositivo que además de unir el campo visual del interior con el exterior de un espacio se complementa con el cometido de ser una fuente de iluminación y ventilación queda evidenciado en investigaciones bioclimáticas locales y regionales, pero existe un elemento que en la actualidad se encuentra en el ocaso de su presencia en las ventanas de Colima, la celosía, dispositivo que por la disposición de sus componentes permitía relativa visibilidad del interior al exterior, siendo nula la vista en sentido opuesto, fenómeno que se oponía a la radiación solar en un segmento de la ventana sin inhibir por completo el flujo del aire.

Palabras clave: Ventana, celosía, colima, arquitectura tradicional.

Abstract

The windows of the traditional – conventional architecture of Colima are part of the most characteristic components of the urban physiognomy of the historic centers of the State. This document analyzes from a historical perspective the essential types that vernacular architecture offers to the construction heritage of this province of Mexico. Adaptation to climatic conditions, materials, and techniques totally different from those of their geographical origin are described from a local cultural point of view.

The study of its function as a device that in addition to joining the visual field of the interior with the exterior of space is complemented by the task of being a source of lighting and ventilation is evidenced in local and regional bioclimatic research, but there is an element that is currently in the twilight of its presence in the windows of Colima, The wood lattice, a device that by the arrangement of its components allowed relative visibility from the interior to the outside, being null the view in the opposite direction, a phenomenon that opposed solar radiation in a segment of the window without completely inhibiting the flow of air.

Keywords: Window, lattice, colima, traditional architecture.

La arquitectura convencional Colimense concebida como la tradición constructiva procedente de cánones europeos.

La estética o fisonomía de la arquitectura histórica convencional en Colima es identificable por la austeridad en sus fachadas tanto interiores como exteriores, si estas se compararan con edificaciones correspondientes a las de otros estados de México que exteriorizan complejas configuraciones estilísticas de acuerdo con diversos estilos que la historia, técnicas, tecnología y tendencias que marcaron en su momento.

Exceptuando algunos casos, son pocos los elementos arquitectónicos identificables que una casa habitación decimonónica o de la primera mitad del siglo XX colimense muestra en sus alzados; algunos cornisamentos, pilastras en tres recurrentes órdenes y rodapiés, son el lenguaje con el que las construcciones nos comunican su momento estilístico en la historia. Aunado a estos atavíos, componentes con claros objetivos dirigidos a funcionalidad del inmueble conviven armónicamente en la composición de la edificación, las puertas y ventanas, que, en la mayoría de las ocasiones, son los únicos paramentos que una fachada ostenta.

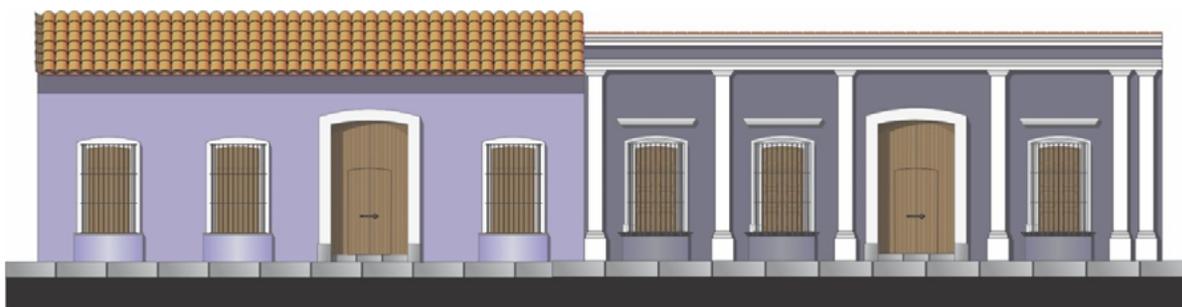


Figura 1. De izquierda a derecha, fachada histórica convencional colimense se configuración simple y alzado de conformación compleja.

La ventana es un instrumento de comunicación entre las condiciones del medio que rodean al objeto arquitectónico y el espacio habitable resultado de esta interacción. Dentro de esta relación. Las funciones de las que se habla son claras para este tipo de componentes, la primera en describirse es la comunicación visual, entendiendo la ventana como aquel componente que conecta el interior de un espacio con el exterior, este cometido deriva en las otras dos, que son la de ofertar la luz natural extrínseca y la de permitir la ventilación natural; esta última encomienda es aquella que hace suponer la vinculación de la palabra “viento” con el concepto de ventana en la mayoría de las lenguas derivadas del latín (Gómez, Alcántara y Alvarado, 2006).

Para el caso de las ventanas de la pequeña provincia, su vista hacia las calles se presentan como vanos que en su estética exteriorizan en sus flancos sencillas jambas llanas o molduradas tipo platabanda que soportan los empujes de un arco escarzano o un dintel, forjados en ladrillo o en piedra labrada, estos elementos se desplantan sobre un repisón ígneo o

de loseta de barro que corona una consola curva; es posible que en las proximidades a los Centros Históricos se logre encontrar ventanas con un cornisuelo como protector de factores climáticos.

Como elemento de seguridad, incidiendo de forma inherente en la morfología de la ventana colimense, se encuentra la protección de acero, básicamente compuesta por la disposición consecutiva de varillas lisas o redondas de media pulgada colocadas a cada 10 o 12 cm de separación entre sus ejes, sujetas por soleras cuya curva responde a la periferia de la consola de la ventana, fungiendo como la estructura que prende este sistema seriado y que culmina en sus extremos anclándose al muro, justo en las jambas o a unos cuantos centímetros de los costados de ellas.

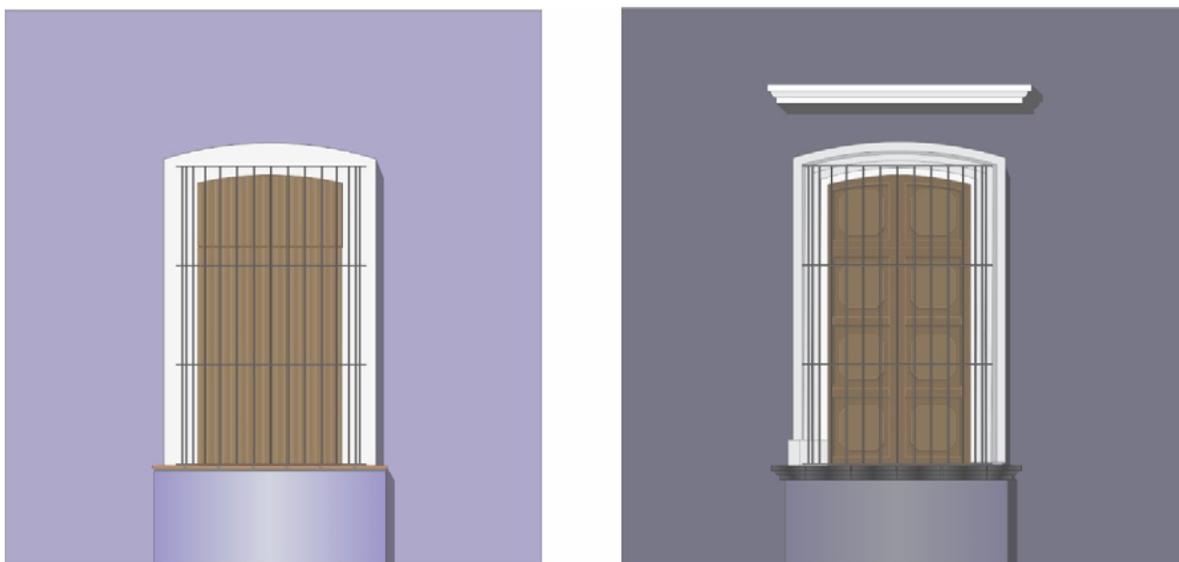


Figura 2. Ventanas colimenses con la misma proporción y escala, pero diferentes elementos compositivos ornamentales y de función.

Al interior de las habitaciones, las ventanas presentan una contextura totalmente diferente. Sus jambas y cerramientos se cambian por boquillas en una concepción de bocina, que de forma oblicua; amplía su escala y proporción hacia adentro del espacio, mientras que, su repisón incide a paño de muro interior de forma ortogonal.

La anterior descripción de las ventanas del Centro Histórico de Colima y de igual manera, con el de su vecino en conurbación, Villa de Álvarez, aunque limitada, puede generar una idea en la que, la tipología constructiva que la herencia europea marcó para estos elementos arquitectónicos es similar a la mayoría de otros centros históricos del Estado y el occidente del país, con variantes mínimas reflejadas en proporciones, materiales, sistemas y tradiciones propias de cada lugar. Estas genealogías de los vanos evolucionan en su configuración y conforme las construcciones se alejan del primer cuadro de los centros históricos, marcan un catálogo en el que la cronología y las tendencias estilísticas insertas en ella se encausan en concepciones de elementos convencionales de la arquitectura del siglo XIX, hasta los que

la modernidad con sus nuevas nociones constructivas y estéticas marcaron, tales como: la horizontalidad de sus vanos y la reducción en su área de vacío, aunado a los cerramientos adintelados que se construyeron de concreto armado (Gómez, Alcántara, 2015).

“Asumidos los atributos constantes del lugar, clima y materiales -que condicionan las respuestas ‘vernáculos’-, se suman a ellos la presencia de disímiles fenómenos sociales, económicos y culturales que, en sus recíprocas influencias, decantan una imagen compleja de la configuración del ambiente urbano y rural. Los extremos se unen, articulan y complementan sin abandonar el eje rector de la identidad cultural de la sociedad que los genera” (Segre, 2003).

La función bioclimática de la ventana colimense

La verticalidad de estos dispositivos de ventilación en proporción mayoritariamente de 2:1, hace suponer que se permite optimizar el flujo del viento a diversas temperaturas por efectos de su densidad. El análisis de ventilación está asociado a la distribución de temperatura, debido a la radiación solar incidente, que en el Estado es un recurso abundante. Resultado de esta interacción a diferentes temperaturas, es el efecto de expulsar por la parte superior el aire con mayor temperatura, consecuencia que es ayudada por la aceleración del flujo que puede provocar el abocinamiento de las jambas de la misma ventana, que al paño interior del muro de la habitación se abren a una mayor dimensión, en comparación del paño exterior que reduce su escala. La anterior aserción popular fue sometida a un estudio realizado por Adolfo Gómez y Armando Alcántara (2015) donde se midieron las diferentes celeridades del viento en los tercios superior, medio e inferior de las ventanas en cuestión. Los resultados mostraron un mayor promedio de velocidad del viento en el tercio inferior con 58% más que en el tercio superior y 29% mayor que el tercio central. El análisis implica que el aire con menor temperatura está fluyendo con mayor velocidad, respecto al ubicado en la parte superior del vano, con una presumible temperatura mayor.

Además, los materiales constructivos de los muros de dichas casas céntricas proporcionaban una masa térmica e impedían la ganancia térmica por medio de los muros, brindando condiciones internas adecuadas para el desarrollo de actividades. Dada esta interacción, el desarrollo de la ventana colimense fue permitir la ventilación que cruza hacia el espacio interior, permitiendo una distribución adecuada considerando las diferentes configuraciones de ventilación cruzada, como en el caso de la casa colimense de patio central interior (Toris et al., 2017).

En las zonas geográficas donde, de acuerdo a la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García (2004), el clima se considera dentro de la categorización AW, cálido subhúmedo con lluvias en verano, como en Colima, las construcciones se adaptaron de acuerdo con su partido y elementos primigenios de forma indeliberada a los requerimientos que sus factores climáticos exigían, tales como la adecuada circulación de corrientes de aire, sinónimo

de buena ventilación, de vital importancia, al igual que la protección contra las inclemencias meteorológicas extremas o cuestiones consideradas básicas como la incidencia solar.

Como se mencionó anteriormente, una de las principales funciones de la ventana fue la de proveer de ventilación natural al interior de los espacios refrescando las condiciones interiores además de permitir mejorar las situaciones de higiene. Sin embargo, el acto de abrirse al exterior conllevaba la problemática de permitir la incidencia solar en el interior, elevando la temperatura y generando condiciones incómodas para los habitantes. Por ello, el diseño de protecciones solares en las ventanas fue fundamental para responder a las premisas de permitir la ventilación bloqueando la radiación solar.

Las protecciones solares mencionadas se destinaron principalmente a la carpintería, cubriendo el vano, de forma abatible, la ventana convencional de Colima goza de cuatro hojas de madera, sus bastidores estructurales son de gruesos barrotes o polines que se cubren por un enduelado machimbrado sólo por la vista que mira hacia la calle o el exterior de la habitación. Su abatimiento responde al giro que las bisagras de acero en forja ubicadas en los costados de las ventanas permiten, hasta topar con las boquillas internas. La disposición de las cuatro hojas ubica dos segmentos de proporción cuadrada conocidos como postigo, ubicadas sobre las otras dos, cuya altura responde a la medida restante para cubrir el vacío.

La carpintería de ventana colimense se conforma por una estructura apeinazada desarrollada por cuatro armazones de gruesos polines o peinazos de madera. Los vanos entre dichos bastidores se cubren con duela machimbrada de ancho y espesor variable dispuesta de forma vertical, esta se coloca sólo por la parte externa de los armazones, aquellos con vista al exterior. De forma paralela, otra forma para cubrir las mencionadas estructuras de madera eran los llamados cuarterones, decoración de forma principalmente rectangular sobre tablas que se sujetan por el canto interno de los peinazos. Estos diseños de estructuras proceden de la ventana castellana y se caracterizan por no tener vidrios lo que representaba que al estar cerradas las hojas bajas de la ventana para tener privacidad al interior de la estancia, sólo quedaba la iluminación que facilitaba el par de postigos superiores.

Todo el sistema de carpintería de la ventana, está colocada hacia el paño exterior del muro, de manera que deja al interior un amplio espacio que alojará las hojas de las ventanas o postigos fácilmente en las boquillas abocinadas del muro, es decir, la luz que salvan estas hojas equivale por lo general al doble del ancho del muro, y al abrir, éstas no sobrepasan el espesor del muro. En la parte inferior de la ventana, hablando exclusivamente del interior del espacio, era posible encontrar un poyo o banco que permite el estar sentado de forma perpendicular al sentido o eje de la ventana.

Entre esta estructura apeinazada y la herrería de protección a la ventana, en muchas viviendas de los centros históricos de Colima y Villa de Álvarez, se colocaban celosías de madera tipo persiana. Es en España, donde el concepto de las celosías en ventanales procede; en la Baja Andalucía fue muy popular en las últimas etapas de la Edad Media (Abellán, J. 1999). La procedencia oriental de estos elementos es indudable: desde la Andalucía hispanomusulmana hasta la India y Nepal, incluyendo los antiguos territorios otomanos y árabes, se

La celosía tipo persiana de las ventanas tradicionales colimenses como un dispositivo de procuración de la privacidad, ventilación y protección solar

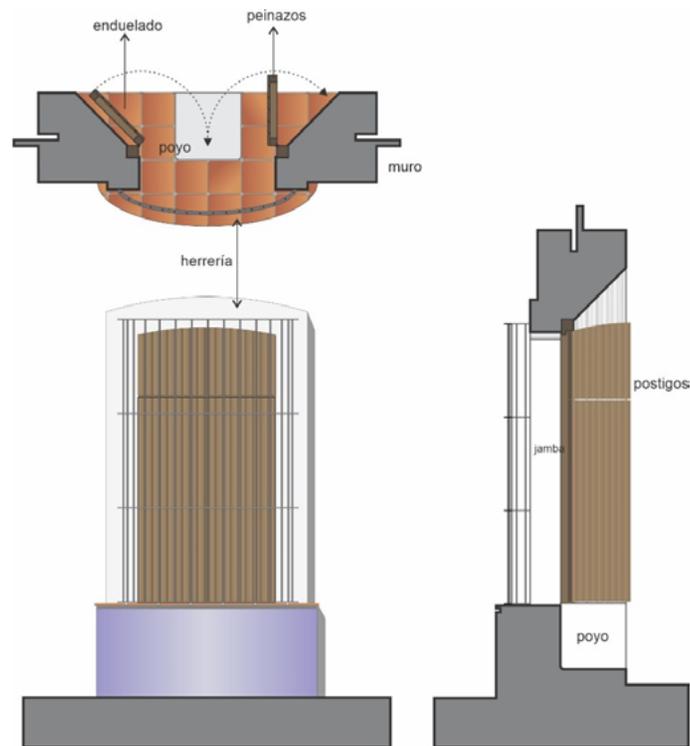


Figura 3. Segmento de la planta, alzado y corte de una ventana convencional colimense.

encuentran mucharabillas o balcones cerrados con celosías (Gil, I, 2012). El uso de estos dispositivos garantiza las tres funciones básicas de las ventanas a pesar de permanecer fijo sobre los vanos: vista, iluminación y ventilación.

La herencia cultural hacia algunos estados de México se retoma en su nuevo emplazamiento y adquiere propiedades propias del lugar en que se asienta, es decir, se 'vernaculariza', adoptando el color y textura de las maderas regionales, así como los acabados y detalles de los carpinteros oriundos de la región hasta adoptar una representación propia y cualidades adaptadas a las necesidades de los usuarios. La adaptación de este sistema se enfrentó tanto a las inclemencias meteorológicas de un clima mediterráneo seco con veranos muy calurosos e inviernos suaves (Junta de Andalucía, s.f.), como al clima de Colima que presenta un clima cálido húmedo en el que las diferencias estacionales son casi imperceptibles aportaron exigencias de diseño que determinaron la adaptación de su proporción, disposición y forma.

Por lo anterior, estas celosías-persianas deberían de poseer cualidades para regular la entrada de luz al espacio habitacional, permear aire y reducir la violencia de los fenómenos meteorológicos, como serían la lluvia y vientos de velocidad considerable, así como también, remplazar a los elementos costosos y de difícil acceso en la época decimonónica para Colima, tales como el vidrio.

Las bondades de la celosía proliferaron su uso en las ventanas de las fachadas de las calles principales, razón por la que prevalecieron por un largo periodo de tiempo sin evolucionar formando parte de la tradición arquitectónica que se ha ido diluyendo hasta nuestros días, al grado que son escasos los ejemplos que aún pueden apreciarse en las construcciones propias de la época.

Las celosías colocadas tras la herrería de las ventanas de Colima y Villa de Álvarez se presentan estructuradas por dos bastidores considerablemente más esbeltos que los que ostentan las estructuras apeinazada de las hojas y postigos enduelados o de cuarterones que antes se han descrito. Suelen presentar un antepecho en su remate superior, su diseño consta de delgadas soleras de madera llamadas lamas, dispuestas horizontalmente formando un ángulo de 45 grados con la estructura en la cual se soportan. Su ancho, corresponde al mismo de las hojas de cierre de la ventana, pero su altura no cubre la altura total del vano, sino que equivale al de las hojas inferiores, dejando libre el espacio correspondiente de los postigos, de esta forma, las cuatro hojas abatibles sujetas por bisagras al marco. La celosía o «ventanas de miradas escondidas», como las nombraba el artista de las islas Canarias César Manrique (1974), asienten que las hojas estén abiertas de par en par, mientras estas, per-

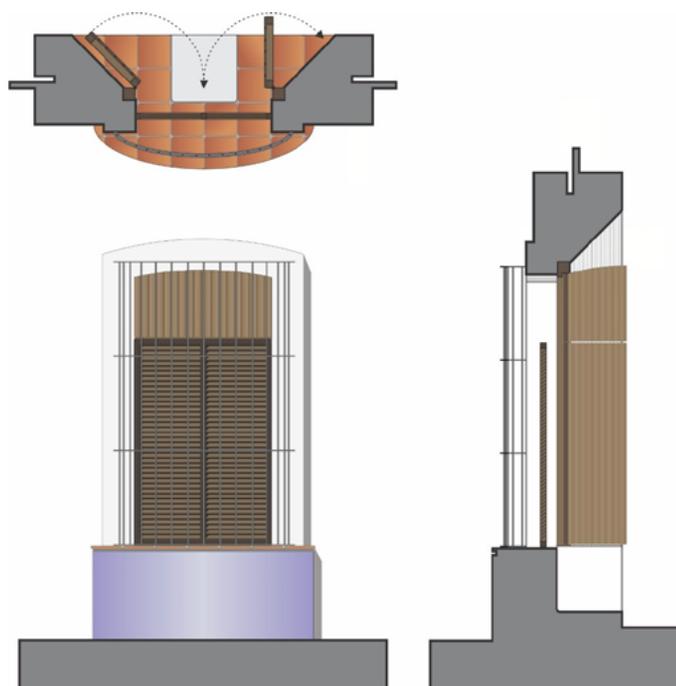


Figura 4. Segmento de la planta, alzado y corte de una ventana convencional colimense con celosía tipo persiana entre la herrería y postigos.

manecen cerradas, permitiendo hasta cierto punto la ventilación, la iluminación y la vista de adentro del espacio hacia la calle, pero, impidiendo la vista del exterior hacia el interior de la habitación por medio de sus lamas colocadas a 45°.

Las celosías, además de ser un dispositivo utilizado para ver y no ser visto, un inhibidor de la radiación solar y un permisivo medio de flujo de viento, puede proteger acústicamente los espacios al reducir el ruido del ambiente del contexto urbano y al ser un elemento ubicado entre las jambas de la ventana, funciona como un componente delimitador, entre el espacio interno y el externo, que al ser tangible y opaco protege y sin que este sea su objetivo, decora de forma dual, es decir su apariencia reticular, de sistemático orden a la vista, proporciona una perspectiva agradable para el usuario y para el transeúnte.

Conclusiones

Las ventanas en la arquitectura convencional colimense representa un ícono formal y de identidad que otorga gran parte de la composición estética a la fisonomía urbana de los centros históricos. Al ser significativamente austeras las fachadas en estos sitios de monumentos, las ventanas son el principal generador de ritmo y medida en los antiguos alzados de la arquitectura vernácula.

Los preceptos europeos que delineaban la forma de las ventanas y sugerían la conformación de sus componentes se adaptó de forma idónea al contexto natural del Estado, permitiendo refrescar el interior de las habitaciones y permitir seguridad a través de los resistentes materiales que sus postigos y herrerías presentan. Al añadir a estos componentes la celosía colocada en el alfeizar de las ventanas colimenses se concibe un elemento que sirve para protector, aislante, delimitante y de decoración para los diferentes espacios de una construcción decimonónica o de la primera mitad del siglo XX en Colima, utilizando conceptos de transparencia interrumpida, al mismo tiempo que deja entrar la luz y el aire de acuerdo a los conceptos de las celosías de Pich-Aguilera (2016).

La celosía de lamas en la arquitectura de la provincia de Colima puede ser considerada como una solución pasiva que oferta cierto grado de confort del usuario ante los efectos medioambientales, al actuar como un tamizador que controla las ganancias de temperatura y niveles de iluminación de las construcciones sin impedir la circulación del aire, por lo que su uso puede reivindicarse y poder ser reintegrado a las ventanas que aún prevalecen en los centros históricos de Colima y Villa de Álvarez.

Desde el punto de vista ornamental, además de su agradable configuración física, las transparencias logradas por el vacío entre cada lama de este dispositivo, conceden composiciones de luz en los espacios arquitectónicos, mobiliarios y decoraciones, efectos de la “tamización” de los rayos solares sobre las superficies interiores formando composiciones estéticas trazadas por el juego entre la filtración de la claridad a través del vacío y la sombra.

Referencias

Abellán Pérez, J. (1999). *Influencias orientales en las viviendas jerezanas (siglo XV): los ajimeces*. Aragón en la Edad Media, 14-15, 19-26. file:///C:/Users/DELL/Downloads/Dialnet-InfluenciasOrientalesEnLasViviendasJerezanasSigloX-108554.pdf

García, E. (2015) *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía de la Universidad Autónoma de México. 16 – 21

Gil Crespo, I.J. (2011a). Transferencia de elementos arquitectónicos entre España y el Nuevo Mundo: los balcones de madera de San Juan de Puerto Rico. Anuario de Estudios Atlánticos, núm. 57, pp. 646-688.

Gómez Amador, A. y Alcántara Lomelí, A. (2015) *Desempeño Ambiental comparado de la tradición constructiva de Colima*. Universidad de Colima.

Gómez Amador, A.; Alcántara Lomelí, A. y Alvarado Cabral, E. (2006). *La ventana en la tradición constructiva del trópico subhúmedo*. Palapa, 1 (1): 5-16.

Junta de Andalucía. (s.f.). Clima en Andalucía. <https://www.juntadeandalucia.es/temas/medio-ambiente/clima/clima-andalucia.html>

Manrique, C. (1988 [1974]). Lanzarote, arquitectura inédita. Arrecife: Cabildo de Lanzarote.

Pich-Aguilera, F.; Batlle, T. y Casaldàliga, P. (2016) *Concepción y realización de celosías cerámicas, una evolución constructiva*, Informes de la construcción, 68. 1-10. <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/5812>

Segre Prando, R. (2003) *Arquitectura antillana del siglo XX*. La Habana, Editorial Arte y Literatura. Extraído de: Periferia, Internet Resources for Architecture and Urban Design in the Caribbean. <https://es.scribd.com/document/468348873/Roberto-Segre-La-Arquitectura-Antillana-del-Siglo-XX#>

Toris, M. G., Gomez-Amador, A., & Ojeda, J. (2017). *The proportion of “zaguán” in thermal performance of traditional courtyard houses of Colima City, México. Proceedings of 33rd PLEA International Conference: Design to Thrive, PLEA 2017, 3(September 2020), 5140–5147.*

Herramienta de evaluación de materiales aislantes translúcidos para la envolvente arquitectónica

Sandra Paulina Bastida-Rojano¹, Mauro Germán Valdés-Barrón², Dolores Ana Flores-Sandoval³

1 Profesora investigadora de la Universidad Nacional Autónoma de México | Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Campo de Conocimiento Tecnologías | Correo: paulina_210495@comunidad.unam.mx

2 Profesor investigador de la Universidad Nacional Autónoma de México | Instituto de Geofísica, Radiación Solar | Correo: mauro@igeofisica.unam.mx

3 Profesora investigadora de la Universidad Nacional Autónoma de México | Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Campo de Conocimiento Tecnologías | Correo: ana_floressandoval@hotmail.com

Resumen

Actualmente, existe una gran variedad de materiales con el potencial de obtener un alto rendimiento energético y aprovechamiento de la luz natural, durante la etapa conceptual de un proyecto arquitectónico, que pueden ser adecuadas para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Los materiales aislantes translúcidos (TIM's, por sus siglas en inglés) transmiten menor energía térmica en comparación de un material convencional, sin comprometer la transmisión de la luz natural, por lo que son considerados como un panorama de oportunidad para disminuir el aumento de la demanda energética y a su vez, proveer confort térmico y lumínico en los usuarios. Este estudio propuso desarrollar una matriz de evaluación de TIM's para evaluar, interpretar e identificar el material con el mejor desempeño térmico y lumínico. Por lo tanto, se realizó una propuesta de indicadores de desempeño para evaluar diferentes materiales, así como su estimación de impacto (magnitud e importancia): propiedades físicas básicas de los materiales respecto a un superaislante y la calidad del ambiente térmico y lumínico interior respecto a rangos de confort durante el horario operativo de un edificio del sector comercial (centro comercial). La implementación de los diez indicadores fue suficiente para evaluar el desempeño de los materiales aplicados en cubiertas de centros comerciales y realizar una comparación entre ellos. Esta matriz de evaluación de TIM's permite guiar a diseñadores de la construcción y arquitectos para mejorar la eficiencia energética de la envolvente arquitectónica, pues el entendimiento y la selección adecuada de los materiales depende del conocimiento en el comportamiento de sus propiedades.

Palabras Clave: Materiales aislantes translúcidos, indicadores de desempeño, matriz de Leopold, herramienta de evaluación.

Abstract

Currently, there is a wide variety of materials with the potential to obtain high energy efficiency and to make the best use of daylight, during design development, which may be suitable for the Metropolitan Area of Mexico City (ZMCM, in Spanish). The translucent insulating materials (TIM's) send less thermal energy compared to a conventional material, without compromising the transmission of daylight, therefore, the TIM's are considered as an opportunity to reduce the rising energy demand and provide thermal and lighting comfort for users. This study proposed the development of a matrix evaluation of TIM's to evaluate, interpret and find the material with the best thermal and lighting performance. Therefore, a performance indicator for evaluate different materials was proposed and an estimate of their impact (magnitude and importance): basic physical properties of the materials with respect to a superinsulator and the quality of the thermal and interior lighting environment with respect to comfort ranges during the operating hours of a building in the commercial sector (shopping center). The implementation of the ten indicators was sufficient to evaluate the performance of the materials applied in shopping center roofs and make a comparison between them. This matrix evaluation helps to guide the construction designers and architects to improve the energy efficiency of the architectural envelope, since the understanding and proper choice of materials depends on the knowledge of their properties.

Introducción

En el área de materiales, los indicadores son datos e información que permite obtener un valor objetivo de las características y la intensidad de un material, con la finalidad de determinar la selección adecuada de los requerimientos particulares. Lechner (2015) señala la importancia de elegir el material de acristalamiento adecuado para un diseño de iluminación diurna exitosa. Wong, Eames y Perera (2007), Atawa, Al-Kattan y Elwan (2015), Dowson et al. (2011) y Orlov et al. (1998) mencionan que el entendimiento y la selección adecuada de los materiales, para una construcción en específico, depende del conocimiento de las propiedades térmicas y ópticas.

Papadopoulos (2005) propone cuatro criterios para evaluar el rendimiento de los materiales aislantes (ver Figura 1), el primero describe las propiedades físicas de los materiales propuestos, los cuales pueden tener certificaciones; el segundo analiza las propiedades que intervienen en la salud del ser humano y el medio ambiente; el tercero se refiere a la aplicación del material para la solución de problemas estructurales o su integración específica en la construcción; y el cuarto considera los costos en relación a los parámetros previos.

RENDIMIENTO DE LOS MATERIALES AISLANTES			
1. PROPIEDADES FÍSICAS		2. IMPACTO AMBIENTAL	
COMPORTAMIENTO	CERTIFICACIONES	MEDIO AMBIENTE	SALUD PÚBLICA
Describen el comportamiento del material, como: <ul style="list-style-type: none"> • densidad, • resistencia mecánica, • capacidad de aislamiento térmico, • absorción acústica, • resistencia a la humedad y al fuego, • entre otras. 	Normas específicas y directivas de aplicación internacional como: <ul style="list-style-type: none"> • EN ISO 6946, EN 13162, • EN 13163, EN 13164, • BS 476, 89/106 / EC, • entre otras. 	Describe criterios como: <ul style="list-style-type: none"> • energía primaria incorporada, • emisiones de gases durante su producción, • uso de aditivos contra impactos biológicos, • clasificación de residuo, • reutilización y reciclabilidad, • impacto ambiental. 	Factores que se ocupan de la salud pública (como emisiones de polvo y fibras, biopersistencia, toxicidad en caso de incendio, etc.), durante su: <ul style="list-style-type: none"> • producción, • etapa de uso, • etapa final de disposición del material.
3. APLICABILIDAD		4. COSTO	
Identificar la aplicabilidad del material en elementos de construcción y la solución de problemas estructurales.	Identificar los costos en función de los parámetros antes mencionados	CERTIFICACIONES	
		Normas basadas en el enfoque de Análisis del Ciclo de Vida: <ul style="list-style-type: none"> • ISO 14025-00 	

Figura 1. Criterios de evaluación para el rendimiento de los materiales aislantes.

Fuente: Elaboración propia a partir de Papadopoulos (2005).

Las propiedades físicas de un material varían según su aplicación, lo que determina el tipo de material que se debe utilizar. Cabe destacar que, las propiedades físicas es el indicador más empleado y el impacto ambiental es el menos utilizado, para evaluar el rendimiento de los materiales aislantes (Papadopoulos, 2005).

El desempeño de un material se refiere al cumplimiento de las funciones para las que fue diseñado dentro de parámetros técnicos, económicos y sociales, con base en la relación de sus propiedades, composición y estructura (desde la escala nano y micro), y el proceso de obtención (Vélez Restrepo & Jaramillo, 2014). Por lo tanto, es importante plantear los requisitos del proyecto (objetivos) para considerar los indicadores adecuados, proponer diversos materiales semejantes y comparar la evaluación entre cada uno.

Diversos autores mencionan los parámetros a considerar en el proceso de evaluación del desempeño térmico y lumínico para seleccionar el TIM adecuado y cumplir con los objetivos específicos de cada proyecto. Dowson (2011) menciona que se deben considerar materiales que combinan el valor U más bajo, el valor G y la transmisión más alta para minimizar la ganancia térmica sin bloquear la entrada de luz natural. Guillén, Muciño, Santa Ana y Verduzco (2018) señalan la relevancia de incorporar la difusividad térmica como unidad de análisis para la selección de materiales aislantes. Reim et al. (2005) establecen el coeficiente de transmitancia alto como un indicador para evaluar el desempeño lumínico de un TIM y combinan el valor U bajo como complemento de la evaluación. Por su parte, Saint-Gobain (2021) indica que la selección adecuada es uno de los factores que determinan el rendimiento de los vidrios, por la correspondiente evaluación de la transmisión lumínica y la cantidad de luz natural que ingresa al interior del espacio (factor solar).

Buratti y Moretti (2011) determinaron tres criterios (transmisión lumínica, factor solar y transmitancia térmica) para comparar el desempeño de TIM's y ventanas convencionales. Por lo tanto, los criterios de selección más empleados para el desempeño térmico y lumínico son: el valor U bajo, el valor G y la transmisión alta, para evaluar y comparar la ganancia térmica obtenida; y la iluminancia promedio, por la relación de la iluminancia disponible en el área de trabajo y la norma (Leslie et al., 2012).

Un factor importante en el proceso de evaluación, para analizar el comportamiento de un edificio de manera cuantitativa y cualitativa es determinar el periodo de medición respecto a la visión de cambio (tiempo), que se quiere observar de los parámetros establecidos. El periodo mínimo para conocer el rendimiento de los materiales en el sistema envolvente es de un ciclo climatológico (un año), pues se obtiene información de su comportamiento en las diferentes estaciones del año, como las condiciones de cielo, viento, temperatura, humedad, entre otros.

Esta investigación propone ayudar a los diseñadores de la construcción y arquitectos a elegir entre diferentes materiales aislantes translúcidos para aumentar la eficiencia energética de la envolvente arquitectónica durante la etapa conceptual del proyecto arquitectónico, a partir de indicadores de desempeño térmico y lumínico. Asimismo, este estudio desarrolla una matriz de método cualitativo para evaluar las propiedades físicas básicas de los materiales respecto a un superaislante y la calidad del ambiente térmico/ lumínico interior respecto a rangos de confort durante el horario operativo de una construcción.

Por lo anterior, la Figura 2 muestra el flujo de procesos para diseñar y elaborar una herramienta de evaluación de materiales. En la primera fase se identifican los indicadores de desempeño que influyen en un sistema envolvente y son alterados con la propuesta de diferentes opciones de materiales. En la segunda fase, se aplican las fórmulas matemáticas (estadística) de los indicadores para obtener los valores a partir de los resultados obtenidos de uno o varios métodos y sus respectivos valores de referencia. En la tercera fase, se obtienen los valores de impacto (magnitud y valoración) a partir de la comparación de los valores de indicadores y referencia. En la cuarta fase, se evalúan los materiales propuestos para

una cubierta de estructura curva en la matriz de Leopold (método cualitativo de causa-efecto). Finalmente, se desarrollan las conclusiones generales para interpretar e identificar el material con el mayor desempeño térmico y lumínico, por medio de la comparación de los puntajes finales.

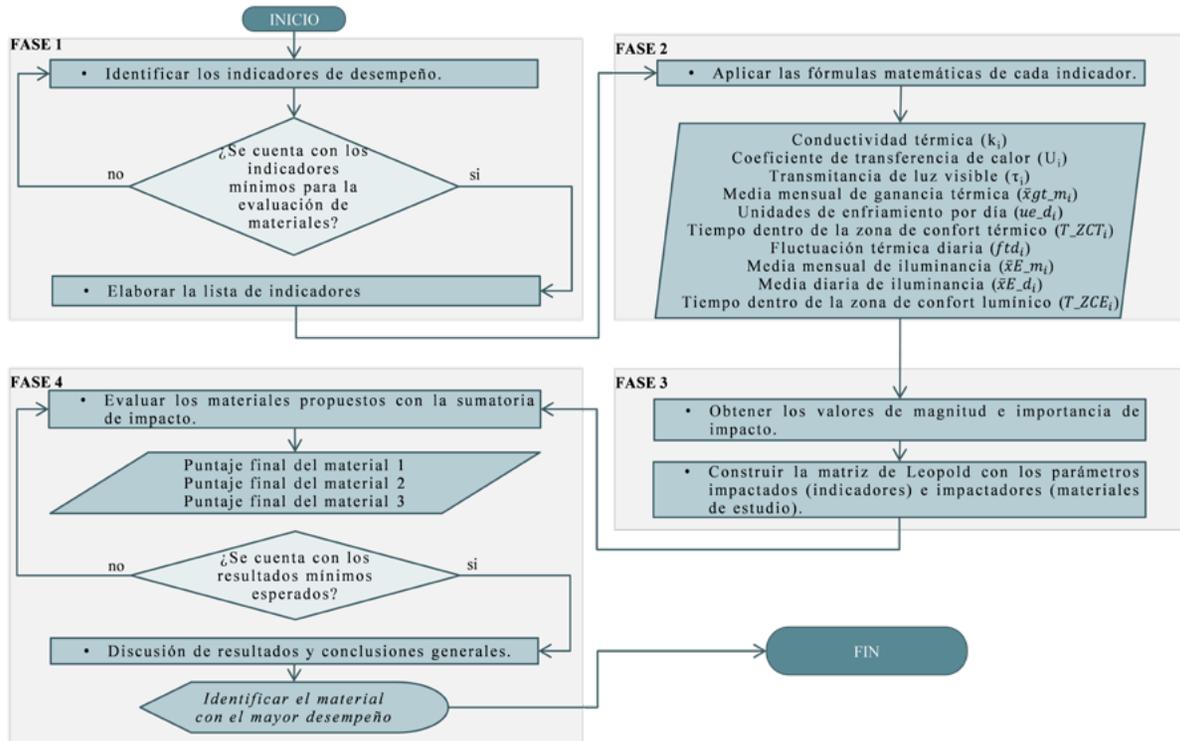


Figura 2. Diagrama de flujo de procesos para evaluar los materiales de estudio, a partir de la matriz de Leopold.

Fuente: Elaboración propia.

Desarrollo de la investigación

De acuerdo con lo anterior, los parámetros que influyen de manera significativa en el rendimiento del sistema envolvente son sus propiedades, los cuales responden al ambiente exterior, y estos afectan al ambiente interior. La propuesta de materiales para un elemento del sistema envolvente, como una cubierta translúcida, interviene en los parámetros anteriores. Por lo tanto, este estudio propuso implementar la matriz de Leopold (2016), un método cualitativo de causa-efecto, para evaluar el impacto de los materiales propuestos en un mismo espacio (cubierta translúcida) (ver Figura 3). Para ello, se implementaron indicadores que miden el desempeño térmico y lumínico de cada material propuesto, es decir, relacionar el rendimiento de cada uno respecto a los valores de una cubierta translúcida con eficiencia energética.

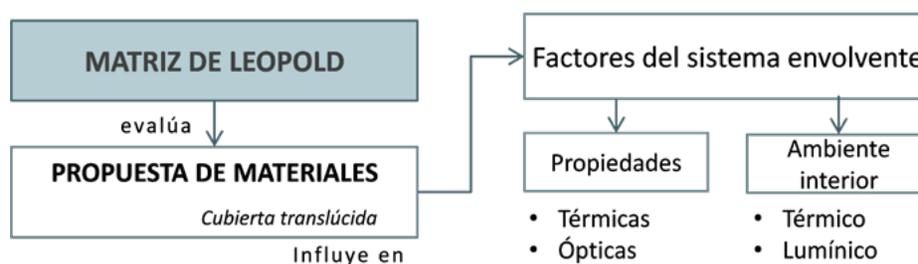


Figura 3. Interrelación de parámetros de evaluación.

Fuente: Elaboración propia a partir de Dellavedova (2016).

La matriz propuesta favorece las evaluaciones de diferentes materiales a partir de resultados objetivos y cuantificables con la entrada de datos de diferentes métodos, como son matemáticos, experimentales o simulaciones por computadora. En este estudio, la entrada de datos se obtuvo de un modelo experimental que mide la temperatura e iluminancia en el interior de tres módulos de prueba con diferentes materiales en la cubierta, como son el aerogel, el politetrafluoroetileno (PTFE) y el policloruro de vinilo (PVC). El periodo de medición del modelo experimental es de un ciclo climatológico (un año), se encuentra ubicado en la parte más elevada de una vivienda de dos niveles en la ZMCM y los módulos de prueba tienen una orientación norte-sur (Rojano & Barrón, 2022).

Identificación de indicadores de desempeño

Los indicadores de desempeño se dividen en tres categorías, los cuales miden el aspecto térmico y lumínico de un sistema envolvente para cada material propuesto. La primera categoría evalúa las propiedades físicas básicas de los materiales propuestos, como es la relación entre la conductividad térmica de un superaislante y el material; la relación entre el coeficiente de transferencia de calor de un superaislante y el material y la relación entre la transmisión de iluminancia de un superaislante y el material. La segunda categoría evalúa la calidad del ambiente térmico interior, cómo es el tiempo dentro de la zona de confort térmico durante el horario operativo; la cantidad de unidades de enfriamiento durante el horario operativo y la relación entre la fluctuación térmica diaria del módulo experimental y el óptimo. La última categoría evalúa la calidad del ambiente lumínico interior, como es el tiempo dentro de la zona de confort lumínico durante el horario operativo y el tiempo debajo de la zona de confort térmico durante el horario operativo.

Los valores de referencia son datos obtenidos de investigaciones previas que establecen condiciones térmicas, lumínicas u operativas, para el funcionamiento adecuado de un espacio o sistema envolvente de una construcción (ver Tabla 1). De acuerdo con Baetens (2013), Dowson et al. (2011), los materiales superaislantes (transparentes o translúcidos) tienen una conductividad térmica entre 0.004 y 0.014 W/m · °K, un valor U menor a 1 W/m² · K y una transmitancia de luz visible mayor al 50%. Los valores térmicos y lumínicos óptimos para un edificio de uso comercial son retomados de Auliciems (2007) y USGBC (2022). El horario operativo de referencia se obtiene a partir del horario que aparece con mayor frecuencia en

un conjunto de edificios comerciales, consultados de manera aleatoria. Los valores óptimos de fluctuación térmica diaria se definieron a partir del valor máximo de confort del mes correspondiente y la temperatura mínima promedio en el módulo de referencia (PVC), durante la temporada cálida (con 11 °C) y fría (con 6 °C).

Tabla 1. Valores de referencia para la obtención de valores de los indicadores.

	TEMPORADA CÁLIDA				TEMPORADA FRÍA			
	min	-	máx.	unidad	min	-	máx.	unidad
Conductividad térmica de un superaislante (k_{ref})	0.004	a	0.014	W/m · °K	0.004	a	0.014	W/m · °K
Coefficiente de transferencia de calor de un superaislante (U_{ref})		< 1		W/m ² · °K		< 1		W/m ² · °K
Transmitancia de luz visible (T_{ref})		> 50		%		> 50		%
Rango de confort térmico (ZCT)	22.00	a	27.00	°C	20.40	a	25.40	°C
Rango de confort lumínico (ZCE)	0.30	a	3.0	klx	0.30	a	3.0	klx
Cantidad de minutos durante el horario operativo (T_{oper})				600				min
Fluctuación térmica diaria (Min. de 11 °C y 6 °C a las 6 h) (ftd_{ref})	11.00	a	16.00	°C	14.40	a	19.40	°C

Fuente: Elaboración propia a partir de Auliciems y Szokolay (2007); Dowson et al. (2011); Baetens (2013); USGBC 2022 (2022).

A continuación, se describen los once indicadores de desempeño propuestos para los materiales de estudio, las fórmulas y unidades de medición. Las fórmulas determinan los valores de cada indicador, las cuales relacionan los datos obtenidos del modelo experimental (Rojano & Barrón, 2022) y las investigaciones previas que establecen condiciones térmicas y lumínicas adecuadas de un edificio de uso comercial (ver Tabla 1).

Conductividad térmica (k_j)

El indicador relaciona la conductividad térmica de los materiales de estudio y un superaislante. El valor del indicador para cada material se obtiene de la fórmula (Ec .1), en [W/m · °K] (Yunus A. & Afshin J., 2015, p. 19).

$$(Ec. 1) \quad k_{ref} - k_m$$

donde

k_{ref} conductividad térmica de un material superaislante (ver Tabla 1),

k_m conductividad térmica del material de estudio (proporcionado por el proveedor).

Coefficiente de transferencia de calor (valor U_j)

El indicador relaciona el valor U de los materiales de estudio y un superaislante. El valor del indicador se obtiene de la fórmula (Ec .2), en [W/m² · °K] (Morales Ramírez, 2019, p. 73).

$$(Ec. 2) \quad U_{ref} = \frac{1}{\left(\frac{1}{he} + \frac{e^n}{k^n} + \frac{1}{hi}\right)}$$

donde

U_{ref} coeficiente de transferencia de calor de un superaislante (ver Tabla 1),
 h_e coeficiente de convección del aire exterior en techos ($34.06 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$),
 h_i coeficiente de convección del aire interior en techos ($17.03 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}$),
 e espesor del material,
conductividad térmica.

Transmitancia de luz visible (T_v)

El indicador relaciona la transmitancia de luz visible (luz transmitida a través del material y la luz incidente) de los materiales de estudio y un superaislante. El valor del indicador para cada material se obtiene de la fórmula | (Ec .3), en [%] (Yunus A. & Afshin J., 2015, p. 736).

$$(Ec. 3) \quad \tau_{ref} = \frac{\tau_{int}}{\tau_{ext}}$$

donde

T_{ref} transmitancia de un superaislante (ver Tabla 1),
 T_{int} luz transmitida a través del material,
 T_{ext} luz incidente.

Tiempo promedio diario dentro de la zona de confort térmico (T_{ZCT})

El indicador se refiere al tiempo total dentro de la zona de confort térmico durante el día promedio de un mes (perteneciente al periodo de estudio), en el horario operativo del inmueble. El valor del indicador se obtiene de la fórmula (Ec .4), en [min] (Quintela del Río, 2019).

$$(Ec. 4) \quad \sum_{n \geq ZCT^{min}}^{n \leq ZCT^{max}} x_n$$

donde

n marca de tiempo en minutos,
 ZCT^{max} valor máximo del rango de confort térmico, correspondiente a la temporada del mes de estudio (ver Tabla 1),
 ZCT^{min} valor mínimo del rango de confort térmico, correspondiente a la temporada del mes de estudio (ver Tabla 1),
 X_n valor del intervalo en minutos

Tiempo dentro de la zona de confort térmico (T_{ZCT})

El indicador se refiere al tiempo total dentro de la zona de confort térmico durante el día de estudio (perteneciente al periodo de estudio), en el horario operativo del inmueble. El valor del indicador para cada material se obtiene de la fórmula (Ec .4), en [min] (Quintela del Río, 2019).

Unidades de enfriamiento (*ue_d*)

El indicador se refiere a la sumatoria de diferencias entre la media horaria de ganancia térmica interior y el valor máximo óptimo del día de estudio, durante el horario operativo. El valor del indicador para cada material se obtiene de la fórmula (Ec .5), en [°C] (Zeevaert Alcántara, 2020, p.113).

$$(Ec. 5) \quad \sum_{n \geq 11:00}^{n \leq 21:00} ZCT^{m\acute{a}x} - x$$

donde

n marca de tiempo en minutos, si es mayor o igual a 11 h/menor o igual a 21 h,

ZCT^{máx} valor máximo del rango de confort térmico, correspondiente a la temporada del día de estudio (ver Tabla 1),

X valor máximo óptimo de temperatura interior (en este caso, 24.4°C en Temp. cálida o 22.9°C en Temp. fría).

Fluctuación térmica diaria (*ftd*)

El indicador se refiere a la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima, registradas en el interior, durante un día de estudio. El valor del indicador para cada material se obtiene de la fórmula (Ec .6), en [°C] (García Villalobos, 2011, p. 103).

$$(Ec. 6) \quad T_{m\acute{a}x} - T_{min}$$

donde

T_{máx} temperatura máxima registrada en el interior durante el día de estudio,

T_{min} temperatura mínima registrada en el interior durante el día de estudio.

Tiempo promedio diario dentro de la zona de confort lumínico (**T_ZCE_i**)

El indicador se refiere al tiempo total dentro de la zona de confort lumínico durante el día promedio de un mes (perteneciente al periodo de estudio), en el horario operativo del inmueble. El valor del indicador se obtiene de la fórmula (Ec .7), en [min] (Quintela del Río, 2019).

$$(Ec. 7) \quad \sum_{n \geq ZCE^{min}}^{n \leq ZCE^{m\acute{a}x}} x_n$$

donde

n marca de tiempo en minutos,

ZCE^{máx} valor máximo del rango de confort lumínico, correspondiente a la temporada del mes de estudio (ver Tabla 1),

ZCE^{min} valor mínimo del rango de confort lumínico, correspondiente a la temporada del mes de estudio (ver Tabla 1),

X_n valor del intervalo en minutos.

Tiempo dentro de la zona de confort lumínico (T_ZCE_i)

El indicador se refiere al tiempo total dentro de la zona de confort térmico durante el día de estudio (perteneciente al periodo de estudio), en el horario operativo. El valor del indicador para cada material se obtiene de la fórmula (Ec .7), en [min] (Quintela del Río, 2019).

Tiempo promedio diario debajo de la zona de confort lumínico (T_ZCE_i)

El indicador se refiere al tiempo total debajo de la zona de confort lumínico durante el día promedio de un mes (perteneciente al periodo de estudio), en el horario operativo. El valor del indicador se obtiene de la fórmula (Ec .8), en [min] (Quintela del Río, 2019).

(Ec. 8)

donde $\sum_{n < ZCE^{min}} x_n$

n iluminancia interior registrada cada minuto durante el día promedio del mes de estudio, ZCE^{min} valor mínimo del rango de confort lumínico, correspondiente a la temporada del mes de estudio (ver Tabla 1),

X_n valor del intervalo en minutos.

Tiempo debajo de la zona de confort lumínico (T_DZCE_i)

El indicador se refiere al tiempo total debajo de la zona de confort lumínico durante el día de estudio (perteneciente al periodo de estudio), en el horario operativo. El valor del indicador para cada material se obtiene de la fórmula (Ec .8), en [min] (Quintela del Río, 2019).

2.2 Estimación de los valores de impacto

De acuerdo con Dellavedova (2016), la matriz de Leopold permite evaluar el impacto de los materiales de estudio en cada indicador de desempeño, es decir, la intensidad de la alteración producida y se determina a partir de la magnitud e importancia. La magnitud (M) es una estimación objetiva que se mide en una escala ascendente de 1 a 10, antecedido de un signo + o -, si el impacto es positivo o negativo. La importancia (I) es una estimación subjetiva y se mide en una escala ascendente de 1 a 10.

La Tabla 2 muestra las fórmulas para obtener los valores de magnitud de impacto en cada indicador, los cuales se determinan de dos maneras: la regla de proporcionalidad y la diferencia de valores. La magnitud de k_i , U_i , τ_i , ue_{di} , T_{ZCTi} , $_{ZCTi}$, $_{ZCEi}$ y $_{DZCEi}$, se obtiene de la regla de proporcionalidad. El valor comparativo, para k_i y U_i , es el indicador con el mayor resultado; para τ_i , es el valor de τ_{ref} ; para ue_{di} , T_{ZCTi} , $_{ZCTi}$ y $_{ZCEi}$, es el valor T_{oper} y para T_{DZCE_i} , es la referencia T_{oper} (con signo negativo), los cuales tienen un valor de 10. La magnitud de $ftdi$ se obtiene de la diferencia de valores, es decir, la diferencia entre la ftd_{ref} y el valor del material, dividido entre 2.

Tabla 2. Valores de referencia para la obtención de valores de los indicadores.

MÉTRICA		FÓRMULA
GRUPO A	Conductividad térmica (k)	$(K_m \times 10) / K_{m\max}$
	Coefficiente de transferencia de calor (valor U)	$(Valor U_m \times 10) / Valor U_{m\max}$
	Transmitancia de luz visible (τ)	$(\tau_m \times 10) / \tau_{ref}$
GRUPO B	Tiempo promedio diario dentro de la zona de confort térmico (T_{ZCT_i})	$(\bar{T}_{ZCT_m} \times 10) / T_{oper}$
	Tiempo dentro de la zona de confort térmico (T_{ZCT_i})	$(T_{ZCT_m} \times 10) / T_{oper}$
	Unidades de enfriamiento (ue_{d_i})	$(ue_{d_m} \times 10) / T_{oper}$
	Fluctuación térmica diaria (ftd_i)	$(ftd_{ref} - ftd_m) / 2$
GRUPO C	Tiempo promedio diario dentro de la zona de confort lumínico (T_{ZCE_i})	$(\bar{T}_{ZCE_m} \times 10) / T_{oper}$
	Tiempo dentro de la zona de confort lumínico (T_{ZCE_i})	$(T_{ZCE_m} \times 10) / T_{oper}$
	Tiempo promedio diario debajo de la zona de confort lumínico (T_{DZCE_i})	$-(\bar{T}_{DZCE_m} \times 10) / T_{oper}$
	Tiempo debajo de la zona de confort lumínico (T_{DZCE_i})	$-(T_{DZCE_m} \times 10) / T_{oper}$

Fuente: Elaboración propia.

La importancia del impacto se determina a partir de tres criterios. El primero considera la intensidad (IN); el segundo, la extensión (EX) y el tercero, la relación causa-efecto (EF). La importancia del impacto de cada indicador se calcula con la ecuación (Ec. 9), a partir de la escala de medición de la Tabla 3.

(Ec. 9)

$$I = (IN + EX + EF) / 2$$

donde

- I importancia del impacto,
- IN intensidad del impacto,
- EX extensión del impacto,
- EF efecto del impacto.

Tabla 3. Escala de medición para la importancia del impacto.

INTENSIDAD (IN)	Baja	1	Representa una modificación mínima del indicador considerado.
	Media	2	Provoca alteraciones en algunos de los indicadores.
	Alta	4	
	Muy alta	8	
	Total	10	Provoca una modificación casi total del indicador.
EXTENSIÓN (EX)	Puntual	1	Produce un efecto localizado.
	Parcial	2	Tiene una incidencia apreciable en el indicador.
	Extenso	4	Se detecta de manera general en el indicador.
	Total	6	
CAUSA-EFECTO (EF)	Indirecto	1	Supone una incidencia de un indicador con otro.
	Directo	4	Incide de manera inmediata en el indicador.

Fuente: Elaboración propia a partir de Dellavedova (2016).

La matriz de Leopold realiza un análisis numérico del impacto de los materiales en cada indicador. La sumatoria (Σ) de las filas, en el análisis de magnitud, permite identificar los indicadores más afectados por los materiales; mientras que, la Σ de las columnas permite identificar el material de estudio con el mayor impacto negativo (valores negativos) o positivo

(valores positivos) en los factores del sistema envolvente. La Σ de las filas y columnas, en el análisis de importancia, permite clasificar el efecto de los materiales en cada indicador, por medio del porcentaje total:

Tabla 4. Clasificación de la importancia de impacto.

CONCEPTO	ESCALA	DESCRIPCIÓN
CO	< 25 %	El efecto del impacto es irrelevante o compatible.
M	≥ 25 y < 50 %;	El efecto del impacto es moderado.
S	≥ 50 y < 75 %	El efecto del impacto es severo.
C	≥ 75 %.	El efecto del impacto es crítico.

Fuente: Elaboración propia a partir de Dellavedova (2016).

Aplicación de la matriz de evaluación de materiales

Como siguiente etapa, se propone identificar el desempeño de los materiales en un tipo de estado de cielo (bóveda celeste completamente obstruido por nubes (nublado)) para la temporada cálida y fría (abril y diciembre, respectivamente). El objetivo es comparar el rendimiento del aerogel, el PTFE (materiales no convencionales) y el PVC (material convencional) en módulos de prueba con cubiertas de estructura curva.

El modelo experimental se ubicó en la azotea de una vivienda con dos niveles, ubicada en la Plazuela 5 de Avenida de las 3 Culturas, con las coordenadas 19.481488 N, 99.032190 W, a una altitud de 2,236 msnm (ICACC y DGRU 2009). Los modelos experimentales tienen una orientación norte-sur, con dimensiones exteriores de 60x70x63 cm (ancho, largo y alto), por lo que presentan las mismas condiciones ambientales y arquitectónicas (Rojano & Barrón, 2022). Las constantes que se utilizaron para el análisis del desempeño térmico y lumínico son los rangos de confort térmico mensuales, los niveles de iluminancia óptimos y el horario promedio de servicio de un centro comercial (11:00 a 21:00 h) (ver Tabla 1).

Resultados y discusión

De acuerdo con la matriz de evaluación de materiales aislantes translúcidos, el aerogel es el material con el mejor desempeño que los materiales restantes, en la sumatoria del grupo A (propiedades físicas de la cubierta). El material causó el menor impacto negativo en los indicadores del grupo A, con una magnitud de -20 y un efecto crítico del 77 %. El indicador "conductividad térmica" tiene el menor impacto negativo y efecto crítico, con un valor de -1; mientras que, en la "transmitancia en la temporada cálida" ocurre lo contrario, con un valor de -8. El desempeño de la membrana de aerogel es 25 % mejor que el PVC y 22 % mejor que el PTFE (ver Tabla 5, Grupo A).

El aerogel es el material con el mejor desempeño que los materiales restantes, en la sumatoria del grupo B (condiciones térmicas del espacio interior). El material causó el menor impacto negativo en los indicadores del grupo B, con una magnitud de 2 y un efecto crítico del 86 %. El "tiempo promedio diario dentro de la ZCT" y el "tiempo dentro de la zona de confort térmico" (inciso a) son los indicadores con el mayor impacto positivo y efecto crítico, con un

Herramienta de evaluación de materiales aislantes translúcidos para la envolvente arquitectónica

valor de 2; mientras que, en la “fluctuación térmica diaria” (inciso b) el impacto es negativo, con un valor de -5. El desempeño del aerogel es 5 % mejor que el PTFE y 4 % mejor que el PVC (ver Tabla 5, Grupo B).

El PTFE es el material con el mejor desempeño que los materiales restantes, en la sumatoria del grupo C (condiciones lumínicas del espacio interior). El material causó el mayor impacto positivo en los indicadores del grupo C, con una magnitud de 7 y un efecto crítico del 83 %. El “tiempo promedio diario dentro de la ZCE” Y “tiempo dentro de la ZCE” (inciso b) son los indicadores con el mayor impacto positivo y efecto crítico, con un valor de 3; mientras que, en el “tiempo promedio diario debajo de la ZCE” y “tiempo debajo de la ZCE” (inciso b) el impacto es negativo, con un valor de -2. El desempeño del PTFE es 3 % mejor que el aerogel; mientras que, la magnitud del impacto es semejante con el PVC, pero su importancia de impacto es 3 % mejor (ver Tabla 5, Grupo C).

Tabla 5. Matriz de evaluación de materiales aislantes translúcidos para cubiertas translúcidas.

MATERIALES PROPUESTOS			TIM's no convencionales				IMPACTO TOTAL DE LOS TIM's		Material convencional		IMPACTO FINAL	
			Aerogel		PTFE		PVC		PVC			
CONDICIÓN INTERIOR			M	I	M	I	M	I	M	I	M	I
GRUPO A	A.1 Propiedades térmicas	a) conductividad térmica (k)	-1	10	-10	6	-11	16	-7	7	-18	23
		b) valor U	-4	9	-10	6	-14	15	-10	6	-24	21
	A.2 Propiedades ópticas	a) transmitancia (τ) en temporada cálida	-8	6	-3	9	-11	15	-6	6	-17	21
		b) transmitancia (τ) en temporada fría	7	6	-6	9	13	15	7	6	20	21
TOTAL (PROPIEDADES)			-20	31	-29	30	-49	61	-30	25	-79	86
Porcentajes (%)			-50%	77%	-72%	75%	-61%	76%	-75%	62%	-66%	72%
GRUPO B	B1. Tiempo promedio diario dentro de la ZCI (T_{ZCI})	a) abril	2	9	2	9	4	17	2	9	6	26
		b) diciembre	1	9	1	9	2	17	1	9	3	26
	B2. Tiempo dentro de la zona de confort térmico (T_{ZCT})	a) temporada cálida en CN	2	9	2	9	4	17	2	9	6	26
		b) temporada fría en CN	1	9	1	9	2	17	1	9	4	26
	B3. Unidades de enfriamiento (ue _{dj})	a) temporada cálida en CN	2	5	1	5	3	9	1	5	4	14
		b) temporada fría en CN	1	6	-1	6	0	11	-1	8	0	19
	B4. Fluctuación térmica diaria (ftdi)	a) temporada cálida en CN	-2	5	-4	6	-6	10	-3	6	-9	16
		b) temporada fría en CN	-5	8	-5	8	-10	15	-5	8	-15	23
TOTAL (CONDICIÓN TÉRMICA)			2	69	-3	61	-1	113	-2	63	-1	176
Porcentajes (%)			3%	86%	-4%	76%	-1%	71%	-3%	79%	-1%	73%
GRUPO C	C1. Tiempo promedio diario dentro de la ZCE (T_{ZCE})	a) abril	4	9	2	9	6	18	2	9	8	27
		b) diciembre	2	9	3	9	5	18	3	9	8	27
	C2. Tiempo dentro de la ZCE (T_{ZCE})	a) temporada cálida en CN	3	9	2	9	6	18	3	9	8	27
		b) temporada fría en CN	3	9	3	9	6	18	3	9	9	27
	C3. Tiempo promedio diario debajo de la ZCE (T_{DZCE})	a) abril	-1	8	-1	6	-2	13	-1	6	-3	19
		b) diciembre	-3	8	-2	8	-5	15	-2	8	-7	23
	C4. Tiempo debajo de la ZCE (T_{DZCE})	a) temporada cálida en CN	-1	8	2	8	1	15	1	6	2	21
		b) temporada fría en CN	-2	8	-2	8	-4	15	-2	8	-6	23
TOTAL (CONDICIÓN LUMÍNICA)			5	68	7	66	13	130	7	64	19	194
Porcentajes (%)			6%	85%	9%	83%	16%	81%	9%	80%	8%	81%
TOTAL (FACTORES DEL SISTEMA ENVOLVENTE)			-13	168	-25	157	37	304	-25	152	-61	456

Fuente: Elaboración propia.

El aerogel es el material con el menor impacto negativo que los demás materiales, en la sumatoria de los factores del sistema envolvente. El material ocasionó el menor impacto negativo en el sistema envolvente, con una magnitud total de -13 y un efecto severo del 84 %. El “tiempo promedio diario dentro de la ZCE” (inciso a) es el indicador con el mayor impacto positivo y efecto crítico, con un valor de 4; mientras que, en la “fluctuación térmica diaria” (inciso b), el impacto es negativo y de efecto crítico, con un valor de -5. El desempeño de la membrana de aerogel es 6 % mejor que el PVC y PTFE (ver Tabla 5, TOTAL FACTORES DEL SISTEMA ENVOLVENTE).

Simbología: CN=cielo nublado

Cabe destacar que la herramienta de evaluación de materiales aislantes translúcidos es una herramienta de evaluación para la toma de decisiones durante la etapa conceptual del diseño. Esto permite que el arquitecto compare el desempeño térmico y lumínico de diferentes materiales con el mismo objetivo, para obtener el mayor aprovechamiento de luz natural, condiciones térmicas y lumínicas dentro de los valores de referencia y alto rendimiento energético en las cubiertas de edificios de uso comercial en la ZMCM, durante el horario operativo.

Conclusiones

En esta etapa de desarrollo, los indicadores de desempeño fueron suficientes para evaluar el desempeño térmico y lumínico de los materiales y realizar una comparación entre ellos. Los indicadores permitieron relacionar los datos obtenidos de la caracterización del comportamiento térmico y lumínico de cada material (provenientes del modelo experimental) con los valores óptimos obtenidos de la literatura.

De acuerdo con los resultados de la matriz de decisión, las condiciones térmicas y lumínicas en el interior de los módulos con aerogel y PTFE (materiales no convencionales) no mostraron mejoras considerables respecto al módulo con PVC (elemento convencional). El desempeño térmico del módulo con aerogel es semejante al del módulo con PVC; mientras que, en el desempeño lumínico, el módulo con PVC es 3 % mejor que en el módulo con aerogel. Sin embargo, el trabajo está incompleto debido a la falta de parámetros de evaluación (como el desgaste, costos, impacto ambiental, entre otros) y no es concluyente por la falta de evaluaciones en diferentes épocas del año y tipos de condiciones de cielo (como en un cielo despejado, parcialmente nublado y nublado).

Para mejorar la matriz de evaluación de materiales aislantes translúcidos, se propone complementar la evaluación con parámetros de costos, el ambiente interior (como el aspecto acústico, calidad de aire, higrotérmico e iluminación), propiedades físicas del sistema envolvente (como la densidad, resistencia mecánica, valor G, absorción acústica, entre otros.) y su impacto en el ambiente y la salud pública, es decir, parámetros cualitativos y cuantitativos.

Referencias y Bibliografía

Atawa H, M., Al-Kattan, A., & Elwan, A. (2015). *Research Article Towards Nano Architecture: Nanomaterial in Architecture - a Review of Functions and Applications. International Journal of Recent Scientific Research*, 6(4), 3551–3564. <http://www.recentscientific.com>

Auliciems, A., & Szokolay, S. V. (2007). *Thermal Comfort. In S. V. Szokolay (Ed.), Design Tools and Techniques (2nd ed.). PLEA (Passive and Low Energy Architecture International) NOTE 3.*

Baetens, R. (2013). *High performance thermal insulation materials for buildings. In F. Pacheco-Torgal, M. V Diamanti, A. Nazari, & C.-G. Granqvist (Eds.), Nanotechnology in Eco-Efficient Construction (pp. 188–206). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857098832.2.188>*

Buratti, C., & Moretti, E. (2011). *Transparent insulating materials for buildings energy saving: experimental results and performance evaluation. Third International Conference on Applied Energy*, 1421–1432.

Dellavedova, M. G. (2016). *Guía Metodológica Para La Elaboración De Una Evaluación De Impacto Ambiental. In Programa de Investigaciones del Taller No. 17 (1st ed.).*

Dowson, M., Harrison, D., Craig, S., & Gill, Z. (2011). *Improving the thermal performance of single-glazed windows using translucent granular aerogel. International Journal of Sustainable Engineering*, 4(3), 266–280. <https://doi.org/10.1080/19397038.2011.558931>

García Villalobos, I. (2011). *La vegetación como sistema térmico en la naturación extensiva de cubiertas. [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2012/enero/0676168/Index.html>*

Guillén Guillén, C. A., Muciño Vélez, A., Santa Ana Lozada, P., & Verduzco Chirino, G. (2018). *Análisis de las propiedades térmicas del Arundo Donax (carrizo) y Zea Mays (caña maíz) para su uso como material aislante de cubiertas. Academia XXII*, 9(18), 90. <https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2018.18.67947>

ICACC (Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático), & DGRU (Dirección General de Repositorios Universitarios). (2009). *Atlas Climático Digital de México. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx:8080/ACDM/ser-vmapas>*

Lechner, N. (2015). *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects (4th ed.). John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. <https://www.wiley.com/en-mx/9781118582428>*

Leslie, R., Radetsky, L., & Smith, A. (2012). *Conceptual design metrics for daylighting. Lighting Research & Technology*, 44(3), 277–290. <https://doi.org/10.1177/1477153511423076>

Morales Ramírez, J. D. (2019). *Proyecto arquitectónico de máxima eficiencia energética (J. M. Márquez Corona (ed.); 1st ed.). Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.librosoa.unam.mx/handle/123456789/2995>*

Orlov, D. L., Chesnokov, A. G., Gorin, A. E., & Emel'yanova, O. A. (1998). *Problems of energy efficient glazing. Glass and Ceramics*, 55(1-2), 3-7. <https://doi.org/10.1007/BF03180134>

Papadopoulos, A. M. (2005). *State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. Energy and Buildings*, 37(1), 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.006>

Quintela del Río, A. (2019). *Estadística Básica Edulcorada*. bookdown. <https://bookdown.org/aquintela/EBE/>

Reim, M., Körner, W., Manara, J., Korder, S., Arduini-Schuster, M., Ebert, H.-P., & Fricke, J. (2005). *Silica aerogel granulate material for thermal insulation and daylighting. Solar Energy*, 79(2), 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.08.032>

Rojano, S. P. B., & Barrón, M. G. V. (2022). Evaluación de materiales translúcidos para techos en centros comerciales. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 10(Especial2 SE-Artículos de investigación). <https://doi.org/10.29057/icbi.v10iEspecial2.8701>

Saint-Gobain. (2021). *Lo Esencial en vidrio para fachadas*. Saint-Gobain Building Glass. <https://www.saint-gobain-glass.es/es/lo-esencial-en-vidrio>

USGBC (U.S. Green Building Council). (2022). *EQ Credit: Daylight. In LEED v4.1 Building Design and Construction (pp. 249-252)*. USGBC. <https://www.usgbc.org/credits/new-construction-schools-new-construction-retail-new-construction-data-centers-new-2?view=language&return=/credits/New Construction/v4.1>

Vélez Restrepo, J. M., & Jaramillo, J. M. (2014). Contribuciones de la capacitación en el área de materiales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(25), 65-80. <https://doi.org/10.22395/rium.v13n25a5>

Wong, I. L., Eames, P. C., & Perera, R. S. (2007). *A review of transparent insulation systems and the evaluation of payback period for building applications. Solar Energy*, 81(9), 1058-1071. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.004>

Yunus A., C., & Afshin J., G. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications (5th ed.)*. McGraw-Hill Education.

Zeevaert Alcántara, L. B. (2020). *Interacción del medio ambiente y la envolvente arquitectónica*. Apuntes.

Análisis térmico de un prototipo de vivienda de interés social en un clima cálido subhúmedo

**Carlos Fernando Arias Martínez¹, Jennifer Guadalupe Jiménez Anzar²,
Jonathan Camilo Christian Mauricio Caicedo Moncayo³, Jorge
Armando Ojeda Sánchez⁴, Carlos Javier Esparza López⁵**

1 Profesor investigador de la Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima, Maestría en Arquitectura Bioclimática

Correo: carias0@uclm.mx

2 Profesora investigadora de la Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima, Maestría en Arquitectura Bioclimática

Correo: jennifer_jimenez@uclm.mx

3 Profesor investigador de la Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima, Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura

Correo: jcaicedo0@uclm.mx

4 Profesor investigador de la Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima

Correo: jojeda1@uclm.mx

5 Profesor investigador de la Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima

Correo: cesparza@uclm.mx

Resumen

En el presente trabajo se realiza un análisis térmico de un prototipo de vivienda de interés social localizado en la ciudad de Villa de Álvarez, Colima, donde predomina un clima cálido subhúmedo. Las estrategias bioclimáticas recomendadas para este tipo de clima es la ventilación natural cruzada, protecciones solares y evitar las ganancias de calor en superficies de la edificación. El análisis realizado se compone por la medición de las condiciones exteriores e interiores (temperatura de bulbo seco, porcentaje de humedad relativa y radiación solar) del prototipo de vivienda y simulación térmica mediante Design Builder. Las variables climáticas exteriores se midieron mediante una micro estación metereológica, mientras que las condiciones interiores de temperatura y humedad relativa, se realizaron con sensores tipo data logger. Los espacios interiores monitorizados fueron la sala, comedor, cocina. La simulación de la casa habitación se realizó incorporando las propiedades físicas de los sistemas constructivos, así como el uso de un archivo climático del lugar. Finalmente, se define un día representativo, en el que se realiza un análisis de las condiciones ambientales interiores y exteriores, con el fin de validar y evaluar la simulación numérica en Design Builder.

Palabras clave: Casa-habitación, evaluación, ventilación natural, protecciones solares.

Abstract

In the present work, a thermal analysis is carried out of a prototype of social housing located in Villa de Álvarez, Colima, where a warm subhumid climate predominates. The bioclimatic strategies recommended for this type of climate are natural cross ventilation, solar protection, and avoiding heat gains on building surfaces. The analysis measures the exterior and interior conditions (dry bulb temperature, percentage of relative humidity, and solar radiation) of the housing prototype and thermal simulation using Design Builder. The outdoor climate variables were measured using a micro weather station, while the indoor temperature and relative humidity conditions were measured with data logger sensors. The interior spaces monitored were the living room, dining room, and kitchen. The house simulation was carried out incorporating the construction systems' physical properties and the use of a climatic file of the place. Finally, a representative day is defined, in which an indoor and outdoor environmental analysis is carried out to validate and evaluate the numerical simulation in Design Builder.

Keywords: Housing, evaluation, natural ventilation, solar protections

Introducción

En la actualidad el cambio climático es el suceso de variaciones globales de clima, es decir cambios a largo plazo de las temperaturas y patrones climáticos en la Tierra (Naciones Unidas, 2020). De acuerdo con el informe titulado “Cambio Climático 2021: Bases Físicas” el calentamiento global aumentará entre 1.5°C - 2°C dentro de los próximos 20 años, creando así, aumento de olas de calor, modificaciones en las estaciones del año, intensidad de precipitaciones, desastres naturales y escasez de alimentos (The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2021).

Esta problemática ya presenta sus estragos con el paso de los años; por ejemplo, en México se considera el año 2020 como uno de los tres más cálidos en la historia, donde se acontecieron anomalías de temperaturas de hasta 1°C por encima de la media de las normales climatológicas de los periodos 1981 - 2010. Así mismo, se superaron temperaturas máximas de 40°C a 44° en Oaxaca y mínimas de -6°C con -9.5°C en Sonora, por mencionar algunos (World Meteorological Organization, WMO, 2020).

El cambio climático es producto de la contaminación ambiental proveniente de diferentes actividades realizadas por la sociedad, tales como la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas), así como la demanda energética de actividades económicas como transporte, industrial, residencial, agropecuario y comerciales; generando así emisiones de gases de efecto invernadero.

Los vínculos establecidos entre los factores del medio ambiente, recursos naturales y consumo energético depende estrictamente del acelerado crecimiento demográfico, ya que este influye de manera directa a los índices de contaminación ambiental debido a las tecnologías empleadas para explotación y consumo de recursos naturales, producción de alimentos, uso de energía así como la producción de gases de efecto invernadero derivados de las acciones humanas para la satisfacción de las necesidades.

El crecimiento poblacional se considera uno de los principales desafíos globales que se presentan hoy en día; producido por el aumento de habitantes en edad reproductiva e incrementando gradualmente de la población mundial. Alcanzando así, el 15 de noviembre de 2022 los 8000 millones de personas, siendo tres veces mayor que a mediados del siglo XX e incrementando 10000 millones de habitantes en tan solo doce años (Naciones Unidas, 2022).

El principal problema a enfrentar debido al aumento poblacional, es la necesidad de acrecentamiento de procesos de urbanización, recursos ambientales, consumo energético y contaminación ambiental provocada por los humanos en la busca de satisfacer sus necesidades básicas de desarrollo.

De acuerdo a los datos obtenidos en el Censo de Población y Vivienda 2020, México se encuentra en el lugar onceavo de las naciones más pobladas del mundo, con un total de 126, 014, 024 millones de habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI, 2022). Por lo tanto, ante el acelerado incremento poblacional y falta de planeación demo-

gráfica del país, se han intensificado las carencias de la población mexicana en los aspectos económicos, servicios y asentamientos no planificados por parte de los precaristas urbanos; logrando de esa manera, desigualdad y marginación entre los habitantes.

Ante la problemática de adquisición de vivienda en México y crecimiento poblacional, surgió la iniciativa de edificaciones de viviendas de interés social, las cuales se clasifican en el Código de Edificación de la Vivienda de acuerdo al valor económico en UMAS (Unidad de Medida de Actualización) y superficie de construcción. Por lo tanto, se considera vivienda de interés social aquella que tiene una superficie construida total de 40 - 71 m², un valor de 188 hasta 350 UMAS y los espacios de sala - comedor, cocina, hasta dos recámaras y cochera para un auto.

Tabla 1. Clasificación de casa habitación en México por precio y m² construidos.

Datos	Económica	Popular	Tradicional	Media	Residencial	Residencial plus
Superficie construida (m ²)	40	50	71	102	156	Más de 188
Unidad de Medida de Actualización (UMA)	Hasta 188	De 118.10 a 200	De 200.10 a 350	De 350.10 a 750	De 750.10 a 1500	Mayor de 1500.10

Fuente: elaboración propia.

Nota: Clasificación de casa habitación en México por precio y m² construidos de acuerdo al Código de Edificación de la Vivienda 2017. Tomada de SEDATU & CONAVI (2017)

Se define como vivienda “un espacio delimitado por paredes y techos de cualquier material, se construye para que las personas vivan ahí duerman, preparen alimentos, los consuman y se protejan del medio ambiente” (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2022). Los datos obtenidos en el último Censo de Población y Vivienda 2020, estima que en el país existen 35, 219, 141 millones de viviendas particulares habitadas, donde el 92% de estas es partir de muros estructurales de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto, el 4% de adobe, 3% de madera y el 1% de materiales diversos como lámina, carrizo, bambú, palma o bajareque.

Se considera la vivienda como un medio de aspiración para los mexicanos, siendo este un lugar seguro y digno destinado para desarrollar actividades cotidianas y vivencias familiares, sin embargo, en la actualidad, se relaciona con vínculos económicos, políticos y ambientales, los cuales afectan el acceso de la vivienda digna como un derecho humano básico.

El acceso a la vivienda digna fue registrado como derecho en la Declaración Universal de Derechos Humanos de 1948 y en el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales de 1966; refiriéndose a este como el derecho de tener un hogar donde todo hombre, mujer, joven y niño pueda vivir en seguridad, paz y dignidad (ONU Habitat, 2009).

Una vivienda digna es aquella que cumple ciertos criterios sin poner en riesgo la satisfacción de las necesidades básicas del usuario, siendo los siguientes a cumplir: seguridad de

tenencia, disponibilidad de servicios, materiales, diseño con instalaciones e infraestructura de calidad, asequibilidad económica, habitabilidad, accesibilidad a servicios básicos complementarios y funcionales, ubicación segura cerca de espacios públicos comunes y áreas verdes, así como una adecuación cultural de acuerdo al usuario (ONU Habitat, 2009).

Sin embargo, en la realidad estos criterios no se presentan en su totalidad en la vivienda de interés social en México, donde aproximadamente 14 millones de viviendas no poseen los criterios de vivienda digna debido a la escasez de recursos económicos (García, 2018). El salario mínimo del presente año 2023 en el país es de 312 pesos diarios (9,360 pesos mensuales) en la zona de libre de la frontera con Estados Unidos, mientras que, en el resto del país, el salario mínimo es de 207 pesos diarios (6,210 pesos mensuales). En perspectiva este salario es repartido entre las necesidades básicas tales como hipoteca o renta, alimentación, servicios básicos y recreación del usuario, así como en algunas ocasiones de la familia entera.

Por lo tanto, podemos decir que en la vivienda se relaciona otra problemática importante como resultado del rezago económico: la pobreza energética. Se define como pobreza energética a la incapacidad económica en los hogares de acceso a servicios energéticos limpios, asequibles y confiables (Jaime, 2021). Afectando de esa manera, la eficiencia para mantener las necesidades básicas para el bienestar de los usuarios, impactando en aspectos de confort térmico, reducción del pago de otros servicios, malas condiciones de habitabilidad, así como deficiencia alimentaria por falta de recursos económicos (de Buen, Odón; Morales, Norma; Navarrete, 2022).

De acuerdo al índice multidimensional denominado “Pobreza energética en el hogar” propuesto por Garcia-Ochoa & Graizbord (2016), la pobreza energética se basa en la carencia de satisfacción de las siguientes necesidades: iluminación, entretenimiento, calentamiento de agua, cocción de alimentos, refrigeración de alimentos y confort térmico en la vivienda.

Se estima el uso de energía en el confort térmico al emplear electricidad o gas para generar condiciones de calor o frío (dependiendo el caso), mediante el uso de dispositivos como ventiladores, unidades de aire acondicionado, enfriadores evaporativos, calefactores o bombas de calor; siendo estos localizados en elementos constructivos dentro de la vivienda (de Buen, Odón; Morales, Norma; Navarrete, 2022).

Sin embargo, el confort térmico en la vivienda de interés social queda rezagado debido a la falta de recursos económicos para su solvencia, así mismo, se genera demanda de consumo energéticos por parte de la población que tiene el acceso a estos. Por lo tanto, la principal solución a dichas problemáticas es la aplicación y diseño de la ventilación natural en la vivienda, ya que esta es considerada un parámetro de diseño sostenible que permite las reducciones de consumo energético generadas por sistemas activos de climatización.

En el proceso de la concepción arquitectónica se debe de considerar el parámetro de la ventilación natural, ya que esta estrategia pasiva de diseño permite las renovaciones de aire en el interior del espacio a partir de las diferencias de temperatura y densidad, permitiendo las reducciones de consumo energético y mantener condiciones de confort (Aflaki et al., 2015).

No obstante, la concepción arquitectónica queda a cargo de los desarrollos habitacionales, donde estos son construidos con descontrol gracias a la demanda de vivienda de interés social debido al crecimiento poblacional, por lo tanto, los aspectos de estrategias de ventilación natural y su eficiencia bioclimática quedan al margen, generando así, proyectos donde su principal importancia es el costo-beneficio y no las necesidades del usuario de acuerdo con el clima.

En la actualidad, la vivienda de interés social y la aplicación de sistemas pasivos de climatización (ventilación natural), radiación solar y ganancias térmicas han sido estudiadas y documentadas en diferentes artículos científicos; con el propósito de mejorar las condiciones de habitabilidad, consumo energético, mantener el confort térmico, así como la calidad de vida del usuario de acuerdo con las necesidades de climatización del lugar.

Entre los principales resultados encontrados, se menciona que controlar la velocidad del viento en los espacios interiores permite mantener las condiciones de confort mediante el diseño de ventanas, así como la aplicación de orientación y forma de estas de acuerdo a la dirección del flujo del aire exterior (Tamaskani Esfahankalateh et al., 2021).

En otros artículos se ha evidenciado que un diseño de ventanas adecuado permite un consumo energético controlado, rendimiento lumínico, mayores tasas de ventilación mediante las renovaciones de aire en el interior gracias a las diferencias de temperatura y densidad; sin embargo, también se involucran otros factores en su eficiencia, como la forma edificatoria, orientación y condiciones climáticas (Aflaki et al., 2015; Elghamry & Hassan, 2020).

En el aspecto de estrategias de control de ventilación natural, se han empleado sistemas horarios de apertura y cierre de ventanas de acuerdo a los rangos de confort térmico por horas durante el año en la vivienda de interés social, basado en las cuantificaciones de necesidades horarias de confort, calefacción y enfriamiento (Vázquez-Torres et al., 2021).

Por su parte, la radiación solar y estrategias de sombreado han tomado importancia en el estudio de la vivienda de interés social; donde generar sombras es una técnica que permite reducir las ganancias directas de radiación solar (Chetan et al., 2020). El sombreado producido por puertas, paredes y techos ayudan a reducir y evitar ganancias solares. Así mismo se ha registrado ganancias solares de 56% hasta 64% a través de la azotea en sitios intertropicales (Águilar et al., 2021).

Por lo anterior, resulta pertinente incorporar superficies de sombreado con un diseño razonado desde la conceptualización del diseño de viviendas, sobre todo en las edificaciones intertropicales para reducir las ganancias solares. El efecto de las altas temperaturas producidas por las ganancias de radiación solar se amplifica por los métodos constructivos típicos en México, en donde la inercia térmica y la conductividad térmica de los materiales usados (Aguilar et al., 2020). Esto se ve reflejado en el mayor uso de sistemas de refrigeración en viviendas, pues el 45% de las viviendas en zonas urbanas tienen ventiladores, muy similar al 41% del uso de estos aparatos en zonas rurales INEGI (2018).

Es por eso que el sombreado es recomendado como una estrategia pasiva para disminuir las ganancias de calor en el material de construcción (Barbota et al., 2017). De esta forma,

reduce el consumo de energía para remover dicha carga térmica en los espacios de las edificaciones, permitiendo el confort al interior de las viviendas. Al incorporar estrategias pasivas se logra generar construcciones sostenibles que respondan de forma correcta al clima local y las condiciones específicas del sitio resultando en un aumento en la comodidad y la salud de los usuarios, sin aumentar el consumo de energía. Esto se logra al reducir los flujos de temperaturas, mejorar las condiciones del aire interior y haciendo que los hogares sean más agradables para habitarlo, sin comprometer la generación de más gases de efecto invernadero.

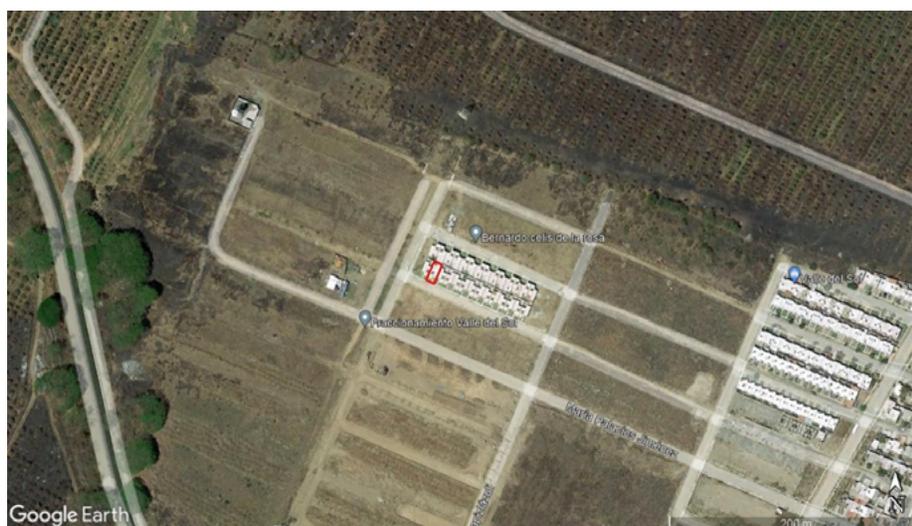
La generación de sombras en viviendas para reducir temperaturas se puede lograr a través de incluir alfareros, toldos en ventanas, persianas, pérgolas, plantas o dispositivos especiales en cubiertas (Barbota et al., 2017). Sin embargo, es necesario un buen diseño en estos dispositivos para bloquear el sol en las condiciones más esperadas, al considerar los ángulos del sol, el clima local y la orientación de la casa se pueden generar calor para maximizar el confort térmico.

Caso de estudio

El caso de estudio es un prototipo de vivienda de interés social ubicado en un fraccionamiento habitacional del municipio de Villa de Álvarez, Colima, específicamente en las coordenadas 19° 14' 37.07" latitud norte y 103° 46' 24.45" longitud oeste. La localización de la vivienda analizada en este caso de estudio se observa en la Figura 1.

Esta vivienda se localiza en una zona en proceso de construcción y expansión, conectando directamente con zonas urbanizadas de la periferia Colima - Villa de Álvarez; donde predomina directamente un clima cálido subhúmedo durante el año.

Figura 1. Localización de la vivienda de esta zona de estudio.



Fuente: elaboración propia basada en imágenes de Google Earth.

El partido arquitectónico se compone de un terreno de 6.50 metros de ancho por 16.00 metros de largo y una superficie total construida de 57.23 m², distribuidos de la siguiente manera: sala-comedor, cocina, baño completo, dos recámaras con closet, patio de servicio, jardín y cochera para un auto.



Figura 2. Interior de la zona sala - comedor - cocina del prototipo de vivienda.

Fuente: fotografía propia.

La fachada arquitectónica del prototipo consta de vanos en proporciones 1:1 ubicados en la esquina de la sala - comedor, así como en el centro de la envolvente arquitectónica de la recámara. El contexto inmediato se caracteriza por presentar colindancias de viviendas con el mismo tipo de prototipo, mientras que, en la parte posterior, se encuentra un predio en proceso de urbanización. La fachada principal de la vivienda se muestra en la Figura 3.



Tabla 3. Fachada principal de la vivienda de este caso de estudio.

Fuente: fotografía propia.

El sistema constructivo implementado fue a partir de cimentaciones de zapata corrida de 0.80 m de ancho, disposición de castillos a cada tres metros, así como en puertas y ventanas. La composición de los muros corresponde a una tipología de soga de 0.14 m de block asentado con mezcla y acabado común de enjarre de cemento - cal - arena de 0.02 m de espesor. De acuerdo a los requerimientos constructivos por parte del H. Ayuntamiento de Villa de Álvarez, Colima, se debe de implementar una junta constructiva de 0.025 m de poliestireno expandido.

La distribución de la vivienda se puede ver en la Figura 4 donde se muestra la planta arquitectónica. Se aprecia la zona donde se instaló el equipo de monitor de temperaturas, entre los ejes de B y F, así como ejes 4 y 5, que comprende el área de la sala-comedor y cocina.

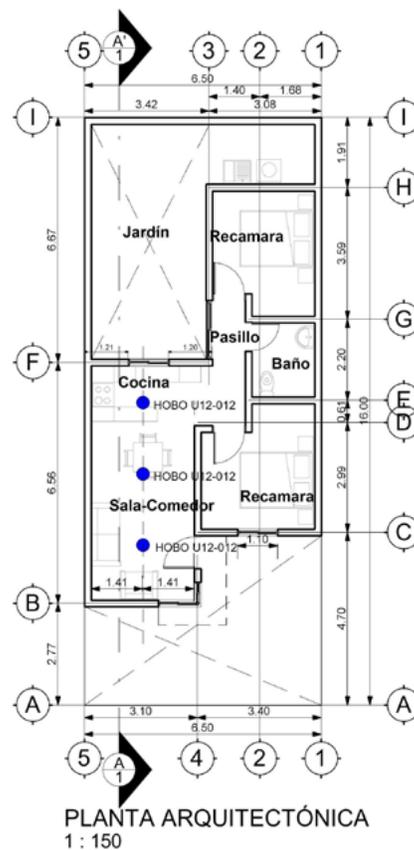


Tabla 4. Vista en planta de la disposición de los equipos de monitoreo en el interior de la vivienda.

Fuente: Elaboración propia.

Las características del diseño de la vivienda son particulares, ya que permiten mitigar los efectos de la temperatura implementados en su diseño y construcción. En la parte interior de la cubierta se encuentra una capa aislante de poliestireno con espesor de 5 centímetros aproximadamente, así como en todos los muros externos que colindan con las viviendas ad-

Metodología de simulación

La metodología de simulación energética consiste en diferentes procesos que nos permiten alcanzar los objetivos propuestos, entre ellos podemos mencionar la determinación de propiedades físicas de los elementos constructivos, dibujo 3D en software de simulación, determinación y conversión del archivo de clima, parámetros de simulación, así como el análisis y comparación de resultados de experimentación física, simulación y día representativo.

Las propiedades físicas de los elementos constructivos que se utilizarán en las simulaciones se presentan en la Tabla 2. Estas propiedades físicas y térmicas se tomaron principalmente de Cengel & Ghaja (2007)

Tabla 2. Propiedades físicas y térmicas de los materiales empleados en la simulación.

Material	Densidad	Cp	Conductividad	Emisividad
	Kg/m ³	J/(kg-k)	w/(m-k)	ε
Aire	1.184	1007	0.026	N/A
Concreto	2300	880	1.40	0.88-0.94
Ladrillo	1920	790	0.90	0.80
Madera contrachapada	513	1380	0.115	0.94
Poliestireno	16	1200	0.040	N/A
Cristal	2800	750	0.70	0.90-0.95
Aluminio pulido	2702	903	237	0.04-0.06

Fuente: elaboración propia.

El software de simulación se realizó mediante Design Builder, versión 4.07 en el Laboratorio de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Colima. El modelo de la casa habitación considera los materiales de construcción, así como los materiales de los muros adyacentes a las casas colindantes, que presentan la característica de contener una capa de poliestireno como material aislante, adicional al ladrillo.

En el aspecto de conversión de archivo de clima para la simulación en DesignBuilder, se requiere un archivo con extensión Energy Plus (EPW) donde se establezcan los datos climáticos a nivel horario de un año típico, resultante del promedio de los datos climáticos observados en un periodo de tiempo de varios años.

Dado que este archivo debe contener los datos de un año entero, para datos obtenidos de un periodo más corto, debe usarse un archivo climático existente de la estación meteorológica más cercana y sustituir en él los datos observados en las fechas y horas que les corresponden.

A continuación, se describe el proceso seguido para la creación del archivo EPW con datos obtenidos en sitio para un periodo de ocho días en el mes de octubre.

Primero se descargó el archivo con datos climáticos de Colima desde CBE Clima Tool (berkeley.edu) (Betti et al., 2022), de la estación climatológica WMO Station 766581 ubicada en Colima COL MEX, a una latitud de N 19° 13' y longitud de W 103° 43', a 494m sobre el nivel medio del mar, y una presión estándar a esa elevación de 95530Pa. La fuente de los datos se registra como ERA5-TMYx.

Luego se editó el archivo climático mediante el software Elements (bigladdersoftware.com) y se realizaron las siguientes operaciones:

1. En el menú 'Header' se estableció como año de referencia el 2002, que es el año estándar que usa Design Builder para la obtención de resultados de las simulaciones diarias y horarias (DesignBuilder, 2023).
2. En el mismo menú se cambiaron los datos de latitud y longitud para que coincidan con las coordenadas del sitio de observación de los datos. Solo hubo que cambiar una décima (0.01) de latitud y dos décimas (-0,02) de longitud.
3. En la columna de datos de Temperatura de Bulbo seco (Dry Bulb Temperature [C]) se sustituyeron los datos del EPW por los observados, referidos en la Tabla 1 - Datos sustituidos, manteniendo constantes las variables de humedad relativa y presión atmosférica.
4. En la columna de datos de Humedad Relativa (Relative Humidity %) se sustituyeron los datos del EPW por los observados, referidos en la Tabla 1 - Datos sustituidos, manteniendo constantes las variables de temperatura de bulbo seco y presión atmosférica.
5. En la columna de Radiación Solar Global (Global Solar Wh/m2) se sustituyeron los datos del EPW por los observados, referidos en la Tabla 1 - Datos sustituidos, manteniendo constante la variable de Radiación Solar Normal (Normal Solar).
6. Finalmente se guardó en ELEMENTS el archivo modificado, para posteriormente volver a hacer una conversión del archivo con EnergyPlus Weather Statistics and Conversions, de manera que el programa genere los 4 archivos necesarios para la simulación en DB.

Análisis de datos

Determinación de día representativo

La elección del día representativo del periodo de análisis se realizó con la base de datos de las normales climatológicas de Servicio Meteorológico Nacional (SMN) del periodo 1981 - 2010, exclusivamente de la estación #00006040 ubicada en la ciudad de Colima, Colima con latitud 19°13'00" N y longitud 103°42'47" oeste y 500 msnm (Sistema Meteorológico Nacional, 2010).

De acuerdo a los datos obtenidos, se realizó el análisis de las temperaturas medias, máximas y mínimas de cada mes de la temporada que corresponde, siendo ésta de junio a noviembre. Así mismo, se calculó la oscilación térmica entre la temperatura máxima y mínima mensual.

Tabla 3. Temperaturas medias, máximas y mínimas de temporada junio-noviembre.

Temporada Junio-Noviembre						
Elementos	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
Temperatura Max	34.4	33.1	32.9	32.1	32.5	33.1
Promedio de Temp. Max.	33.02					
Temperatura Media	27.9	27.2	27	26.6	26.4	25.4
Promedio de Temp. Med	26.75					
Temperatura Mínima	21.5	21.3	21.1	21.1	20.3	18.3
Promedio de Temp. Min.	20.6					
Oscilación Temporada	12.417					

Fuente: elaboración propia.

El día representativo se refiere al día donde el comportamiento de la temperatura y humedad es similar al comportamiento de un periodo determinado, siendo este en la temporada de junio - noviembre. Podemos definir el día representativo como la diferencia de la temperatura media más la diferencia de la oscilación térmica, es más cercano a cero, que esta definido por la Ec(1). (Esparza-lópez et al., 2022, p. 13).

$$DR = (Tm_{diaria} - Tm_{temporada}) + (OSCT_{diaria} - OSCT_{temporada}) = 0 \quad (1)$$

Tomando en cuenta los días de análisis, se calcularon las temperaturas medias y oscilaciones térmicas de cada uno, obteniéndose las diferencias necesarias que se especifica en las fórmulas. A partir de los datos calculados y aplicación de estos, podemos concluir que el día representativo será el día 19 de octubre de 2021, debido a la poca cantidad de datos obtenidos el día 21 de octubre, se descarta y se elige el valor más cercano a 0, siendo este 12.30.

Tabla 4. Determinación de día representativo.

Día de medición	Tmáxima	Tmínima	Tmedia	Oscilación Tm diara	Tm. temporada	Osc. Temporada	DR
10/13/22	31.48	30.93	31.22	0.55	26.75	12.4	16.3
10/14/22	32.48	29.73	31.02	2.75	26.75	12.4	13.9
10/15/22	32.67	29.71	31.15	2.93	26.75	12.4	13.9
10/16/22	32.68	29.52	31.1	3.16	26.75	12.4	13.6
10/17/22	32.1	29.84	30.98	2.26	26.75	12.4	14.4
10/18/22	30.97	28.41	29.56	2.56	26.75	12.4	12.7
10/19/22	31.48	28.26	29.81	3.22	26.75	12.4	12.3
10/20/22	32.3	29.1	30.55	3.2	26.75	12.4	13.0
10/21/22	30.44	26.84	29.37	3.6	26.75	12.4	11.4

Fuente: elaboración propia.

Discusión

De acuerdo con los datos obtenidos en las simulaciones durante el periodo de medición, se realizó una comparación de temperaturas interiores del HOBO U12-12 central de la zona de estudio en la vivienda y las temperaturas simuladas. En el aspecto de temperaturas interiores, se tiene una mínima de 26.80°C y una máxima de 32.80°C, mientras que, en el caso de las temperaturas simuladas, la mínima corresponde de 25°C y la máxima de 34°C. Por lo tanto, podemos concluir que durante la semana de simulación y recabación de datos en la vivienda, se tienen temperaturas con valores similares entre sí, validando la información y modelado durante el proceso de simulación (Figura 6).

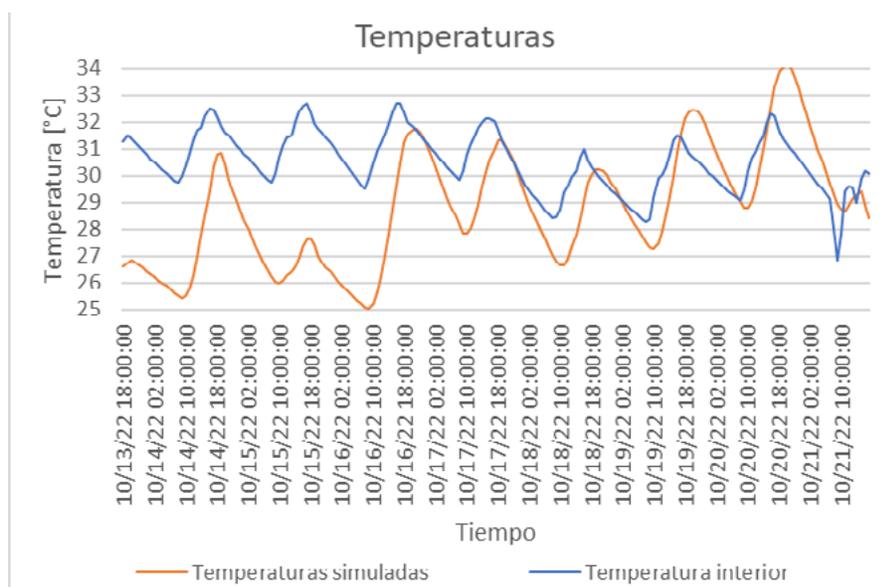


Figura 6. Representación de las temperaturas interiores medidas comparadas con las temperaturas interiores simuladas.

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, cabe recalcar la diferencia entre las temperaturas simuladas e interiores, esto debido a consideraciones técnicas que se realizaron durante el proceso de modelado 3D en la simulación, así mismo, la ubicación de bloques adiabáticos que representan las viviendas vecinas, generando así, un retraso térmico visible en los resultados analizados.

De igual manera, se analizó el día representativo obtenido en la Tabla 4, donde marca el día 19 de octubre como el día con valor más cercano a cero en el aspecto de DR (Esparza-lópez et al., 2022, p. 13). A partir de la información de temperaturas interiores, se observa un incremento de temperatura desde las 9:00 horas, siendo estas resultantes de las ganancias térmicas provenientes de la radiación solar y alcanzando un valor máximo de 31.5°C a las 16:00 horas.

En el caso de la temperatura simuladas, se presenta un aumento de temperatura a partir de las 10:00 horas, logrando un rango de temperatura máxima de 32°C-32.5°C durante el periodo de 18:00 a 23:00 horas esto debido a las ganancias térmicas obtenidas durante el día. Sin embargo, de manera general en ambas temperaturas simuladas e interiores, se tiene una disminución de temperaturas durante la noche, gracias al enfriamiento por las diferencias de temperaturas en el horario.

Otro de los aspectos a analizar en esta discusión de resultados, son las simulaciones CFD realizadas en DesignBuilder, donde se observan las temperaturas máximas en el centro de los espacios interiores de la vivienda provocado por las ganancias térmicas en muros y falta de ventilación; sin embargo, se presentan temperaturas menores en los muros colindantes, debido a la aplicación de material aislante en la junta constructiva estipulada en el reglamento de construcción del municipio de Villa de Álvarez, Colima. En el caso de las temperaturas mínimas, estas localizan en la cercanía de las ventanas; esto debido a las infiltraciones de aire y diferentes características físicas de los materiales (Figura 8).

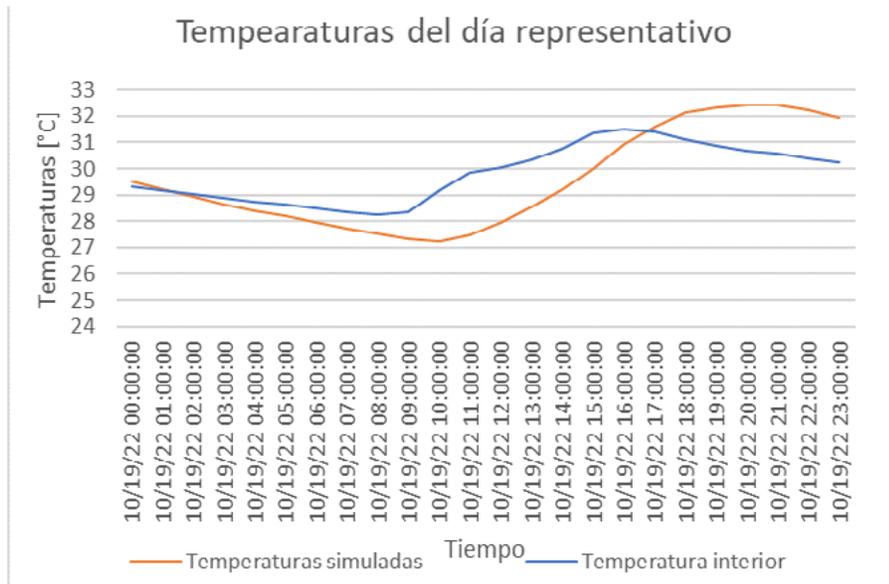


Figura 7. Representación de temperaturas interiores medias comparadas con las temperaturas interiores simuladas del día representativo.

Fuente: elaboración propia.

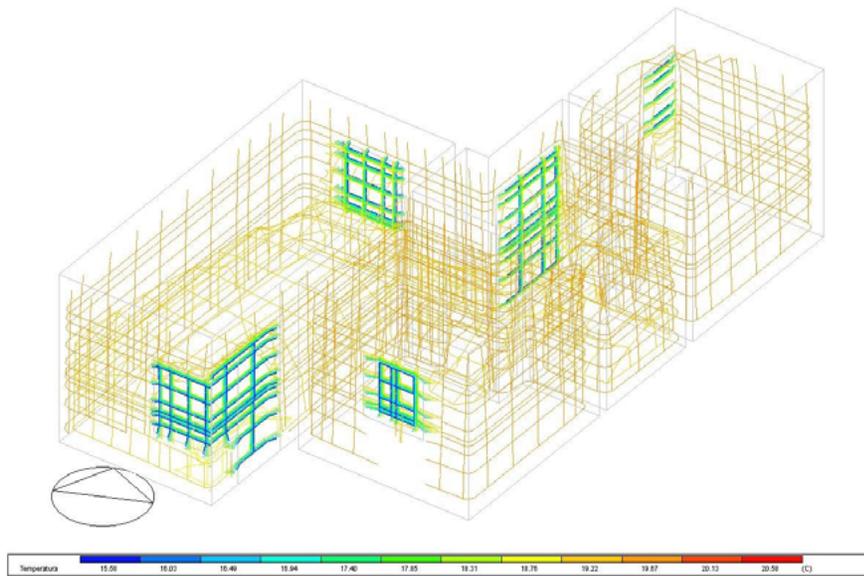


Figura 8. Simulación CFD de temperaturas en DesignBuilder.

Fuente: elaboración propia.

Para el análisis de las velocidades del viento, se emplearon simulaciones CFD en DesignBuilder, donde se aprecia que en las cercanías de las ventanas se tienen valores más elevados de velocidad, provocado por las infiltraciones de los elementos de puertas y ventanas que confrontan las corrientes externas de la vivienda. Sin embargo, existe un movimiento de aire interior en todas las áreas de la vivienda, debido al efecto convectivo del aire. estas velocidades, pequeñas en las zonas alejadas de las infiltraciones son muy pequeñas pero existentes.

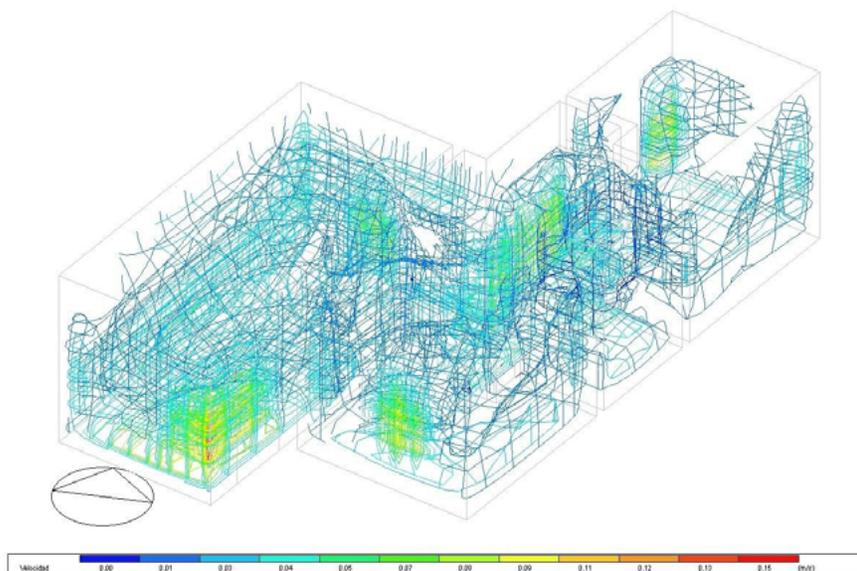


Figura 9. Simulación CFD para las velocidades de viento.

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

El análisis del presente prototipo de interés social permite conocer el funcionamiento e impacto de las condiciones climáticas de acuerdo al clima cálido subhúmedo de la región. Actualmente estos prototipos de viviendas carecen de condiciones de confort térmico provocadas por la escasez de diseño bioclimático, al ser objetivo de venta y compra de productos en la sociedad.

El crecimiento demográfico ha generado un impacto mayor en el desarrollo de estos conjuntos habitacionales, donde además de carecer urbanización de calidad, se tiene limitaciones en aspectos económicos, ya que al ser de gran valor monetario, los usuarios sufren afectaciones al no poder costear las estrategias de climatización activa; por lo tanto, es de vital importancia entender y analizar estrategias de climatización pasiva que permitan mejorar la calidad térmica de estos proyectos arquitectónicos.

Los resultados obtenidos se basan en la metodología aplicada a la experimentación física y simulación, donde se concluye la importancia del diseño de ventanas, ya que estos son elementos constructivos que propician la ventilación natural al interior del espacio. Esta estrategia de climatización pasiva permite reducir las temperaturas debido al intercambio de calor y generar así condiciones de confort para el usuario debido al enfriamiento en el espacio.

La aplicación en conjunto de las estrategias de ventilación y materiales aislantes permite aumentar las condiciones de confort y mejoramiento de la sensación térmica, sin embargo, estas soluciones se pueden mejorar al aplicar estrategias de diseño bioclimático desde la conceptualización arquitectónica.

En próximas investigaciones se propone estudiar el impacto de generar sombras en la azotea para reducir las ganancias de calor por radiación solar, así como su impacto en las temperaturas interiores. Así mismo, se sugiere el estudio del impacto de diseños de ventanas, ya que la envolvente arquitectónica es el elemento más susceptible a ganancias térmicas al estar en contacto con las condiciones climáticas del entorno.

Referencias y Bibliografía

Águilar, A. I., Esparza López, C. J., & Ojeda Sánchez, J. A. (2021). El reto de la defensa ante el sol en zonas intertropicales. Una revisión del estado del arte de sistemas de protección solar. In *Un mundo sostenible en el siglo XXI: Alternativas para el rescate del planeta* (pp. 155–169). Dirección de Investigación y Posgrado UAdeC.

Aflaki, A., Mahyuddin, N., Al-Cheikh Mahmoud, Z., & Baharum, M. R. (2015). *A review on natural ventilation applications through building façade components and ventilation openings in tropical climates. Energy and Buildings*, 101, 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.033>

Babota, F., Manea, D. L., Aciu, C., Munteanu, C., Cobîrzan, N., & Tămaş-Gavrea, D. R. (2018). *Determination of optimal dimensions of fixed shadowing systems (pergolas) to reduce energy consumption in buildings in Romania. Procedia Manufacturing*, 22, 358–363. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.054>

Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico* (J. H. Pérez Castellanos, Trans.; 3rd ed.). McGraw-Hill.

Chetan, V., Nagaraj, K., Kulkarni, P. S., Modi, S. K., & Kempaiah, U. N. (2020). Review of Passive Cooling Methods for Buildings. *Journal of Physics: Conference Series*, 1473, 012054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1473/1/012054>

De Buen, Odón; Morales, Norma; Navarrete, J. I. (2022). Servicios energéticos, pobreza energética y eficiencia energética: una perspectiva desde México. *Cuadernos de La CONUEE*, 8, 82–83. [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10998/3/Práctica N° 3 _Granulometria I_.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10998/3/Práctica%20N%C3%BA3%20_Granulometria%20I_.pdf)

DesignBuilder. (2023). *Documents - DesignBuilder*. DesignBuilder. <https://design-builder.co.uk/download/documents>

Elghamry, R., & Hassan, H. (2020). *Impact of window parameters on the building envelope on the thermal comfort, energy consumption and cost and environment. International Journal of Ventilation*, 19(4), 233–259. <https://doi.org/10.1080/14733315.2019.1665784>

Esparza-lópez, C. J., Escobar-Del Pozo, C., Al-obaidi, K. M., & 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). <https://doi.org/10.3390/en15062213>

García-Ochoa, R., & Graizbord, B. (2016). *Spatial characterization of fuel poverty in Mexico. An analysis at the subnational scale. Economía Sociedad Y Territorio*, 16(51), 289–337.

García, A. K. (2018). *14 millones de viviendas en México no son dignas*. El Economista. <https://www.economista.com.mx/politica/14-millones-de-viviendas-en-Mexico-no-son-dignas-20181219-0081.html>

INEGI. (2018). *Primera encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares (ENCEVI)*. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSociodemo/ENCEVI2018.pdf>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). *Cuentáme de México*. <https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P>

Jaime, E. (2021). *Vivir a oscuras : la pobreza energética en México*. *Mexico Evalúa*, 1–39. <https://www.mexicoevalua.org/vivir-a-oscuras-la-pobreza-energetica-en-mexico/>

Naciones Unidas. (2020). *¿Qué es el cambio climático?* <https://www.un.org/es/climate-change/what-is-climate-change>

Naciones Unidas. (2022). *Desafíos globales: Población*. <https://www.un.org/es/global-issues/population#:~:text=La poblaci3n mundial alcanz3 los,y 2000 millones desde 1998>

ONU Habitat. (2009). *El derecho a una vivienda adecuada*. Folleto informativo nº21. *Revista de Antropología Social*, 19, 103–129. <http://revistas.ucm.es/index.php/RASO/article/view/RASO1010110103A>

Tamaskani Esfahankalateh, A., Farrokhzad, M., Saberi, O., & Ghaffarianhoseini, A. (2021). *Achieving wind comfort through window design in residential buildings in cold climates, a case study in Tabriz city*. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(2), 502–517. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa082>

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Cambio Climático 2021: Bases físicas*.

Vázquez-Torres, C. E., Gómez-Amador, A., Bojórquez-Morales, G., Beizaee, A., & Eliás-López, P. D. (2021). *Natural Ventilation Strategy in a Social Housing with Sub-humid Warm Climate Based on Thermal Comfort*. *Environmental and Climate Technologies*, 25(1), 508–524. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2021-0037>

World Meteorological Organization (WMO). (2020). *El estado del clima en América Latina y el Caribe 2020*. www.miteco.gob.es

Percepción acústica en espacios educativos de la Universidad de Colima

Mónica Isabel Verdugo Mendoza¹, Cruz Roberto Velázquez Cardona²,
Carlos Javier Esparza López³, Karen Estrella Martínez Torres⁴

1 Profesora investigadora de la Universidad de Colima

Correo: mverdugo@u.col.mx

2 Profesor investigador de la Universidad de Colima

Correo: cvelazquez0@u.col.mx

3 Profesor investigador de la Universidad de Colima

Correo: cesparza@u.col.mx

4 Profesora investigadora de la Universidad Autónoma de Baja California

Correo: karen.martinez24@uabc.edu.mx

Resumen

El efecto de la acústica en los espacios educativos tiene repercusiones más allá de la salud de los habitantes del espacio. Puede modificar la función para la cual fueron diseñados dichos espacios, haciendo compleja la tarea de enseñanza aprendizaje. Este estudio realizó el diagnóstico acústico de los espacios educativos de campus 4 Coquimatlán de la Universidad de Colima con la intención de identificar los niveles sonoros dentro de los cuales se realizan las actividades de enseñanza. Además, se encontró la percepción y la comodidad de estos por parte del estudiantado. Se encuestó al 26% de los estudiantes (714 personas) de diversas facultades entre los meses de octubre, noviembre y febrero utilizando una encuesta de calidad ambiental aplicando escalas Likert para conocer la percepción de la intensidad acústica, el confort acústico, la tolerancia al ruido generado dentro del espacio, de los espacios contiguos y a fuentes sonoras como el tren. Al mismo tiempo se hizo el monitoreo ambiental de diversos espacios mediante la utilización de sonómetros. Los resultados indicaron que el ruido en el espacio y los espacios contiguos es tolerable por más del 78% del estudiantado. Sin embargo, cuando se hace presente la fuente acústica provocada por el tren, esta afecta al 35% del estudiantado disminuyendo la tolerancia al ruido hasta el 27% pese a presentar los mismos niveles que los causados por el propio espacio como hablar. Contrario a lo mostrado en la tolerancia, más del 87% del estudiantado considero confortables sus espacios con decibeles entre los 47 dBAA y 70 dBAA. Se puede concluir que los valores encontrados en este campus son inferiores a los encontrados en otros estudios con edificaciones inmersas en la traza urbana. Sin embargo, el paso del tren es una fuente relevante que reduce la tolerancia al ruido del espacio e incrementa la ausencia de confort en él.

Palabras clave: Acústica, confort, tren, campus universitario, tolerancia.

Abstract

The effect of acoustics in educational spaces has repercussions beyond the health of the inhabitants of the space. The sound can modify the function for which these spaces were designed, making the teaching-learning task complex. This study conducted the acoustic diagnosis of the educational spaces of Campus 4 Coquimatlán of the University of Colima to identify the sound levels within the teaching activities. In addition, the perception and comfort of these by the students were found. 26% of the students (714 people) from various faculties were found between October, November, and February using an environmental quality survey applying Likert scales to know the perception of acoustic intensity, acoustic comfort, and noise tolerance generated within the space from adjoining spaces and to sound sources such as the train. At the same time, environmental monitoring of various spaces was carried out using sound level meters. The results indicated that the noise in the space and the adjacent spaces is tolerable by more than 78% of the students. However, when the acoustic source caused by the train is present, it affects 35% of the students, reducing noise tolerance to 27% despite presenting the same levels as those caused by the space, such as speaking. Contrary to what is shown in tolerance, more than 87% of the students consider their spaces between 47 dBAA to 70 dBAA comfortable. It can be concluded that the values found on this campus are lower than those found in other studies with buildings immersed in the urban layout. However, the train's passage is a relevant source that reduces the space's noise tolerance and increases discomfort.

Keywords: Acoustics, comfort, train, university campus, tolerance.

Introducción

El ruido ambiental se ha vuelto uno de los contaminantes más significativos para la sociedad, ya que, influye completamente en el bienestar de la población. Las personas expuestas al ruido de manera continua experimentan problemas fisiológicos, como la hipoacusia, alteraciones en su actividad cerebral, respiratoria, cardiovascular, gastrointestinales, entre otros (Bañuelos Castañeda, 2005; Donáth, 2006). Todo esto incluyendo alteraciones en su conducta, tales como; perturbación del sueño, irritabilidad y agresividad, complicaciones para comunicarse y problemas para desarrollar la concentración y atención mental del individuo (Evans et al., 1995).

Estudios realizados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) han dado a conocer que una tercera parte de la población mundial y tres de cada cuatro habitantes de ciudades industrializadas tienen un grado de pérdida auditiva como consecuencia de la exposición a sonidos de alta intensidad (Sociedad Española de Otorrinolaringología y Cirugía de Cabeza y Cuello, [SEORL.CCC] 2022).

La OMS, estima que 300 millones de personas son afectadas por ruidos llegando a dañar su salud, mientras que, la Unión Europea de la Contaminación Acústica considera que afecta a unos 100 millones de personas, causando a su vez, pérdidas económicas por más de 60 millones de euros (Montaño et al., 2012).

Sumando a estos factores se ha determinado que el ruido afecta a la audición dificultando la comunicación y produciendo más problemas de salud como el incremento al riesgo de enfermedades cardiovasculares, falta de sueño o insomnio, estrés y, con ello, problemas psicológicos, a su vez, dificulta el aprendizaje al disminuir la capacidad de atención e incluso la memoria y motivación (Roldán et al., 2004).

En México, los estudios referentes al ruido y la acústica aún no forman parte de las políticas oficiales, por lo que, los esfuerzos científicos y técnicos de incorporar al ruido como contaminante en los diagnósticos de calidad ambiental para la ciudad, se ha derivado a las instituciones universitarias, donde, en estas se han hecho las recomendaciones a las autoridades ambiental y de salud (Montaño et al., 2012).

Se han estudiado los efectos del ruido en alumnos de educación primaria ubicados en zonas ruidosas y en zonas silenciosas o con menor impacto sonoro y, los resultados son consistentes con los estudios de laboratorio sobre las respuestas fisiológicas al ruido, ya que, los alumnos que se encuentran en zonas ruidosas presentan una mayor presión sanguínea, tuvieron mayores problemas en las pruebas cognitivas, pérdida de interés y, con ello, problemas de atención y memoria (Cohen et al., 1980).

Estudios realizados con la población escolar, tanto a nivel nacional como internacional, han mostrado que la exposición continua a elevados niveles de ruido es completamente negativamente para las tareas de atención y discriminación auditiva, así como en el aprendizaje, y de manera especial en la lectura (Cohen et al., 1973) (Smith & BroadBAent, 1981). Con

esto, la OMS recomienda que, para comprender los mensajes hablados dentro de un salón de clases, el nivel de sonido de fondo no debe de ser mayor a 35 dBAA¹. Sin embargo, en estudios realizados se ha encontrado que el nivel mínimo promedio ha sido de 62.5 dBAA para escuelas ubicadas en zonas de bajo flujo vehicular y para las escuelas ubicadas en zonas de mayor tráfico vehicular fue de 71 dBAA (Berglund et al., 1999).

Los estudios de los años 1970's y 1980's sobre los efectos del ruido en los niños escolares se centraron en su rendimiento académico, así como, en la interferencia de la comunicación entre el maestro y los alumnos y entre los propios estudiantes. En esos años, solo se identificaban como fuentes de ruido en los escenarios educativos; al tránsito de autos, trenes y aviones alrededor de las escuelas (Cohen et al., 1980).

En una investigación acerca de los efectos del ruido de aviones de un nuevo aeropuerto en Alemania, evaluaron la salud psicológica de niños de entre 9 y 13 años con una escala de calidad de vida. Los resultados mostraron un decremento importante en la calidad de vida a los 18 meses de que fue inaugurado el aeropuerto, así como un déficit motivacional en el área del nuevo aeropuerto por la exposición al ruido de aviones (Bullinger et al., 1999).

Lamb y Rempel (2006), detectaron que la fuente sonora de mayor importancia que interfiere con la comunicación dentro de las aulas de clase son los propios alumnos, desde el estar platicando durante la clase, como el estarse moviendo dentro del aula, esto sumado a los ruidos intermitentes que vienen del exterior del aula y edificio. Todo esto provoca que los alumnos experimenten consecuencias de entre las más significativas como la falta de concentración, fatiga, mayor número de dudas al no poder escuchar las participaciones de los compañeros y con ello, mayor esfuerzo para tratar de escuchar y retomar la concentración al tema expuesto en ese momento.

En Brasil, un estudio reportó que los niveles de ruido en los salones de nivel primaria son de 59 a 87 dBAA durante las horas de clase, también se reafirma la relación que se tiene con síntomas fisiológicos como el incremento de fatiga, dolores de cabeza junto con diversos cambios hormonales de cortisol (de Medeiros et al., 2012).

En general, los estudios acústicos realizados hasta el momento demuestran la importancia de esta variable no solo en situaciones fisiológicas, como sería de esperarse, si no en procesos cognitivos. El diagnóstico oportuno de las características acústicas de un espacio puede derivar en la propuesta de adecuaciones que permitan mejorar el ambiente interior.

1 Para los humanos, la percepción del sonido es un fenómeno complejo que depende de valores como el nivel sonoro, la frecuencia, entre otros; por lo que, cuando se desea valorar riesgos derivados a la exposición del ruido, es necesario que la medida del ruido sea un reflejo de la percepción del individuo, i.e., las mediciones realizadas en dBAA son aquellas ponderadas mediante un filtro que quita las bajas y muy altas frecuencias que el oído humano no es tan capaz de escuchar ya que, este es más sensible a frecuencias medias, por lo que esta medición se efectúa sobre las frecuencias que se consideran más dañinas para el oído humano y eliminando aquellas que son más complicadas de percibir (NOISMART, 2020).

El Sonido

La audición humana no responde de manera lineal a los cambios en la intensidad del sonido, sino que sigue una relación logarítmica. Esto significa que para que percibamos un sonido como el doble de fuerte, su nivel de intensidad debe aumentar en aproximadamente 10 dBA en la escala de decibelios. Si se utilizara una escala lineal, las mediciones no reflejarían con precisión nuestra experiencia auditiva, lo que dificultaría la comunicación y la comprensión de los niveles de sonido. La importancia de esta escala radica en su capacidad para representar de manera eficiente un amplio rango de intensidades sonoras, desde susurros hasta ruidos extremadamente fuertes, en una escala manejable y fácil de comparar.

Existen dos tipos de ponderación de frecuencia en función de los niveles de presión sonora:

La ponderación A (dBAA) se utiliza comúnmente en la medición de niveles de presión sonora para reflejar mejor la respuesta auditiva humana. Esta ponderación da menos peso a las frecuencias bajas y altas y más peso a las frecuencias medias, ya que nuestra audición es menos sensible a las extremidades del espectro audible. Se utiliza en situaciones en las que se desea simular la respuesta auditiva humana o cuando se están evaluando los efectos del ruido en la salud auditiva humana. Por ejemplo, se usa en la medición de ruido ambiental o para establecer límites de exposición ocupacional al ruido en lugares de trabajo.

La ponderación C (dBAC) es menos común y se utiliza para medir niveles de presión sonora sin aplicar ningún ajuste de ponderación en función de la respuesta auditiva humana. Pondera todas las frecuencias de manera relativamente uniforme, por lo que es útil cuando se necesita evaluar la energía total del sonido independientemente de la frecuencia. Esto la hace más adecuada para aplicaciones como la medición de ruido de maquinaria industrial, donde se pueden presentar niveles de sonido dominados por frecuencias bajas o altas.

Método

La metodología empleada para el desarrollo de esta investigación toma como referencia estudios de calidad del ambiente interior en espacios educativos, debido a la incidencia del confort acústico como un aspecto relacionado con la salud, productividad y desempeño académico de los estudiantes, que a su vez correlacionan el ambiente acústico con el confort higrotérmico y lumínico como parte de un entorno ambiental que puede o no proporcionar las condiciones necesarias para el óptimo desarrollo educativo (Dong et al., 2021; Tang et al., 2020; Taylor et al., 2016; Wang et al., 2021; Wu, Sun, et al., 2020; Wu, Wu, et al., 2020; Yang & Mak, 2020).

En el entendido de que la investigación comprende la evaluación de confort acústico como parte de la calidad del ambiente interior en espacios educativos, este estudio se dividió en tres etapas que se llevaron a cabo de la siguiente manera: el diseño de un cuestionario como instrumento de evaluación del confort, preferencia y tolerancia acústica; la aplicación y medición del ambiente acústico en los interiores de los espacios educativos; y la medición del ruido en exteriores (Figura 1).

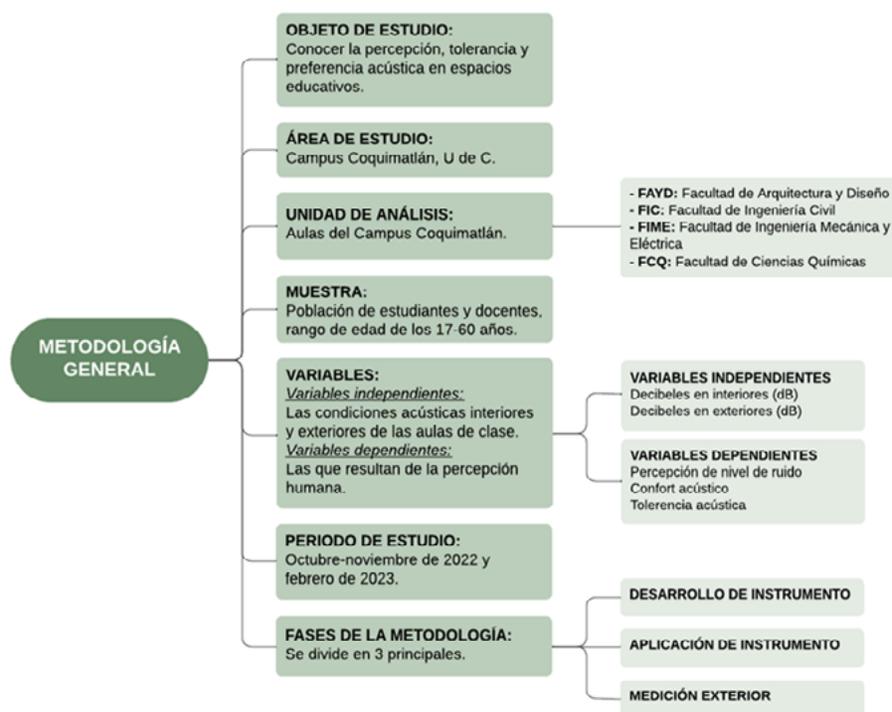


Figura 1. Diagrama de la metodología general del proyecto.

Fuente: elaboración propia.

Caso de estudio

El caso de esta investigación es el campus Coquimatlán, perteneciente a la Delegación 4 de la Universidad de Colima debido a su cercanía a las vías del ferrocarril que transporta principalmente productos industriales en su ruta del puerto de Manzanillo al centro del país (Figura 2). La elección de este plantel como caso de estudio está en función del ruido ocasionado por el paso del tren, que se considera un evento acústico importante en los espacios educativos debido a su alta frecuencia en el día.

El plantel cuenta con 4 facultades y 1 bachillerato; las facultades que se encuentran en este campus son: la Facultad de Arquitectura y Diseño, la Facultad de Ingeniería Civil, la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, la Facultad de Ciencias Químicas, y el Bachillerato N° 18. La ubicación de este plantel de la Universidad de Colima se encuentra en el km. 9 Carretera, Colima - Coquimatlán, Jardines del Llano, 28400 Coquimatlán, Colima.

Universo y muestra

De acuerdo con información de la Delegación 4, que corresponde a la administración del campus Coquimatlán de la Universidad de Colima, la población universitaria, tanto de alumnos como de personal laboral puede fluctuar por cada ciclo escolar.

No obstante, para determinar el universo de la población de este estudio, se tomaron en cuenta las cifras reportadas durante el periodo escolar de febrero - agosto de 2022, en donde es preciso señalar que el mayor número de usuarios corresponde a alumnos de nivel licenciatura con una cifra total de: 2040, mientras que en bachillerato se reportan: 379, y el total de personal administrativo y docentes suma: 250 usuarios, dando como resultado a un total de 2669 usuarios que hacen uso del campus Coquimatlán (Tabla 1).

Percepción acústica en espacios educativos de la Universidad de Colima

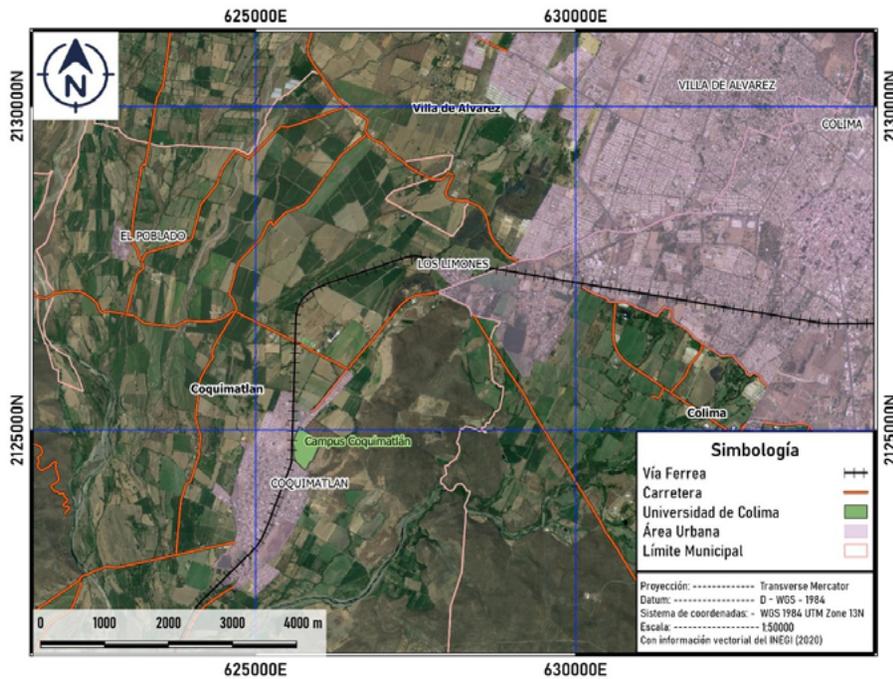


Figura 2. Mapa que muestra la cercanía de la vía férrea al Campus Coquimatlán de la Universidad de Colima.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Tabla de población universitaria durante el ciclo febrero-agosto 2022.

Dependencia	# de mujeres	# de hombres	Totales por nivel	Totales
Facultad de Arquitectura y Diseño	314	228	542	2040 (739 mujeres y 1301 hombres)
Facultad de Ingeniería Civil	112	291	403	
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica	74	548	622	
Facultad de Ciencias Químicas	239	234	473	
Bachillerato 18	213	166		379
Trabajadores administrativos y docentes	250			250
TOTAL DE USUARIOS				2669

Fuente: elaboración propia.

Para determinar la muestra representativa de este proyecto se utilizó el programa Sample Size Calculator® (Creative Research Systems®, 2012) con parámetros del 95% de nivel de confianza y un margen de error del 5%. Lo que dio como resultado un tamaño de muestra de 336 personas, sin embargo, durante el periodo de estudio fue posible obtener 714 respuestas (26.7% del universo), de las cuales 417 correspondieron a usuarios masculinos y 297 a usuarios femeninos (Figura 3).

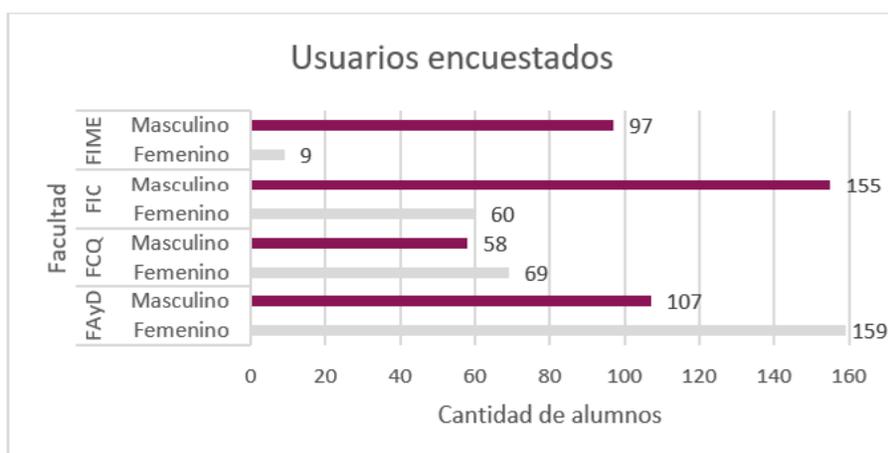


Figura 3. Gráfico de usuarios encuestados por facultad del campus.

Fuente: elaboración propia.

Periodo de estudio

Con el objetivo de obtener resultados de la calidad del ambiente interior en diferentes temporadas climáticas, se establecieron dos fases durante los períodos de clases de la Universidad de Colima, uno que contempla los meses con mayor humedad (octubre, noviembre y febrero) y otro que abarca los meses con mayores temperaturas (abril y mayo).

No obstante, debido al interés de evaluar el nivel de confort acústico el presente estudio comprende únicamente la primera fase del análisis, cuyos resultados fueron obtenidos durante el primer periodo de la evaluación de calidad ambiental, que se desarrolló durante los meses de octubre y noviembre de 2022 y en febrero de 2023.

Instrumento de medición y variables

El cuestionario fue diseñado con normativa internacional que evalúa variables del medio ambiente físico y de percepción humana de la calidad del ambiente interior (ASHRAE American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2004; International Organization for Standardization 10551:1995, 1995; ISO International Organization for Standardization, 1998, 2005), lo que dio como resultado 6 secciones: datos generales, información del usuario, confort higrotérmico, confort acústico, confort lumínico y cierre, cada uno con sus respectivos indicadores. No obstante, este manuscrito reporta únicamente la sección 4 relacionada con el ambiente acústico.

Para conocer la percepción auditiva se tomaron en cuenta las variables: física y humana de la acústica, donde cabe mencionar que la primera va en función de su variable ambiental (decibelios), mientras que la segunda al ser cualitativa resulta ser factible de evaluar mediante un instrumento de medición diseñado con la norma ISO 10551 que determina escalas de medición de percepción en el ambiente físico (ISO, 1995). Por lo que se desarrolló un cuestionario que responde a parámetros relacionados con: el confort acústico, volumen de ruido, fuente de ruido, tolerancia acústica y evento acústico en espacios educativos (Tabla 1).

Tabla 2. Operacionalización de indicadores de percepción acústica.

Indicador	Dimensión	Variables	Instrumento
Percepción acústica	Física (ambiental)	Decibeles (dBA)	Decibelímetro SLM-25 Sound Level Meter
	Humana (percepción)	Confort acústico	Cuestionario de calidad del ambiente interior
		Volumen de ruido	
		Fuente de ruido	
		Tolerancia acústica	
Evento acústico			

Fuente: elaboración propia.

Con el objetivo de evaluar cada variable se diseñaron 6 preguntas para el cuestionario, de las cuales 5 tienen su respectiva escala Likert que permite la evaluación objetiva de los resultados relacionados a la percepción acústica, volumen de ruido, tolerancia y evento acústico, mientras que el indicador de fuente de ruido tomó parte del instrumento como pregunta que permite conocer el lugar que causa mayor afección por ruido.

Tabla 3. Preguntas y escalas de indicadores del instrumento.

Indicador	Pregunta	Escala Likert
Confort acústico	¿Qué tan cómodo considera que es el espacio respecto al volumen de ruido?	
Volumen de ruido	¿Cómo considera que es el volumen de ruido en el espacio en este momento?	
Tolerancia acústica	¿Qué tan tolerable consideras que es el ruido generado en este espacio?	
	¿Qué tan tolerable consideras que es el ruido proveniente de espacios contiguos?	
Evento acústico	¿Qué tan tolerable consideras que es el ruido proveniente del tren?	
Fuente de ruido	¿De dónde proviene el ruido que más afecta tu concentración e interrumpe tus actividades?	No aplica

Fuente: elaboración propia.

Equipo de medición

Para las mediciones de las variables físicas de la percepción acústica se debe monitorear el ambiente acústico, por lo que se utilizó como dispositivo de medición un decibelímetro SLM-25 (Gain Express Holdings, 2015) con estándares internacionales aplicados tanto en su calibración como en el rango de medición, precisión y respuesta de frecuencia (Tabla 4).

El equipo (Figura 4) fue configurado para registrar de manera automática en intervalos de un minuto los decibeles (dBA) al interior de los espacios estudiados, así como también en puntos estratégicos del exterior del campus Coquimatlán de la Universidad de Colima.

Tabla 4. Especificaciones de equipo SLM-25 Sound Level Meter.

Especificaciones	
Estándar aplicado	IEC651 tipo 2, ANSI SI .4 tipo 2
Fuente de sonido de calibración	94dBA @ 1kHz
Rango de medición	30~130dBA
Precisión	+1.5dBA

Fuente: elaboración propia.



Figura 4. Equipo de medición de decibeles SLM-25 Sound Level Meter.

Fuente: elaboración propia

La medición con el equipo demora alrededor de 20 minutos, el decibelímetro es ubicado al centro del espacio con una altura de aproximadamente 70 cm y requiere de cinco minutos para su correcta calibración, posterior a esto, los datos que registra el dispositivo muestran el estado acústico del espacio, así como cada anomalía y evento acústico importante, como lo es para esta investigación el paso del tren.

Aplicación de cuestionarios

La evaluación de calidad del ambiente interior está estipulada bajo dos criterios: el ambiente físico y la percepción humana (Tabla 2). En este sentido, se desarrolló un instrumento de acopio de información respecto a la percepción auditiva de los usuarios, que fue aplicado simultáneamente a la medición de los decibeles generados en los espacios.

Con el objetivo de obtener la mayor cantidad de información humana y registros de las variables físicas, se determinó el uso de la aplicación del cuestionario con la herramienta virtual de Google Forms, llevando a cabo la obtención de datos de los usuarios de manera grupal a través de un código QR enlazado a la encuesta.

La aplicación de los cuestionarios y medición de variables (Figura 5), se llevó a cabo en un tiempo estimado de 15-20 minutos, donde en los primeros 5 minutos de presentación del proyecto a cada grupo se facilitó la toma de datos para la calibración del decibelímetro. En

los minutos posteriores, se grabó el registro de decibeles generados por el ruido que posteriormente fue analizado y comparado en los distintos espacios del campus universitario.



Figura 5. Campaña de aplicación de encuesta en Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Fuente: elaboración propia

Resultados

Los resultados obtenidos de las mediciones físicas de los decibeles en el interior de los espacios evaluados demostraron que en la Facultad de Arquitectura y Diseño (FAyD), Facultad de Ingeniería Civil (FIC) y Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) hay un promedio de 60 dBA de ruido generado principalmente por ruido propio de los espacios, no obstante el equipo de medición registró hasta 90.5 dBA de sonido en los diversos momentos en que pasaba el tren por las vías férreas del exterior del campus (Figura 6).

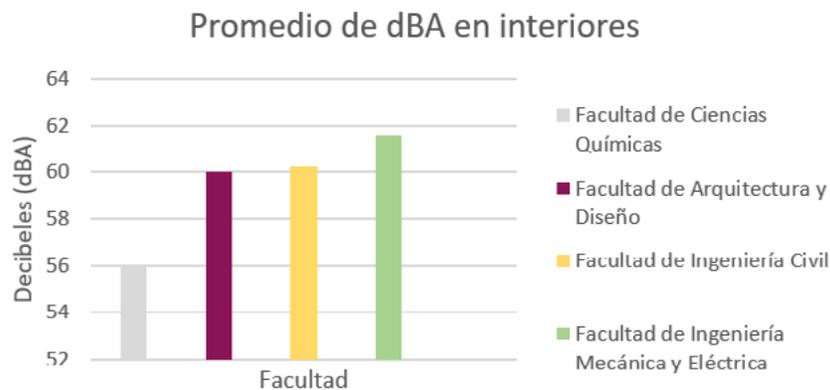


Figura 6. Promedio de decibeles en espacios interiores del campus Coquimatlán.

Fuente: elaboración propia

En áreas exteriores se registraron valores promedio de 53.84 dBA en pasillos exteriores de los laboratorios de la FIC, 55.84 dBA en la plazoleta que comparten la FIME y FCQ y, por último, la FAyD presentando 57.89 dBA con el mayor valor en espacios exteriores (Figura 7).

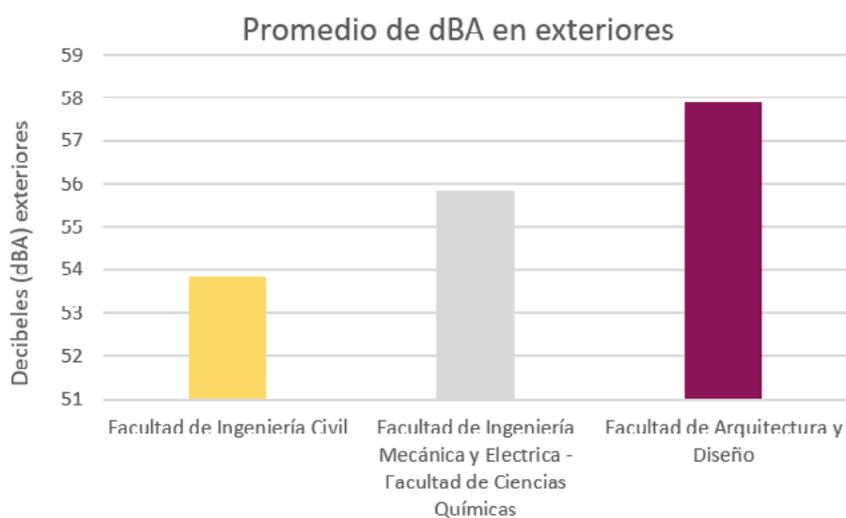


Figura 7. Promedio de decibeles en espacios exteriores del campus Coquimatlán.

Fuente: elaboración propia

La percepción de la intensidad sonora en el espacio de las aulas fue considerada como moderada (valor en escala 0) por el 66% de los estudiantes, que percibieron valores sonoros entre los 47dBA y hasta los 70 dBA, aunque existieron casos que consideraban las mismas condiciones incluso con valores de hasta 90dBA. El 16.5% de los estudiantes consideraron los valores como bajos (escala -1) mientras registraban valores entre 55dBA y 64dBA en general, y el 13.3% consideró los valores altos (escala +1) con registros similares (Ver figura 8).

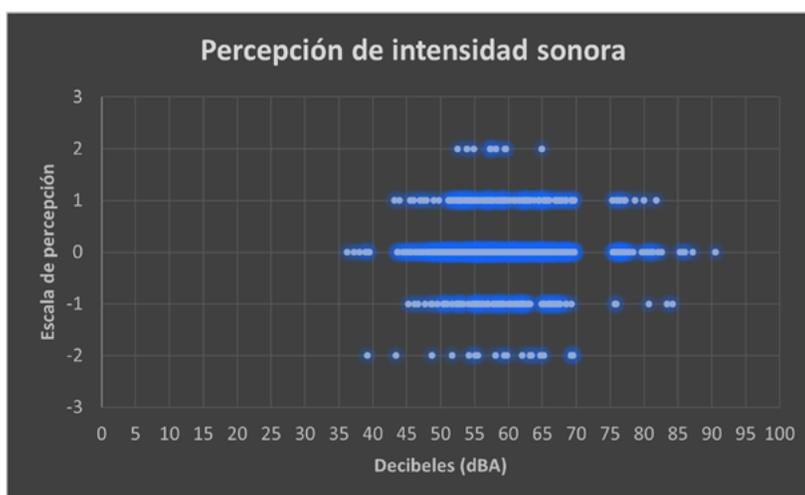


Figura 8. Percepción de intensidad sonora y valores acústicos.

Fuente: elaboración propia

Para la sensación de confort acústico (Ver figura 9), pese a que el 66% consideraba la intensidad acústica como moderada, los valores de medianamente confortable (escala 0) y cómodo (escala -1) sumaron el 87% con valores entre los 47dBA y los 70dBA principalmente, mientras que la sensación de incomodidad mantuvo el 9.4% con valores muy puntuales.

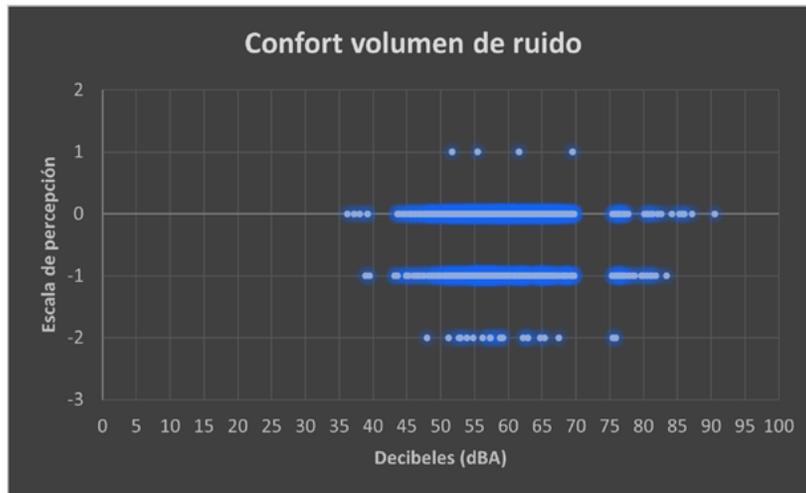


Figura 9. Confort acústico y valores registrados.

Fuente: elaboración propia

Respecto a que tan tolerable es el sonido en el espacio (Ver figuras 10, 11 y 12), en los espacios contiguos y cuando se da el paso del tren, se registraron valores de 87.7%, 78.7% y 27.2% para la respuesta de tolerante. Lo interesante de las respuestas es que, pese a la intolerancia por el paso del tren, los valores medidos fueron similares a los alcanzados por el ruido propio del espacio o de los espacios contiguos. De hecho, la percepción de intolerante fue de 9.4% y 18.1% para el propio espacio y los contiguos respectivamente, mientras que para cuando pasa el tren alcanzó el 50% mientras que los decibelios fueron de 60-63dBA, 50-65dBA y 55-70dBA para el espacio propio, los contiguos y por el tren respectivamente.

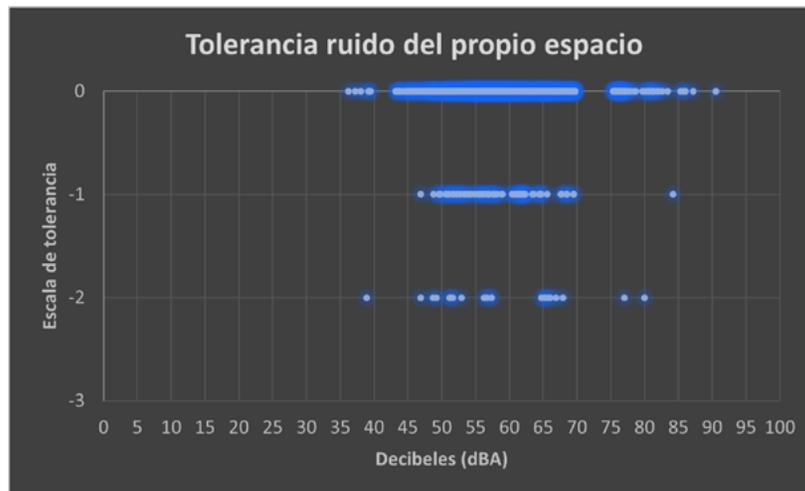


Figura 10. Tolerancia acústica al ruido del espacio.

Fuente: elaboración propia

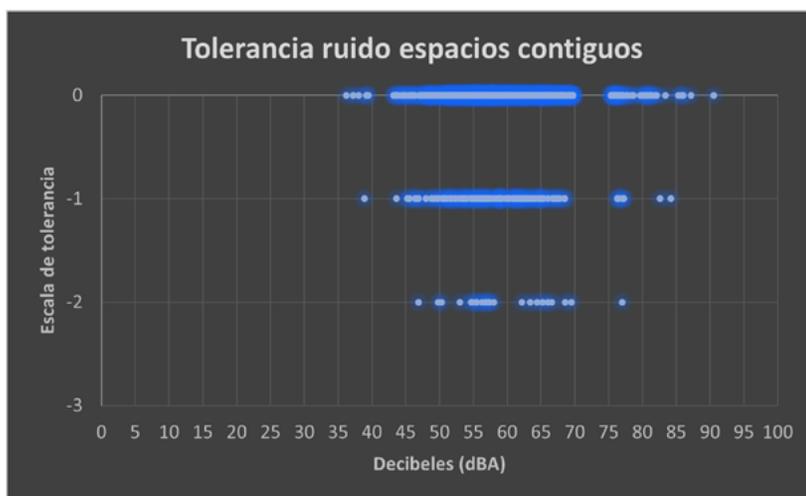


Figura 11. Tolerancia acústica al ruido de espacios contiguos.

Fuente: elaboración propia

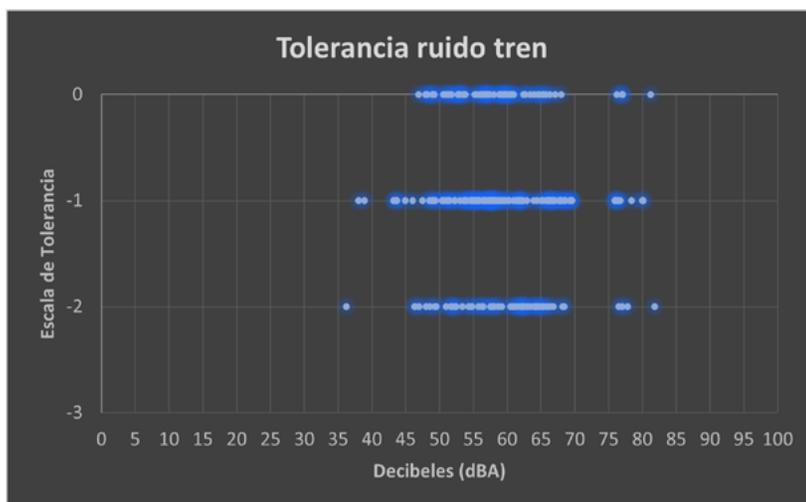


Figura 12. Tolerancia acústica al ruido del tren.

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

En esta investigación se buscó diagnosticar el umbral acústico que perciben los estudiantes de la Universidad de Colima, en específico, del campus 4 en el municipio de Coquimatlán. Una de las principales razones por las que se mostró interés en este campus fue la constante exposición al ruido causado por el paso del tren a escasos metros del campus.

Resultado del estudio, se identificó que el rango normal en el que los alumnos desempeñan sus actividades es entre los 45 y los 70dBA, un umbral inferior a lo reportado por otros autores (de Medieros et al., 2012) en zonas inmersas en la traza urbana. Sin embargo, cuando se hace presente el paso del tren, estos valores logran escalar hasta los 80dBA en algunos momentos, aunque no es lo normal.

En términos de la tolerancia al ruido, en general, más de tres cuartas partes del estudiantado (87% y 78%) considera que el ruido proveniente de los espacios contiguos o propios del espacio son tolerables, con valores entre los 50 y los 65 dBA. Y la tolerancia solo desciende hasta el 27% cuando se da el paso del tren, aunque los valores no sobrepasen la media de 70 dBA con picos hasta los 80 dBA.

Se puede concluir que una fuente sonora típicamente fuerte como lo es el tren, puede ser causal de intolerancia en espacios educativos por el mero hecho de elevar entre 5 a 15dBA el ruido ambiental del espacio por encima de las fuentes propias del espacio o de los espacios contiguos. Aunado a lo anterior, se puede suponer que al ser una fuente única y generalizada, esta cause mayor ausencia de confort a diferencia de múltiples fuentes de ruido de menor escala. Sin embargo, esta última hipótesis requiere mayor investigación para su comprobación.

Referencias

ASHRAE American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. (2004). ANSI ASHRAE, 55. *Thermal environmental conditions for human occupancy*.

Bañuelos Castañeda, Miguel. 2005. "Análisis de Los Niveles de Ruido Ambiental Por Tráfico Vehicular En Puntos Críticos de La Zona Metropolitana de Guadalajara y Actualización Del Mapa de Ruido." Universidad de Guadalajara, Guadalajara.

Benito Orejas, J. I., and J. C. Silva Rico. 2013. *Hipoacusia: Identificación e Intervención Precoces*. Valladolid.

Berglund, Birgitta, Thomas Lindvall, and Dietrich H. Schwela. 1999. "Guidelines For Community Noise." in *World Health Organization*. London.

Bullinger, M., S. Hygge, G. W. Evans, M. Meis, and S. von Mackensen. 1999. "The Psychological Cost of Aircraft Noise for Children." *Zentralblatt Fur Hygiene Und Umweltmedizin = International Journal of Hygiene and Environmental Medicine* 202(2-4):127-38.

Creative Research Systems®. (2012). Sample size calculator®. <https://www.surveysystem.com/sscalc.htm>

Cohen, Sheldon, Gary W. Evans, David S. Krantz, and Daniel Stokols. 1980. "Physiological, Motivational, and Cognitive Effects of Aircraft Noise on Children: Moving from the Laboratory to the Field." *American Psychologist* 35(3):231-43. doi: 10.1037/0003-066X.35.3.231.

Cohen, Sheldon, David C. Glass, and Jerome E. Singer. 1973. *Apartment Noise, Auditory Discrimination, and Reading Ability in Children 1,2*. Vol. 9.

Donáth, Tibor. 2006. "[Effects of Environmental Noises and Sounds on the Quality of Life Controlled by the Central Nervous System]." *Orvosi Hetilap* 147(16):737-39.

Dong, X., Wu, Y., Chen, X., Li, H., Cao, B., Zhang, X., Yan, X., Li, Z., Long, Y., & Li, X. (2021). *Effect of thermal, acoustic, and lighting environment in underground space on human comfort and work efficiency: A review*. *Science of the Total Environment*, 786, 147537. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147537>

Evans, Gary W., Staffan Hygge, and Monika Bullinger. 1995. "Chronic Noise and Psychological Stress." *Psychological Science* 6(6):333-38. doi: doi.org/10.1111/j.1467-9280.1995.tb00522.x.

Figueroa, Arturo, Jesus Garcia, Jorge Macias, Martha Orozco, Javier Garcia, and Alan Delgadillo. 2002. "Noise Levels at Critical Points in the Municipality of Guadalajara, Jalisco, Mexico." *The Journal of the Acoustical Society of America* 112(5):2376-2376. doi: 10.1121/1.4779653.

Gain Express Holdings. (2015). *SLM-25 Sound Level Meter Manual & Software*.

International Organization for Standardization 10551:1995. (1995). *Ergonomics of the physical environment — Subjective judgement scales for assessing physical environments*.

ISO International Organization for Standardization. (1998). ISO 7726:1998. *Ergonomics of the thermal environment-instruments for measuring physical quantities*.

ISO International Organization for Standardization. (2005). ISO 7730:2005. *Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.*

Medeiros, Adriane Mesquita, Ada Ávila Assuncao, and Sandhi Maria Barreto. 2012. "Absenteeism Due to Voice Disorders in Female Teachers: A Public Health Problem." *International Archives of Occupational and Environmental Health* 85(8):853–64. doi: 10.1007/s00420-011-0729-1.

Montaño, Figueroa, Orozco Medina, and Preciado Caballero. 2012. *Noise Levels in Connection with Learning and Perception in Elementary Schools of Guadalajara, Jalisco, Mexico.* Vol. 16.

NOISMART. 2020. "Terminología Acústica." 1–1.

Roldán, V., J. Corral, F. Marín, V. Vicente, and R. González-Conejero. 2004. "Effect of Factor VII -323 Del/Ins Polymorphism on the Daily Variability of Factor VIIc and INR in Steady Anticoagulated Patients with Acenocoumarol." *Journal of Thrombosis and Haemostasis : JTH* 2(12):2264–65. doi: 10.1111/j.1538-7836.2004.01027.x.

Smith, Andrew P., and Donald E. BroadBAent. 1981. *NOISE AND LEVELS OF PROCESSING.* Vol. 47.

Sociedad Española de Otorrinolaringología y Cirugía de Cabeza y Cuello. 2022. "¿Qué Efectos Causa El Ruido En La Salud Auditiva?" Retrieved February 19, 2023 (<https://seorl.net/efectos-ruído-salud-auditiva/>).

Tang, H., Ding, Y., & Singer, B. (2020). *Interactions and comprehensive effect of indoor environmental quality factors on occupant satisfaction.* *Building and Environment*, 167(September 2019), 106462. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106462>

Taylor, L., Watkins, S. L., Marshall, H., Dascombe, B. J., & Foster, J. (2016). *The impact of different environmental conditions on cognitive function: A focused review.* *Frontiers in Physiology*, 6(JAN), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00372>

Ugalde López, Carolina Adriana, Germán E. Fajardo Dolci, Rogelio Chavolla Magaña, Adriana Mondragón González, and Mayra I. Robles. 2000. *Hipoacusia Por Ruido: Un Problema de Salud y de Conciencia Pública.* Vol. 43.

Wang, C., Zhang, F., Wang, J., Doyle, J. K., Hancock, P. A., Mak, C. M., & Liu, S. (2021). *How indoor environmental quality affects occupants' cognitive functions: A systematic review.* *Building and Environment*, 193(September 2020), 107647. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107647>

Wu, H., Sun, X., & Wu, Y. (2020). *Investigation of the relationships between thermal, acoustic, illuminous environments and human perceptions.* *Journal of Building Engineering*, 32(September), 101839. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101839>

Wu, H., Wu, Y., Sun, X., & Liu, J. (2020). *Combined effects of acoustic, thermal, and illumination on human perception and performance: A review.* In *Building and Environment* (Vol. 169). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106593>

Yang, D., & Mak, C. M. (2020). *Relationships between indoor environmental quality and environmental factors in university classrooms*. *Building and Environment*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107331>

Arquitectura Bioclimática y Sustentabilidad a partir de acciones locales para obtener resultados globales

Gloria María Castorena Espinosa¹, Brenda Yazmín Juárez Guerrero²

1 Profesora investigadora de la Universidad Autónoma Metropolitana
Correo: gmce@azc.uam.mx

2 Profesora investigadora de la Universidad Autónoma Metropolitana
Correo: byjg@azc.uam.mx

Resumen

El artículo analiza la Municipalidad de Tepotzotlán, en particular al Conjunto monástico de los Excolegios Jesuitas, la arquitectura y su respuesta al clima y la sostenibilidad urbana como acciones locales alineadas a los Objetivos del Desarrollo Sostenible que hasta el momento han permitido obtener resultados globales.

Palabras claves: Arquitectura bioclimática, objetivos del desarrollo sostenible, sustentabilidad.

Abstract

The article analyzes the Municipality of Tepotzotlán, in particularly the monastic complex of the Jesuit Colleges, architecture and its response to climate and urban sustainability as local actions aligned with the Sustainable Development Goals that so far have allowed to obtain global results.

Keywords: Bioclimatic architecture, sustainable development goals, sustainability.

Introducción

La arquitectura es el albergue edificado por el hombre, para el desarrollo óptimo de sus actividades que a lo largo de su existencia en el planeta ha reflejado en su diseño la respuesta a una sociedad, su cultura y las necesidades que corresponden a su tiempo. En un principio esta expresión artística y funcional fue un cobijo como extensión de la naturaleza, que utilizó los recursos naturales del sitio. Los saberes del diseño y la construcción se fueron adaptando cada vez con mayor destreza a la naturaleza, la salud y la felicidad de los habitantes. Una ruptura en la evolución en el diseño arquitectónico se generó con los procesos de industrialización de productos a lo que la arquitectura no escapó, con resultados insalubres, un alto consumo de energía y un costo final elevado tanto en la construcción como en la operación de los edificios. Como respuesta surge la arquitectura autónoma, verde, bioclimática y sostenible, con principios de responsabilidad y dependencia responsable del agua, consciente de la permeabilidad del suelo, responsable en las emisiones de CO₂ al aire y de la calidad del mismo al interior de los espacios habitables, bajo un consumo racional de energías limpias y con la consciencia de preservación presente y futura de recursos naturales y su biodiversidad.

Una arquitectura en la que viva el hombre y conviva en armonía con la naturaleza. Una arquitectura que eduque y transforme a sus habitantes para alcanzar el bienestar y salud para el planeta y sus habitantes.

El efecto de progreso o desarrollo se ha dirigido desde hace más de tres décadas por la Organización de las Naciones Unidas a través de Objetivos de Desarrollo Sostenible que engloban acciones globales por un planeta y una vida sana. Principalmente es el Objetivo 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles el que busca la participación de los diseñadores, arquitectos y urbanistas para mitigar los impactos hacia el medio natural, para incentivar el uso de las herramientas tecnológicas y científicas que permitan ofrecer habitabilidad para todos, y alcanzar con ello otros objetivos del desarrollo, como lo es la salud y el bienestar del hombre y el planeta mismo.



Figura 1. Objetivos del Desarrollo Sostenible. Organización de las Naciones Unidas.

La Organización Mundial de la Salud define el estado de confort como: “un estado de bienestar en el cual cada individuo desarrolla su potencial, puede afrontar las tensiones de la vida, puede trabajar de forma productiva y fructífera, y puede aportar algo a su comunidad”. Este estado es un principio de Diseño arquitectónico y urbano que cubre el bienestar físico, biológico, mental y psicológico del hombre esto es una vida sana en ambientes saludable.

El informe de las Estadísticas de salud mundial 2016-2022 de la OMS publicado al 29 de mayo del 2023 recopiló un número mayor a 50 indicadores de salud que se relacionan con los Objetivos del Desarrollo Sostenible en el que observa un estancamiento del progreso de la salud en comparación con los datos 2000-2015, alertando sobre las amenazas de enfermedades, el cambio climático y los factores de riesgo a la “exposición a la contaminación del aire y doméstica”.

Es momento de preguntarnos: ¿Se ha alcanzado el bienestar físico, mental y emocional del hombre?, ¿Soy consciente de la problemática ambiental?, ¿Tengo un propósito de vida con acciones locales para alcanzar los acuerdos globales?

La Dra. Karla Yohannessen Vásquez de la Universidad de Chile en el Día mundial de la salud expone: “los problemas que afectan la salud de nuestro planeta son globalmente reconocidos como una amenaza, podría hacer posible que las sociedades se organicen y cambien sus modelos de progreso y formas de vida hacia un equilibrio natural con nuestro medio ambiente y nuestro planeta”.

En respuesta todos deseamos un sí, ya que la salud del planeta está estrechamente ligada a la vida, luego entonces, las acciones que realicemos, no importando lo pequeñas que nos parezcan, son necesarias, ya que a través de ellas estoy participando por mi salud, por tu salud, por nuestra salud, por la salud de otros y por la salud del planeta.

Antecedentes

Bajo el principio de la habitabilidad que busca bajo el marco normativo la relación óptima entre el hombre su entorno, la arquitectura responde adecuando el diseño al clima local y el confort biológico y psicológico del hombre; pero la adecuación al medio natural se encuentra en el biomimetismo, cuyo resultado surge a partir de observar la naturaleza la forma, función y asociación con su ecosistema, la salud y la armonía con el entorno.

Esta relación de los espacios habitables interiores y exteriores a su medio natural, que incluye el clima, la vegetación, los materiales y los recursos naturales, eran principio de orden de las civilizaciones antiguas en América, como se puede aún observar en las comunidades indígenas.

Los saberes de los ancianos alimentan la arquitectura vernácula que aún hoy en día son ejemplo de diseño arquitectónico en las comunidades indígenas en diferentes bioclimas en México.

En otro tiempo, la población novohispana, encontró en el conocimiento indígena y el europeo, la armonía de los saberes, y aunque no todos fueron utilizados, la sociedad naciente

fusionó la experiencia en ejemplos que aún están en pie de la arquitectura del virreinato. A continuación, se cita un párrafo textual de las Ordenanzas para el desarrollo de los nuevos asentamientos en México.

“Habiendo hecho la elección del sitio adonde se ha de hazer la poblaçion que como esta dicho a de ser en lugares lebantados adonde aya sanidad fortaleza y fertilidad y copia de tierras de labor y pasto leña y madera y materiales aguas dulçes gente natural comodidad de acarretos entrada y salida que este descubierto al viento norte // siendo en costa téngase consideraçion al puerto que no tenga al mar al mediodia ni al poniente si fuere posible no tengan cerca de si lagunas ni pantanos en que se crien animales venenosos y corrupción de aires y aguas”¹

Así muchos ejemplos de la arquitectura del Virreinato tienen en sus propios conceptos de diseño arquitectónico y urbano los principios de salud y bienestar.

Es el ejemplo del conjunto monástico que ocupó los Colegios Jesuitas en Tepotzotlán, Estado de México y que hoy albergan el Museo Nacional del Virreinato.



Figura 2. Ex colegio Jesuita de Tepotzotlán.

Fuente: Fotografía de Gloria Castorena



Figura 3. Templo de San Francisco Javier.

Fuente: Fotografía de Gloria Castorena

La Compañía de Jesús diseñaba y organizaba sus construcciones con base en el modo nostro, es una serie de normas elaboradas por Tristano² para la construcción de los edificios de la Orden, al modo propio de la Compañía de Jesús, de manera que fueran útiles, sanas y fuertes para habitar y para el ejercicio de los ministerios (Martí, 2010).

1 *Ordenanzas de descubrimiento, nueva población y pacificación de las Indias, dadas por Felipe II en 1573...según el original que se conserva en el Archivo General de Indias de Sevilla.* Madrid: Ministerio de la Vivienda, Servicio Central de Publicaciones.

2 Tristano trabajó para la elaboración de las bases del llamado *modus noster*, haciendo una mezcla de elementos precedentes de los monasterios benedictinos y de las casas palacio de las clases burguesas propias del Renacimiento. Burriera Sánchez Javier (2004) en Bolcato Custódio Luiz Antônio (2010) Tesis grado Doctorado. Ordenamientos urbanos y arquitectónicos en el sistema reduccional jesuítico guaraní de la paracuaria: entre su normativa y su realización. Universidad Pablo De Olavide. Sevilla

Objetivos

Este conjunto es analizado a partir de los Objetivos del Desarrollo Sostenible para evaluar el proceso de diseño, la construcción y la operación de los edificios en su relación con el clima y el estado de bienestar humano, así como la respuesta en el uso de los recursos naturales; lo que permite determinar las acciones locales y su respuesta global ante la sostenibilidad, la habitabilidad y el cambio climático.

Metodología

Con base en los Objetivos del Desarrollo Sostenible de la ONU, se evalúa el comportamiento de un conjunto de edificios que albergaron diversas actividades entre ellas las de educación a la par de la vida cotidiana del día a día.

Desarrollo

En la Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible, realizada en el año 2015 en la ciudad de Nueva York; en conciencia que, las acciones locales tienen impactos globales, que el desarrollo debe ser equilibrado, sostenible social, económica y ambientalmente, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) adoptó los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible.

El conjunto religioso que hoy alberga el Museo Nacional del Virreinato fue construido por la Orden de la Compañía de Jesús; está cimentado sobre antiguos asentamientos prehispánicos caracterizados por ser construcciones referidas a “[...] los movimientos del sol y los astros, tal y como se observa actualmente en la división ortogonal del eje norte sur y oriente poniente de los barrios antiguos.” (Castorena, 2011). Sobre estas construcciones se edificó la primera capilla franciscana, y los edificios que integraban el antiguo colegio de la Compañía de Jesús. El conjunto edilicio es un ejemplo de la arquitectura Virreinal que fusionó las técnicas y los conocimientos indígenas con los europeos. Es una construcción que se integra con el entorno; en su época albergó actividades de habitación, equipamiento, producción y recreación, entre otras, en total sostenibilidad y equilibrio con el medio. Ejemplos de forma y función sostenible que pudieran replicarse para lograr el cumplimiento de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible.

La Orden de la Compañía de Jesús la arriba a la Ciudad de México en 1572 y en 1580 llega a Tepotzotlán. Dos siglos después, los jesuitas habían construido un conjunto edificado que albergaba el colegio de niños indígenas, el de lenguas, el seminario de la orden, el terciado, una casa de aprobación, dos templos, dos atrios, dos claustros, varios patios y una extensa huerta. El conjunto edilicio se sustentaba en la solidez, la higiene y la austeridad, características de las construcciones jesuitas. En los aspectos formales y funcionales se adaptó al medio físico del lugar donde fue construido.

Fin a la Pobreza

El primer principio para eliminar la pobreza es el conocimiento; por lo que en el sitio se desarrollaron tres Colegios Jesuitas en donde se aprendían lenguas, ciencias, artes y oficios, lo

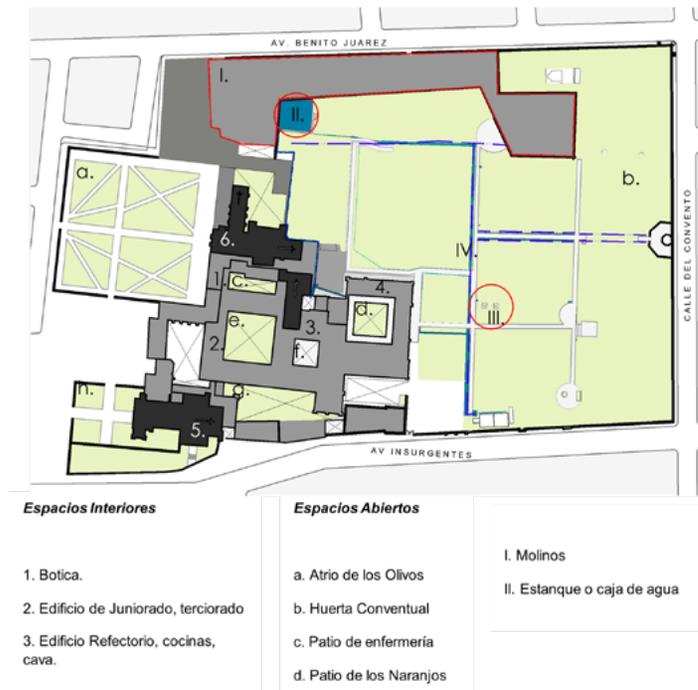


Figura 4: Conjunto del ex Colegio de San Francisco Javier, de Tepetzotlán. Espacios.

Fuente: Elaboración propia por Brenda Juárez.

que permitió no solo la comunicación con la población local, sino el intercambio de ideas y de expresiones artísticas.

Otra forma de poner fin a la pobreza es la producción de alimento y la preservación del mismo para su utilización racional a lo largo de las estaciones de producción y la reproducción de especies animales.

Un tercer principio para eliminar la pobreza es la medicina preventiva que permite mediar la salud a través de tópicos y bebidas utilizando de especies vegetales medicinales locales y las importadas del viejo continente como son las especies que pudieron sembrarse en el en el Patio de la Enfermería son las Flores y Semillas que se enlistan en el Inventario de Temporalidades (1767) como: Violeta, Azucenas, Rosas, Romero, Manzanilla, Perejil, Clavo, Pimienta, entre otras; en el inventario se leen aceites, raíces, espíritus... posiblemente utilizados para curar de las enfermedades y los malestares de los habitantes del colegio.

La Compañía de Jesús además de evangelizar a los indígenas, transformó algunas localidades en importantes puntos de producción y comercio, ejemplo de ello es Tepetzotlán y las localidades vecinas. Dentro del conjunto edilicio, anexos al colegio de San Francisco Javier, en Tepetzotlán, se edificaron dos molinos de trigo y se compraron tierras que ayudaron al sustento de la fundación (Díaz, 1982).

La producción de alimentos y otros productos, así como el comercio permitió que la zona se convirtiera en un punto importante dentro del Camino de Tierra Adentro, ruta terrestre que entre que recorría desde la Ciudad de México hasta Texas y Nuevo México.

El fin a la pobreza no se alcanzó para toda la comunidad, aunque recibieron las herramientas de conocimiento para aplicarlas en su vida, a la expulsión de los Jesuitas las Haciendas que producían la mayor parte de los productos alimenticios, pasaron a ser parte de la economía de un solo dueño y la explotación de la mano de obra indígena empobreció a la población local.

Hambre Cero

El conjunto edilicio se edificó en el terreno con mayor elevación del solar; mientras que la Huerta³ se ubicó en la parte baja en orientación este, para recibir la humedad natural de las escorrentías y el sol de la mañana, radiación solar se combina con las temperaturas del amanecer, lo que hace un ambiente propicio para las especies vegetales para iniciar con el proceso fotosintético. Adicionalmente los edificios no generan sombra resultando este emplazamiento las óptimas condiciones para potencializar la producción de alimento.

En cada misión vivía un sacerdote, generalmente auxiliado por un hermano coadjutor, y entre ambos organizaban el huerto que ayudaría a su sustento y serviría de modelo para los indígenas que debían instruirse en el cultivo (Gonzalbo, 1989).

El segundo espacio de producción agraria se dio en el Patio de la Enfermería, un polígono rectangular cuyos lados proporcionalmente largos tienen la orientación norte y sur para recibir de manera uniforme en todo el terreno la radiación proveniente del sol en orientación este. Este espacio recolectaba el agua de lluvia proveniente de las cubiertas de los edificios perimetrales al patio, por lo que un aljibe era el sistema de almacenamiento para garantizar el riego.



Figura 5: Patio de la enfermería. Parterres de Plantación, al centro aljibe de riego.

Fuente: Fotografía de Brenda Juárez.

3 “La huerta conventual novohispana [...] se convertía así en un laboratorio de experimentación botánica a partir del intercambio cultural que se originó con la asimilación de la tecnología indígena hidráulica para el riego, de árboles y cereales propios de la región, así como la adaptación de algunas especies europeas, ya que de España y del Lejano Oriente, los frailes, se trajeron semillas de una variedad de plantas (árboles frutales, vegetales, verduras, flores y cereales), que se aclimataron en tierras americanas, sobre todo, en las huertas de los conventos, y que ahora son popularmente conocidas, como la carne, la pimienta, el mango, la cebolla, los manzanos, etcétera.” (Cita Pérez Beltrui Ramona a Urquiza en Alva Zavala Raymundo).

La localización del edificio de mayor altura al norte protege del viento frío dominante del norte a las plantas, mientras que el esquema de patio ayuda a disminuir el efecto de las heladas, creando un microclima para su protección y producción.

Para evitar carecer de alimentos en los periodos en los que la planta crece antes de dar frutos o flores, los productos eran procesados aumentando con ello su periodo de vida útil antes de ser utilizados como alimento.

Para la conservación de Alimentos tenían un secador solar, se localiza inmediato a la esclusa de salida a la Huerta. Enmarcado por dos columnas que soportaban las piezas de madera en donde se colocaban las charolas orientadas hacia el sur, para recibir la máxima radiación solar a lo largo del día. Un depósito de agua en la base de las columnas evitaba que los roedores e insectos subieran a través de las columnas evitando con ello su acceso a los productos en proceso de deshidratación. Este sistema de preservación de alimentos permitía tener productos alimenticios conservando las propiedades y nutrientes.

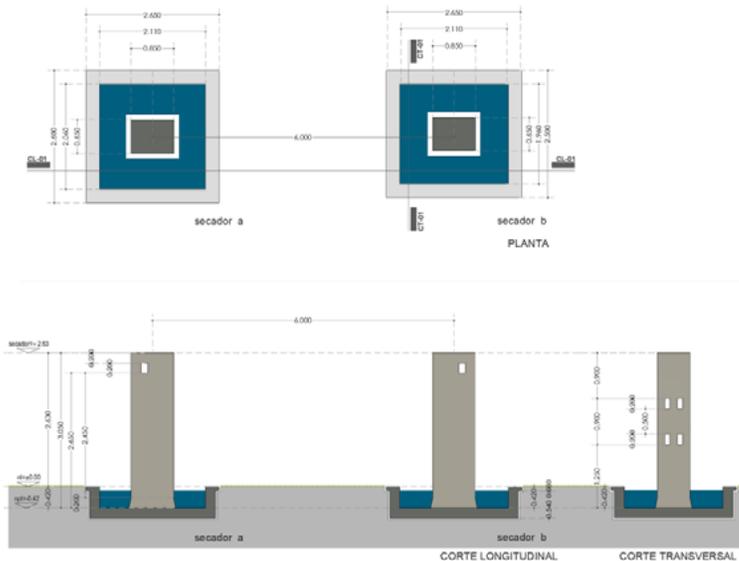


Figura 6: Levantamiento de secadores.

Fuente: Fotografía de Brenda Juárez.

La cocina de leña preparaba los alimentos, mientras que las cocinas de humo, preservaba las carnes y les daba un sabor único, al mismo tiempo que se alejaban los insectos y se ahumaban las viguerías como sistema insecticida.

Un sistema adicional para la preservación de alimentos y bebidas es la refrigeración, así en colindancia con el Patio de las Cocinas se localiza el frigorífico o cámara fría que a través del enfriamiento cuyo muro norte recibe el viento del norte y el paso del agua a través de un canal que baña el muro, creando un muro húmedo cuya temperatura radiante permite que la tempera interior sea 10 °C inferior a la temperatura del patio.

Con estos sistemas más los encurtidos o los sistemas de salado los alimentos que se producían en el sitio eran conservados al largo del año, en espera de la siguiente época de producción de las especies vegetales y arbóreas.

El cultivo para consumo de especies vegetales era de verduras, legumbres, hortalizas, árboles y arbustos frutales, las especies que más se repiten en las descripciones de los espacios abiertos de los espacios abiertos jesuitas son los Árboles de Olivo y las flores de Floripondios. En la antigua huerta a principios del siglo XIX se encontraron perales, perones, higueras, aguacates, duraznos y almendros.

En 2015 se realizó un levantamiento arbóreo de la huerta en donde encontraron 859 árboles de los cuales 52% son especies comestibles como el Aguacate criollo, Capulín, Chabacano, Durazno, Granada, Higo, Manzano, Tejocote, Membrillo, Mora, Nopal, Tejocote, Olivo y Zapote Blanco.

Salud y Bienestar

El sentir satisfacción con el medio circundante, implica tener espacios adecuados para el desarrollo de las actividades. En este sentido los beneficios se traducen en salud, felicidad y productividad.

La iluminación natural es un principio para encontrar bienestar en actividades humanas, ya que la fuente emisora que es el sol, ofrece en México más energía lumínica que la que se requiere en espacios interiores.

En relación al bienestar térmico de los usuarios la estrategia principal en el clima de Tepetzotlán es el calentamiento solar directo durante las mañanas a partir de la salida del sol, hasta las 11 horas en promedio, durante todo el año. Aprovecha el calentamiento solar pasivo a través de la radiación solar en forma indirecta, a través de la masa de la edificación, considerando las propiedades térmicas de los materiales para almacenamiento de la energía, con un retardo mayor a 8 horas. El sistema constructivo de los muros de cal y canto, con espesores mayores a un metro. El efecto de disminución de oscilación térmica (factor de decremento) se reduce a menos de 1% con muros de espesor mayor a 70 cm.

Para ilustrar el comportamiento térmico se realizó en Tepetzotlán, un análisis numérico de la temperaturas máximas y mínimas al exterior (T_o) en la cara interior de los muros para el mes de mayo en orientación norte. Con estos datos se calculó la oscilación de temperatura y el factor de decremento para este ejemplo.

Una estrategia que apoya en el confort térmico y la salud de los usuarios es la transición térmica, lumínica, higrométrica y acústica que genera el esquema de patio central con el corredor perimetral como elemento de amortiguamiento entre el espacio interior y el exterior, lo que ayuda a evitar cambios drásticos que estresan al cuerpo y lo tornan vulnerable a enfermedades por los cambios drásticos de ambientes.

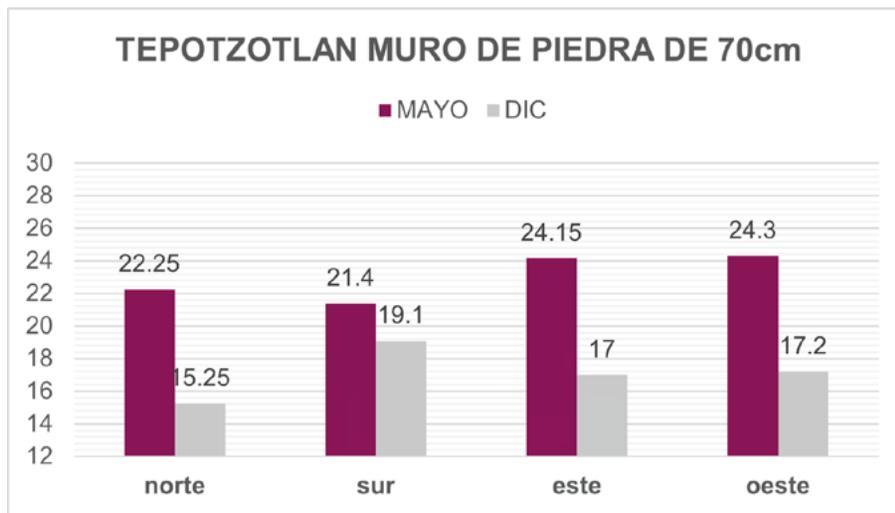


Figura 7: Gráfica de la temperatura interior del muro SC4 en mayo y diciembre en Tepotzotlán.

Fuente: Elaboración propia por Gloria Castorena.

Educación de Calidad

Los sistemas escolarizados estuvieron a su cargo, así como las artes, los oficios y los ejercicios espirituales y la evangelización de la población. Esta orden religiosa se distingue por la razón y la fe, principios que aplicaron en los colegios, universidades, seminarios y en los espacios religiosos como las iglesias a través de sus sermones.

La labor de los docentes jesuitas está marcada por una singularidad: la orden formulo un proyecto pedagógico original inspirado en el humanismo renacentista la ratio studium, sustentada en una concepción del cosmos y una idea del hombre y la historia: era la expresión y el vehículo de la espiritualidad. La Orden tenía destacadas obras en las áreas de física, astronomía, matemáticas, etnografía, lingüística y geografía. La alta especialización en las ciencias, artes y técnicas constituía un elemento fundamental del proyecto apostólico jesuita (Alfaro, 2001).

La educación se llevaba a cabo en los espacios destinados especialmente para ello, en claustros con pasillos cerrados, térmicos y silenciosos, iluminados a través de ventanas por un patio central.

La Biblioteca localizada en la planta alta del Claustro de los Naranjos se abría hacia el norte para aprovechar la iluminación difusa proveniente de la orientación norte. En este espacio se encuentran los libros antiguos que documentaron y albergaron los saberes de las ciencias, la filosofía, la música, religión y otros.

Educación para la razón y la felicidad de entender y aprender.



Figura 8: Patio de los Naranjos. Claustros cerrados en el nivel superior.

Fuente: Fototeca Constantino Reyes Valerio. Tepotzotlán. CLXXII-34.

Igualdad de Género

Los Colegios Jesuitas en sus edificios y espacios albergaron solo varones. Los jesuitas es la única orden religiosa que no tiene rama femenina. Sin embargo, en las comunidades en donde se asentaron los Jesuitas enseñaron a las mujeres pintura, solfeo, latín, literatura y escritura.

Agua Limpia y Saneamiento

El sistema de abastecimiento principal provenía de los manantiales localizados en el poniente del municipio. Para mejorar el caudal los Jesuitas, corrigieron el trazo del aplanche prehispánico de la hoy denominada Zanja Real que accedía a través de los Molinos y de ahí se almacenaba en un gran depósito abierto conectado con las áreas de producción de alimento.

El cauce del agua continuaba por canales abiertos para introducirse al Patio de las Cocinas y al Patio de los Naranjos, abasteciendo en cada uno las fuentes y los lavatorios, así como los servicios.

El agua de lluvia se captaba a través de las azoteas y se conducía a los patios los cuales contaban con depósitos subterráneos de almacenamiento de agua previamente filtrada en una caja de agua con elementos pétreos de diferente granulometría. El claustro de los aljibes se

caracterizaba por contar con dos depósitos conectados entre sí y enmarcados por dos pozos de los cuales se extraía el agua.

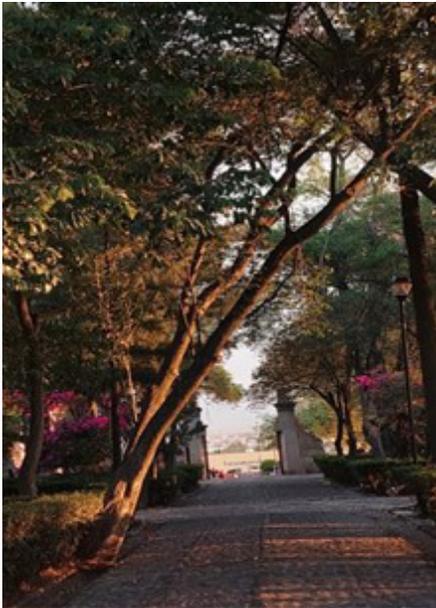


Figura 9: Atrio de los olivos.
Fuente: Fotografía de Gloria Castorena.



Figura 10: Patio de los Naranjos.
Fuente: Fotografía de Gloria Castorena.

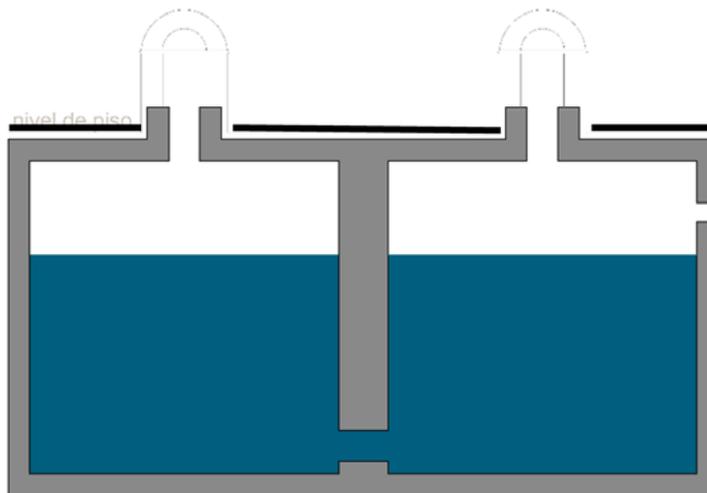


Figura 11: Corte transversal de los depósitos de agua ubicados en el Patio de los Aljibes.

Fuente: Ilustración redibujada por Brenda Juárez.

El sistema a nivel urbano y arquitectónico operaba por gravedad con cajas de agua para la elevación de los niveles del agua y para la distribución del vital líquido.

Una vez utilizada el agua, esta era tratada en dos plantas a través de un sistema con tres etapas: sedimentación, cámara aeróbica y cámara anaeróbica. Posteriormente era conducida a un campo de oxidación y finalmente infiltrada a través de pozos de absorción.



Figura 12: Fosa séptica vista de las celdas interiores.

Fuente: Fotografía de Brenda Juárez.

El agua limpia que no se utilizaba corría hacia el Río Hondo de Tepotzotlán alimentando e hidratando a su paso el subsuelo.

Agua limpia y saneamiento, les permitió disponer del vital líquido, utilizarlo, reutilizarlo, tratarlo en su propio ciclo.

Energía Asequible y no contaminante

Los principios de la física aplicados en el uso de la fuerza del agua están aplicados en los Molinos de Grano, conocidos como Molinos de Xuchimangas, que se sitúan en el lado norte y este del conjunto monástico, los cuales funcionaban con energía hidráulica. El agua proveniente de la presa de la Concepción, a través de la Zanja Real que pasaba por la Hacienda de Xuchimangas era la que hacía funcionar los molininos (Pastrana,2005).

Siendo el ejemplo de la primera industria de procesamiento, cuya función se distingue de las actuales, al utilizar el principio de Torricelli en los depósitos de agua para utilizar la fuerza de gravedad y el peso del agua como fuerza hidráulica en la molienda.

El **principio de Bernoulli** describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente. Esta fórmula se basa en los estudios desarrollados por Bernoulli en su obra Hidrodinámica (1738).⁴ Este principio se deriva del principio de conservación de la energía. En fluido constante como las lumbreras de los molinos del Museo Nacional del Virreinato, la suma de todas las formas de energía del agua, a lo largo de la línea con que fluye es la misma en todos los puntos de la línea. Bajo este principio los grandes cilindros ocuparon los desniveles del terreno para almacenar el agua proveniente de la Zanja Real y a través de la suma de la fuerza motriz, aplicadas en la caída de agua para mover las piedras circulares, la molienda se realizaba con energía limpia.

4 "Hydrodynamica". Britannica Online Encyclopedia. [Internet]. Disponible desde:< <https://www.britannica.com/biography/Daniel-Bernoulli#ref200813>>

Trabajo Decente y Crecimiento Económico

La Compañía de Jesús en Tepetzotlán con las Haciendas⁵ aumentó la producción y el crecimiento económico de la zona.

Los distritos en donde se repartieron más tierras fueron los que estaban situados al noroeste y al este de la ciudad de México, entre ellos Tepetzotlán. Las posibles haciendas que pertenecían al ex Colegio de San Francisco Javier fueron: Hacienda San Miguel de riego, Hacienda Xalpa en donde se realizaba labor, cría de ganado mayor y pulque, Hacienda Santa Inés de producción de cría de ganado mayor y Juchimangas de labor y pastos. (Von Wobeser, 1989).

La producción de la huerta y los molinos de ex colegio de San Francisco Javier servían para el mantenimiento de sus habitantes los excedentes se comerciaban, así como la producción de sus haciendas, esto el paso del Camino de Tierra Adentro o Camino de la Plata impulsaron el auge económico de Tepetzotlán durante el Virreinato.

La sociedad Virreinal, en comparación a las sociedades modernas, tuvo grandes sesgos sociales, por lo que el “trabajo decente” estaba muy distante de tener las connotaciones actuales. El propio caso de las haciendas jesuitas en donde trabajan esclavos, a quienes se adoctrinaban en la fe católica.

Industria innovación e Infraestructura

En su momento la molienda a través de la fuerza hidráulico fue innovador al utilizar energía limpia y transformar grandes volúmenes de grano en harina en periodo de tiempo corto.

La infraestructura hidráulica tuvo un avance con la construcción del acueducto denominado Arcos del Sitio, para llevar el agua al centro de población.

En el Siglo XVI los caminos se extendieron longitudinalmente 2560 km en un proyecto de comunicación para el comercio y el intercambio cultural entre el centro de la Ciudad de México hasta Santa Fe en el entonces territorio de México. Hoy se reconoce como Patrimonio de la Humanidad en el Itinerario Cultural (INAH 2010)⁶ el Camino de la Plata o Camino Real de Tierra Adentro con 1400 km.

Reducción de las Desigualdades

El acceso a la educación, a un trabajo digno y a contar con la infraestructura adecuada son factores que elevan el nivel de vida de los habitantes.

La oportunidad de asistir a la escuela para aprender a leer, escribir, lenguas y música, abría el panorama de oportunidades para los infantes de las localidades. La educación de los

5 La palabra “hacienda” en su acepción más general, significa “bienes posesiones y riqueza material.” Se denomina hacienda al conjunto de bienes que poseía un individuo, así como a los bienes pertenecientes a una comunidad, país o Institución.

6 INAH. Instituto Nacional de Antropología e Historia. (2019). *Sitios Inscritos en México*. [Internet]. Disponible desde: < https://patrimoniomundialmexico.inah.gob.mx/publico/listado_pm.php >

adultos les permitía desempeñarse en actividades productivas como agrícolas, incluso en las artes y oficios como maestros y alfareros.

La infraestructura para la distribución de agua es un tema primordial como índice de bienestar. La reconstrucción de los apantles para crear la Zanja Real que abasteciera de agua potable a las localidades y la construcción del Acueducto, ubicado en arcos del sitio, permitía que las personas de las localidades de Tepotzotlán pudieran ser abastecidas con el vital líquido.

Ciudades y Comunidades Sostenibles

Este ejemplo como se ha analizado considera en su proceso de diseño, construcción y operación cinco siglos en una reutilización de la función arquitectónica y aunque los servicios, los sistemas de iluminación, la acústica, han sido transformados y modernizados, se ha perdido con ello los ejemplos vivos y las estrategias de diseño bioclimático y sostenibilidad con la que vivieron eficientemente.

El estudiar esta comunidad religiosa y su relación con el asentamiento prehispánico, permite entender la asociación de principios y normas de edificación y sanidad en la arquitectura. Los Jesuitas sumaron tecnologías ambientales a la comunidad y la población local enseñó a los religiosos y al nuevo mundo como medir el tiempo, las estaciones, la producción de alimento eficiente y la utilización de las plantas como medicinas, así como el uso eficiente del uso del agua en la higiene y la salud a través del Temazcal y las propiedades curativas de las plantas nativas.

Producción y Consumismo Responsable

La producción de materia prima se realizó en un clima benigno, con el uso responsable del agua como se ha descrito anteriormente, lo que hizo de esta comunidad una sociedad educada, consciente del uso de los recursos naturales a través de las técnicas ancestrales, bajo los principios de habitabilidad. Sin embargo, estos saberes rompen el equilibrio con la introducción de nuevos materiales de construcción, con el entubamiento del agua, la privatización de los terrenos comunales y la transformación de una estructura económica y productiva a la propiedad ejidal que hoy tiene poca producción y que se ha tornado en un producto urbano irresponsable.

El agua anteriormente era gratuita y era responsabilidad de todos el cuidarla, hoy un litro de agua embotellada se paga en México a \$20 pesos y un litro de leche a \$23 pesos.

Los desechos eran biodegradable y el vidrio reutilizable. Según los datos de INEGI del 2018 se recolectaron 107,056 toneladas de desechos de los cuales el 42% son plásticos y solo el 1% es vidrio⁷ y hoy se paga por la recolección de desechos.

7 INEGI. Instituto Nacional de Geografía y Estadística. *Cuéntame de México*. [Internet]. Disponible desde: <https://patrimoniomundialmexico.inah.gob.mx/publico/listado_pm.php>

Acciones por el Clima

Los sistemas de uso de energía en la arquitectura del virreinato eran al 100% pasivos; hoy en día, aunque se generan 4,000 millones de vatios en instalaciones de energía solar en México (SENER al cierre del 2020) Se registraron más de 4,000 millones de vatios (MW) instalados de energía solar en México al cierre del 2020, solo 2 millones de viviendas, mientras el economista reporta 160,000 viviendas que utilizan generación de energía solar. tienen un sistema de las 35,219,141 viviendas particulares registradas en INEGI en México.

Ahorrar energía, utilizar fuentes renovables, energía limpia en la climatización pasiva de las edificaciones. Humidificar a través de fuentes, plantas y árboles los patios para controlar la temperatura, iluminar con luz natural los espacios en su uso diurno, así como diseñar la acústica de los espacios para aprovechar las formas y los materiales como reguladores del sonido, captar el agua de lluvia, utilizar el agua de manera racional, reutilizarla y tratarla así como incorporarla limpia al subsuelo y compartirla con todas las formas de vida; crear sistemas hidráulicos que operen por gravedad entre otras son acciones que reducen las emisiones de CO₂ al ambiente, que mitigan la isla de calor y con ello actúan por el Clima del planeta.

Vida submarina

No habiendo vida submarina, pero si acuática en Tepetzotlán que se localizaba en las orillas de los cinco lagos de la gran Tenochtitlán, la alimentación dependía de estos cuerpos de agua (quelite, papita de agua, verdolagas, amaranto, etc.). La movilidad era fluvial como lo demuestra la pintura localizada en la exclusiva de salida a la Huerta desde el Patio de los Naranjos.

Algunos relatos verbales mencionan que, en el estanque colindante con los Molinas y la Huerta, se reproducían peces, para poder tener proteína de manera fresca.

Y cuando se habla de la vida submarina, ¿pensamos en el agua dulce que utilizamos y que en la mayoría de los casos no tratamos antes de vertida a los ecosistemas marinos?

Vida de Ecosistemas Terrestres

En el Siglo XVI, XVII y XVIII se cuidaba y respetaba la vida porque el hombre dependía de ello. Si una población de animales terrestres disminuía la caza se detenía en espera de que la especie se regenerara. Se sembraban especies que se complementaban para evitar que la tierra perdiera sus componentes, se cuidaba y mantenía limpia el agua y con ella los ecosistemas aéreos, acuáticos y terrestres.

Por ejemplo, la víbora controlaba los roedores y a las víboras los tlacuaches que a su vez comían los frutos y posteriormente distribuían las semillas para tener nuevos árboles frutales, de equilibrio en equilibrio.



Figura 13: Río Chiquito de Tepetzotlán.

Fuente:Fotografía de Gloria Castorena.

La biodiversidad y la vida en los ecosistemas terrestres es compartida por el hombre, sin embargo, el crecimiento exponencial de una especie dominante como es el hombre pone en riesgo cualquier ecosistema y en riesgo la biodiversidad.

La ocupación de los ecosistemas terrestres de la Sierra de Tepetzotlán con unidades frágiles como los bosques de encino por la presión de la urbanización y la desvalorización de la unidad ambiental, pone en riesgo la calidad del aire, la cantidad de agua permeable, la diversidad biológica producto de las diferencias de altitud y de los suelos; pero sobre todo merma la salud del planeta.

Cuando entendamos que la salud del hombre depende de la salud del planeta cuidaremos nuestro espacio de vida con todos sus habitantes.

Paz, justicia e Instituciones sólidas

La paz y la justicia son necesarios para vivir en sociedad. La búsqueda de valores y normas creencias que permitan el buen comportamiento como individuo y como parte de una comunidad. Las instituciones religiosas impusieron una religión, pero también compartieron saberes que hoy se traducen en la sociedad que somos.

Cuando hay principios individuales, se tienen instituciones sólidas, porque las instituciones se integra por individuos.

El orden de la sociedad y sus instituciones se ha transformado, sin embargo los principios que les rigen deben ser los mismos que muchos de los principios que los religiosos enseñaron a su comunidad. “En el conjunto de sus compromisos en el mundo, la Compañía de Jesús busca el promover y hacer posible un mundo de paz. Lo realiza especialmente en el apostolado de la educación. Las escuelas, colegios y universidades de la red jesuita abren a los jóvenes al conocimiento mutuo, a compartir, a vivir como hombres y mujeres para y con los demás. De ese modo, ayudan a preparar el terreno para que la paz germine y crezca.”⁸



Figura 14: Atardecer en el Centro de Tepotztlán.

Fuente:Fotografía de Gloria Castorena.

Alianzas para lograr los objetivos

Las alianzas que en su momento realizaron la población oriunda con los religiosos, les llevaron a compartir el recurso hídrico por tandeo semanal, a tener derecho al territorio a través de donaciones de predios a los religiosos, alianzas para la educación, con el Colegio de Lenguas, el Colegio de Indios y el Seminario Jesuita, Alianza por las artes y los oficios en un intercambio y transculturación entre los dos mundos.

Hoy las alianzas se están llevando más allá del Conjunto Arquitectónico, en acciones a nivel urbano, con el desarrollo de proyectos desarrollados por Instituciones de Educación Superior y Posgrado como es la UAM-Azcapotzalco y la Universidad de Harvard en la Planeación Territorial y a través de Proyectos Estratégicos alineados a los Objetivos del Desarrollo Sostenible.

⁸ JESUITAS (2022). *¿Qué necesita el Mundo de Paz?*. [Internet]. Disponible desde < <https://www.jesuits.global/es/2022/01/01/que-necesita-el-mundo-paz/> >

Conclusiones

En el ejemplo analizado se evalúa el comportamiento arquitectónico y del conjunto bajo los Objetivos del Desarrollo Sostenible los cuales se cumplen en un 90% de su totalidad.

Las acciones que en su momento llevaron al diseño y construcción del conjunto; así como a la operación y vinculación con su entorno inmediato; permiten demostrar que se pueden dar soluciones e implementar acciones locales para climatizar pasivamente los espacios, para iluminarlos, como optimización acústica; para el bienestar y salud de los usuarios.

Es viable utilizar las diversas formas de energía que el clima local aporta, así como la energía que se puede producir a partir de los recursos naturales, como fuentes no contaminantes, de amplio potencial y beneficios ambientales.

La interacción de las acciones humanas con las del territorio, la consideración del entorno para el desarrollo de las sociedades, el respeto a la vida en todas sus formas, son directrices hacia el desarrollo sostenible del planeta. Plena conciencia en que las acciones en un lugar tienen repercusiones en el medio y según su dimensión en todo el mundo.

Las acciones locales, se suman con otras para dar soluciones globales ante los problemas ambientales, por la salud y el bienestar del planeta y la vida.

Bibliografía

ALFARO Alfonso (2001). *La educación los nudos en la trama*. Revista Artes de México. Número 51. Primera Edición

BOLCATO Custódio Luiz Antônio (2010) Tesis grado Doctorado. *Ordenamientos urbanos y arquitectónicos en el sistema reduccional jesuítico guaraní de la paracuaria: entre su normativa y su realización*. Universidad Pablo De Olavide. Sevilla

Britannica Online Encyclopedia. [Internet]. Disponible desde: < <https://www.britannica.com/biography/Daniel-Bernoulli#ref200813> >

CASTORENA Espinosa Gloria (2010) Tesis grado Maestría. *Estrategias de diseño bioclimático y ecotecnologías aplicadas al ex colegio Jesuita de Tepetzotlán*. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, división de ciencias y artes para el Diseño. México

CASTORENA Espinosa Gloria (2021) Tesis grado Doctorado. *Sustentabilidad en los edificios religiosos del siglo XVII y XVIII en México Análisis comparativo por bioclima en tres casos de estudio*. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, división de ciencias y artes para el Diseño. México

DÍAZ Marco (1982). *“La arquitectura de los Jesuitas en la Nueva España”*. Universidad autónoma de México. Primera edición

INAH. Instituto Nacional de Antropología e Historia. (2019). *Sitios Inscritos en México*. [Internet]. Disponible desde:

<https://patrimoniomundialmexico.inah.gob.mx/publico/listado_pm.php>

INEGI. Instituto Nacional de Geografía y Estadística. *Cuéntame de México*. [Internet]. Disponible desde: <https://patrimoniomundialmexico.inah.gob.mx/publico/listado_pm.php>

JESUITAS (2022). *¿Qué necesita el Mundo de Paz?* [Internet]. Disponible desde <<https://www.jesuits.global/es/2022/01/01/que-necesita-el-mundo-paz/>>

JUÁREZ Guerrero Brenda Yazmin (2015). Tesis Grado Maestría. Espacios abiertos del antiguo Colegio de San Francisco Javier. Propuesta de intervención paisajista en la huerta. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, división de ciencias y artes para el Diseño. México

MARTÍ Monica (2010). *Arquitectura jesuita para la formación: noviciado y juniorado en el colegio de Tepotzotlán*. Revista Dimensión Antropológica. [internet] Año 17, vol. 49, mayo-agosto. Disponible desde: <<http://www.dimensionantropologica.inah.gob.mx/?p=4860>>

PASTRANA Salcedo Tarsicio (2005). Tesis Grado Maestría. *Molinos Hidráulicos harineros Molinos de Xuchimangas*. Restauración de Monumentos. Universidad Nacional de México

PEREZ Bertruy Ramona (s.f.). Artículo. *Proyecto de recuperación de los jardines y huerta del placer, ex convento de Churubusco siglo XVII, Ciudad de México*. [Internet]. Disponible en <<http://www.doaks.org/research/garden-landscape/project-grant-reports/Onofreprojectgrantreport.pdf>>.

PEZA Puga Consuelo (1949) *Tepotzotlán Historia, Arte y Leyenda*. México: Porrúa.

PINEDA Alillo Julieta (2020). Tesis grado Doctorado. *El vivir cristianamente adoctrinamiento de los esclavos de origen africano por parte de la Compañía de Jesús en la Nueva España 1572-1767*. El Colegio de Michoacán, Centro de Estudios Históricos. México

VENEGAS, Thelma (1996). *Intervenciones en el museo nacional de virreinato (1991-1994)*. Museo Nacional del Virreinato (comp.) Tepotzotlán ayer y hoy, 30 aniversario Museo Nacional del Virreinato. México

VON WEBESER Gisela (1987) Haciendas como fuente de ingreso para el sostenimiento de los colegios de la Compañía de Jesús en la época colonial. *Boletín del Instituto de Investigaciones Históricas*. Volumen 22. 30-36.

Archivos

Archivo Nacional de Chile, Colección Bravo, Documentos sobre los jesuitas expulsos de México, Documentos relativos a la expulsión del Colegio de Tepotzotlán.

Archivo General de Indias de Sevilla. Madrid: Ministerio de la Vivienda, Servicio Central de Publicaciones.