

ESTUDIOS DE ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA

• VOL. I •

• ENERO-DICIEMBRE 2022 •

PUBLICACIÓN ANUAL DE INVESTIGACIÓN EN DISEÑO

Dr. Víctor Fuentes Freixanet
Dr. Héctor Valerdi Madrigal

Coordinadores



Universidad Autónoma Metropolitana

Dr. José Antonio de los Reyes Heredia
Rector General

Dra. Norma Rondero López
Secretaría General

Unidad Azcapotzalco

Dr. Oscar Lozano Carrillo
Rector de la Unidad

Dra. Yadira Zavala Osorio
Secretaría de la Unidad

Mtro. Salvador Ulises Islas Barajas
Director de la División de Ciencias y Artes para el Diseño

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

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

Mtra. Gloria María Castorena Espinosa (Coordinadora) | Mtra. Irma López Arredondo | D.C.G. Laura Elisa León Valle | Dr. Gabriel Salazar Contreras | Dr. Francisco Gerardo Toledo Ramírez | Mtro. Saúl Vargas González
Consejo Editorial de la División de Ciencias y Artes para el Diseño

Dra. Luisa Regina Martínez Leal (Presidenta) | Dra. Elizabeth Espinosa Dorantes | Dra. Gloria María Castorena Espinosa | Dra. Luisa Regina Martínez Leal | Dra. Ma. Itzel Sainz González | Mtra. Adriana Acero Gutiérrez | Dr. Fernando Rafael Minaya Hernández | Dr. Fausto Rodríguez Manzo
Comité Editorial de la División de Ciencias y Artes para el Diseño

Dr. Víctor Fuentes Freixanet | Dr. Héctor Valerdi Madrigal
Coordinadores de la Edición

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

ESTUDIOS DE ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA. Año 2022, Volumen I. Enero-diciembre de 2022, 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/anuario.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: 22 de diciembre del 2022. Tamaño del archivo 41 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.



ÍNDICE

Presentación	5
Los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Arquitectura	9
Aumento de la Temperatura Superficial del Mar: Principios de Diseño Arquitectónico Fundamentales para una Vida Sostenible en el Futuro Inmediato	31
Determinación de Estrategias de Diseño Bioclimático para Obtener Condiciones de Confort en la Arquitectura	53
El Empleo de la Metodología BIM en el Diseño Bioclimático	91
Efecto de la NMX-C-460-ONNCCE-2009 sobre el Comportamiento Térmico en Viviendas de Interés Social en Clima Templado Sub-Húmedo	109
Construcción de Índice de Habitabilidad Térmica para Espacios Públicos Exteriores	125
Desempeño Bioclimático de una escuela de Carlos Leduc en clima cálido sub-húmedo	145
Arquitectura Bioclimática para la salud ante el COVID-19: Clínica Materno Infantil Ricardo Flores Magón	165
Intercambiador de Calor Tierra-Aire en Clima Mediterráneo. Periodo Térmico de Transición Frio-Calor	185
Bahareque de bambú. Propuesta modular en base al desempeño térmico y mecánico	199
Fabricación del Bloque Residual a Base de Bagazo y Vinaza del Agave Mezcalero, Lodo de Papel y Tierra Arcillosa	215
Propiedades de la Cal y su Relación con la Calidad del Aire y la Salud de los Ocupantes en las Edificaciones	239
Physical and Numerical Analysis of Bioclimatic Strategies Implemented on Social Housing	265

Presentación

El arquitecto que diseña con el sol, el viento y el agua construye una arquitectura que se complementa y adapta al clima como segundo cobijo de la humanidad, siendo el primero el planeta tierra, que ofrece en un orden dispuesto el espacio para el desarrollo de la vida y los intercambios dinámicos de energía.

En los últimos 80 años la calidad de vida de la población humana se ha visto afectada por el uso de combustibles fósiles altamente contaminantes en los procesos de producción y generación de energía para el transporte y la transformación de la materia; como consecuencia, el incremento de gases de efecto invernadero dan como resultado el aumento de temperatura en el planeta y la afectación a nivel ecosistema con las subsecuentes alteraciones del hábitat.

Conscientes del problema del Cambio Climático y sus consecuencias, los profesores-investigadores del Área de Investigación Arquitectura Bioclimática del Departamento de Medio Ambiente, de la División de Ciencias y Artes para el Diseño, aportan a través de la Revista Científica Estudios de Arquitectura Bioclimática, en su volumen XVII, los resultados de las líneas de investigación que sustentan la Especialización en Diseño Ambiental y el programa de Maestría y Doctorado en Diseño Bioclimático.

Trece artículos estructuran la publicación en líneas prioritarias de investigación, las cuales forman parte de los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible de la Organización de la Naciones Unidas.

En el artículo Los objetivos de Desarrollo Sostenible y la Arquitectura, el Dr. Fuentes- Freixanet retoma las estrategias y medidas urgentes que los países deben realizar a favor de los seres humanos, el planeta y la prosperidad con un aporte innovador dirigido hacia las acciones de una arquitectura bioclimática participativa.

El Cambio Climático se aborda en el artículo titulado Aumento de la Temperatura Superficial de Mar en el que el Dr. Figueroa habla sobre la intensificación de los fenómenos naturales y las consecuencias el diseño, la construcción de edificaciones colindantes a cuerpos de agua y en zonas inundables. El problema lleva a soluciones de diseño para áreas costeras a través de alternativas de Geodiseño y de Arquitectura Bioclimática Sustentable.

Un aporte ante el cambio climático es el diseño de una arquitectura que opere en forma pasiva, utilizando la energía limpia que aporta el medio. El Mtro. Arandas y el Dr. Fuentes-Freixanet, en su artículo Determinación de Estrategias de Diseño Bioclimático para Generar Condiciones de Confort en la Arquitectura analizan las estrategias globales y locales de los principales investigadores del confort en función del análisis climático para ser aplicadas en la arquitectura.

La tecnología ha avanzado a través de programas que permiten el modelado virtual de las edificaciones con una realidad constructiva. En el escrito El Empleo de la Metodología BIM en el Diseño Bioclimático los autores Rivera, López, Fuentes y Velázquez refieren la especialidad ambiental de BIM con aplicación en: evaluación energética, diseño bioclimático, ciclo de vida de la edificaciones y análisis bioclimático.

En México se han desarrollado Normas Oficiales para mejorar el comportamiento térmico de la envolvente de las edificaciones. El estudio Efecto de la NMX-C-460-ONNCCE-2009 sobre el Comportamiento Térmico en Viviendas de Interés Social en clima Templado Sub-Húmedo evalúa el efecto de la implementación obligatoria de la norma. Las autoras Vázquez, Sotelo y Grajales analizan el efecto de la resistencia térmica, valor "R" en un clima Templado sub-húmedo con dos sistemas constructivos característicos de la zona climática en el Bajío en una vivienda de interés social, con el objetivo de mejorar las estrategias de diseño y ofrecer bienestar a los usuarios.

La vivienda social es un reto para los diseñadores de espacios; es por ello que Real, Velázquez, Orduña y González abordan el tema del Análisis Físico y Numérico de estrategias bioclimáticas y su implementación en Vivienda Social. El estudio presenta los resultados de una propuesta aerodinámica para la eficiencia energética en una vivienda ubicada en una zona urbana de alta densidad. El prototipo es evaluado a través de un modelo a escala en el túnel de viento y de un modelo numérico.

Martín del Campo, Bojorquez y García, autores del artículo Construcción de Índice de Habitabilidad Térmica para Espacios Públicos Exteriores, desarrollan indicadores de habitabilidad para espacios exteriores. La experimentación se realizó en un clima cálido semi-seco con resultados de preferencia de sensación térmica de calor.

La investigación Desempeño Bioclimático de una Escuela de Carlos Leduc en Clima Cálido Sub-Húmedo, bajo la autoría de Gómez-Amador, Gómez-Azpeitia y Espinosa, analiza comparativamente el comportamiento térmico y el efecto del viento como sensación térmica en dos aulas escolares edificadas en dos periodos de tiempo diferentes, pero en el mismo clima.

Uno de los retos en los últimos dos años ha sido la implementación de la ventilación en espacios de salud, como lo describe el escrito *Arquitectura Bioclimática para la salud ante el COVID-19*. El artículo muestra el diseño de un área destinada a enfermedades respiratorias en la Clínica Materno Infantil Ricardo Flores Magón, así como sistemas de iluminación natural, salas de espera en áreas abiertas, estrategias de climatización pasiva y elementos de arquitectura del paisaje como premisas de diseño para la recuperación de los pacientes.

En *Intercambiador de Calor Tierra-Aire en Clima Mediterráneo, Periodo Térmico de Transición Frío-Calor*, Martínez-Bermúdez, Fuentes-Freixanet y Rincón-Martínez analizan las afectaciones de la humedad en la salud de los usuarios y el control a través de la temperatura y la ventilación mediante un intercambiador de calor tierra-aire y una chimenea solar como sistema pasivo de regulación higrotérmica en una vivienda de interés social.

El análisis, la documentación y el uso de sistemas constructivos con materiales locales en la arquitectura por su valor ambiental son los principales objetivos de la investigación *Bahere-que de Bambú. Propuesta Modular en Base al Desempeño Térmico y Mecánico*. En ella, Esparza, Cabrera, Torres, Tovar y Elizondo, autores del artículo de investigación, desarrollaron el prototipo del sistema mejorado en su resistencia mecánica, generando nuevos factores y proyectos subsecuentes para evaluar la durabilidad a la intemperización.

Tovar, Luría, Esparza, Vargas y Gonzáles participan en la publicación con el escrito titulado *Fabricación del Bloque Residual a Base de Bagazo y Vinaza del Agave Mezcalero, Lodo de Papel y Tierra Arcillosa*. Se propone un material innovador, no contaminante y económico con la reutilización de desechos en procesos industriales. El sistema arroja un costo bajo y ofrece confort y accesibilidad a la vivienda en Oaxaca. En el artículo se muestran los resultados de una primera etapa de evaluación del prototipo.

Tovar y García presentan en el artículo *Propiedades de la Cal y su Relación con la Calidad del Aire y la Salud de los Ocupantes en las Edificaciones* las ventajas ambientales y para la salud que la cal ofrece como material, principalmente para recubrimientos. Las conclusiones se basan en la experimentación de acabados con diferentes componentes para determinar la eficiencia en el control de humedad, alcalinidad, higroscopicidad y carbonatación.

La *Revista Anual de Investigación en Diseño Estudios de Arquitectura Bioclimática* es resultado de un esfuerzo especial en esta ocasión al superar las consecuencias de los dos años pandémicos, por lo que expreso un reconocimiento a través del Área de *Arquitectura Bioclimática* al esfuerzo, trabajo, responsabilidad y compromiso de los profesores e investigadores que son autores y cuerpo de esta publicación.

Ser un arquitecto consciente es sentir, pensar y actuar con conocimiento. Este es el propósito que busca transmitir a sus lectores *Estudios de Arquitectura Bioclimática Volumen XVII*.

Gloria María Castorena Espinosa

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Arquitectura

Dr. Víctor Armando Fuentes Freixanet¹

¹ Universidad Autónoma Metropolitana | Departamento de Medio Ambiente, CyAD |
Correo: ffva@azc.uam.mx

Resumen

El planeta Tierra está pasando por una crisis ambiental y climática y la humanidad por crisis de desarrollo social, económico y actualmente una crisis de salud. Los países, a través de la Organización de las Naciones Unidas, están tratando de ponerse de acuerdo en cómo atenuar o solucionar estos problemas que enfrentamos. A través de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y las Conferencias de las Partes (COP) se trata de reducir las emisiones de CO₂ tratando de frenar el Calentamiento Global. Por otro lado, la Agenda 2030 de Naciones Unidas y sus Objetivos de Desarrollo Sostenible establecen acciones a favor de las personas, el planeta y la prosperidad, tratando de erradicar la pobreza, el hambre y lograr la igualdad de género. Estos objetivos están integrados son indivisibles y equilibran las tres dimensiones del desarrollo sostenible: económica, social y ambiental.

A pesar de los esfuerzos realizados, las metas establecidas para reducir el Calentamiento Global y para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible no se están logrando. Ante la gravedad de los problemas se requiere de la participación de todos. Como arquitectos tenemos que actuar profesionalmente con responsabilidad apoyando estas metas y objetivos comunes.

En este documento se trata de mostrar en qué sentido la arquitectura puede contribuir, tanto en la reducción del Calentamiento Global, la consecución de los objetivos de Desarrollo Sostenible y en crear espacios más saludables para el hombre.

Palabras clave: Objetivos de Desarrollo Sostenible, Cambio Climático, Arquitectura.

Abstract

The planet Earth is going through an environmental and climate crisis, and humanity is going through a crisis of social and economic development, today we are also facing a global

health crisis. Countries, through the United Nations, are trying to agree on how to mitigate or solve these problems that we face. Through the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) and the Conferences of the Parties (COP), the objective is to reduce CO₂ emissions by trying to stop Global Warming. On the other hand, the United Nations 2030 Agenda and its Sustainable Development Goals establish actions in favor of people, planet, and prosperity, trying to eradicate poverty, hunger and achieve gender equality. These objectives are integrated and indivisible and balance the three dimensions of sustainable development: economic, social, and environmental.

Despite the efforts made, the goals established to reduce Global Warming and to achieve the Sustainable Development Goals are not being achieved. Due to the seriousness of the problems, everyone's participation is required. As architects, we must act professionally with responsibility in support of these common goals.

This document tries to show how architecture can contribute, both in the reduction of Global Warming, the achievement of the Sustainable Development objectives, and in the creation of healthier spaces for people.

Keywords: Sustainable Development Goals, Climate Change, Architecture.

Introducción

En el año 2015 se llevó a cabo la 21ª Conferencia sobre cambio climático en París la COP21, Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, ONU. Después del el Protocolo de Kioto, en Acuerdo de París marcó un punto de inflexión en los acuerdos de las naciones por frenar el cambio climático. 197 países se comprometieron con el objetivo de combatir y mantener el aumento de la temperatura global a 2 °C a partir de la reducción de los gases de efecto invernadero, esforzarse por limitar el aumento de la temperatura a 1.5 °C. (NU, 2015)

El Panel Intergubernamental sobre el Climático de las Naciones Unidas elaboró un reporte especial sobre los impactos que pueden presentarse con un calentamiento de 1.5 °C con el fin de reforzar las acciones mundiales ante la amenaza de sobrepasar este límite (IPCC, 2019)

En este reporte se establecen varios escenarios. El primero es si se logran eliminar las emisiones de CO₂ en el año 2055 y el forzamiento radiativo neto distinto del CO₂ se reduce a partir del año 2030. El segundo, si se lograra una reducción más rápida del CO₂ que se traduciría en una mayor probabilidad de limitar el calentamiento a 1.5 °C. y el tercer escenario en donde no se logra reducir el forzamiento radiativo neto distinto del CO₂ y por lo tanto la probabilidad de limitar el calentamiento a 1.5 es menor.

En la figura 1 se observan los tres escenarios y la línea de tendencia del calentamiento actual. En el año 2017 la temperatura mostraba un aumento de poco más de 1°C, y para el año 2020 el aumento ya es de 1.2°C, por arriba de la línea de tendencia prevista.

Las emisiones acumuladas de CO₂ y el futuro forzamiento radiativo distinto del CO₂ determinan la probabilidad de limitar el calentamiento a 1,5 °C

a) Cambio en la temperatura global observada y respuestas de los modelos a las trayectorias estilizadas de las emisiones antropógenas y del forzamiento

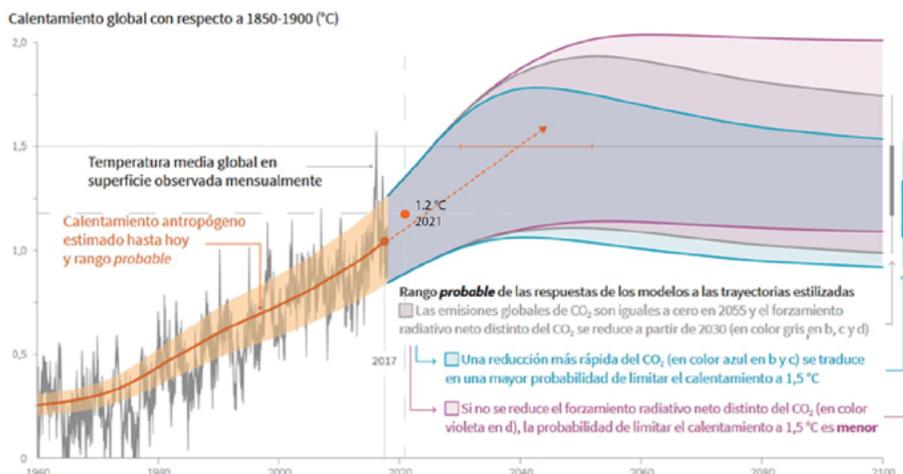


Figura 1. Con base en IPCC (2019) Calentamiento global de 1,5. Resumen para responsables de políticas. Grupo intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático. OMM – PNUMA

En el año 2021 se llevó a cabo la COP26 en la ciudad de Glasgow. En esta conferencia se ratificó la necesidad de reducir las emisiones de CO₂ y demás gases de efecto invernadero con el fin de evitar el riesgoso aumento de temperatura por arriba de 1.5°C. Sin embargo, los escenarios actuales no son nada alentadores.

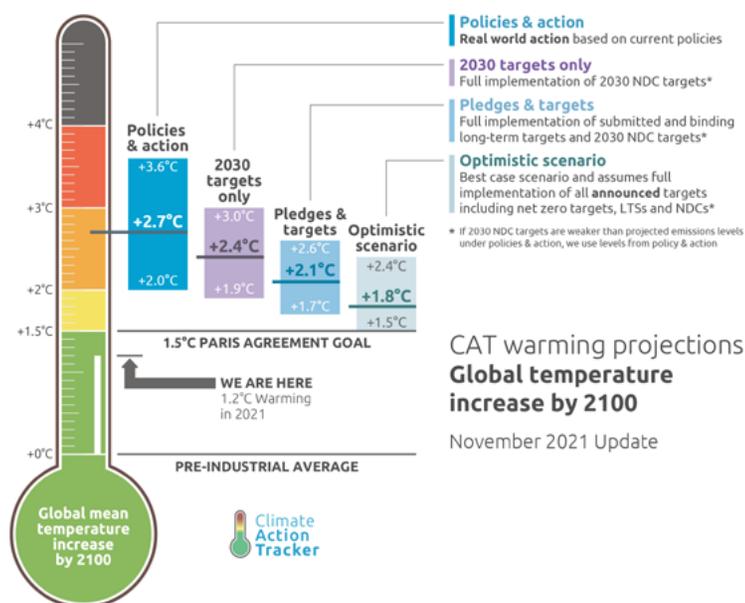


Figura 2. Warming Projections Global temperature increase by 2100 (CAT, 2021)

De acuerdo con los estudios de Climate Action Tracker (CAT, 2021) se presentan cuatro escenarios:

- Políticas y acción: Acción en el mundo real basada en las políticas actuales.
- Sólo los objetivos del año 2030: Implementación total de los objetivos de las Contribuciones Nacionalmente Determinados (NDC) para el año 2030.
- Compromisos y Objetivos: Implementación total de los objetivos a largo plazo obligatorios acordados (LTS) más los objetivos 2030 NDC.
- Escenario Optimista: El mejor de los escenarios que asume la total implementación de los objetivos anunciados, incluyendo los objetivos “Net Cero”, los objetivos a largo plazo (LTS) y las contribuciones Nacionalmente acordadas para el año 2030 (NDC).

Estos escenarios parten de la temperatura global estimada de 1.2 °C en el año 2021 y toman como base la meta acordada de París de 1.5 °C. Si se sigue únicamente con las políticas actuales se estima que la temperatura aumentaría 2.7 °C para el año 2100. Si se implementa el total de las contribuciones determinados por cada nación para el año 2030. La temperatura aumentaría 2.4 °C. Si además se implementaran todos los objetivos y obligaciones aceptadas, la temperatura aumentaría 2.1 °C. y en el escenario optimista supone el cumplimiento total de los objetivos anteriores mas todos los objetivos anunciados más la meta de Net Cero emisiones de CO₂, en cuyo caso la estimación media es un aumento de 1.8 °C. Como se aprecia, difícilmente se alcanzará la meta de 1.5 °C, pero se podría quedar por debajo de los 2 °C de aumento.

Los Objetivos del Desarrollo Sostenible

Otro elemento importante de referencia es la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, Resolución aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas el 25 de septiembre del año 2015.

“Esta agenda es un plan de acción en favor de las personas, el planeta y la prosperidad que tiene por objetivo fortalecer la paz universal dentro de un concepto más amplio de libertad. Reconociendo que la erradicación de la pobreza en todas sus formas y dimensiones, incluida la pobreza extrema, es el mayor desafío a que se enfrenta el mundo y constituye un requisito indispensable para el desarrollo sostenible.” (NU, 2015b)

En esta agenda se definen los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible. Ellos se pueden agrupar en dos grupos: aquellos orientados a mejorar la calidad de vida y el bienestar de las personas, y los que tratan de asegurar la disponibilidad de recursos para la humanidad. El impacto puede ser en la sociedad, en la economía o en la biodiversidad y el medio ambiente.

Desde la definición de estos objetivos, se creó un índice para medir su cumplimiento por parte de los países. Desafortunadamente el índice mundial de los Objetivos de Desarrollo Sustentable disminuyó en el año 2020 debido a los efectos negativos provocados por la pandemia de Covid-19.

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE



Figura 3. Objetivos del Desarrollo Sostenible – ONU.

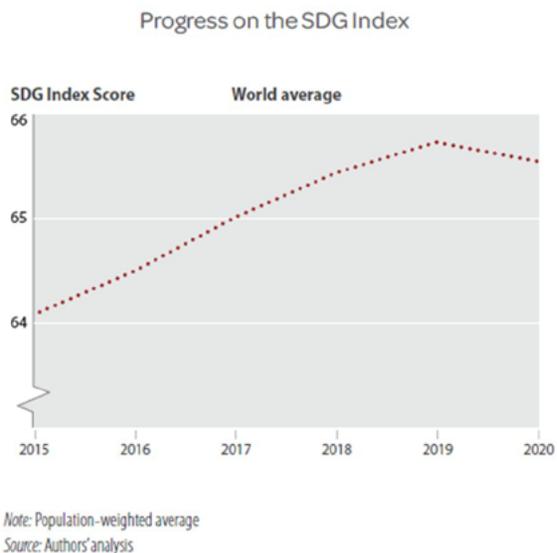


Figura 4. Progreso del índice de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

En el caso de México, en el año 2015 cuando empezó el índice, México se ubicaba en el puesto número 34 de 34 países medidos, con un índice de 49.1 sobre 100. En los años siguientes el número de países evaluados aumentó hasta los 165 actuales.



Figura 5. Progreso del índice de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en México.

Actualmente el índice de México es 61.1 sobre 100 y ocupa el número 80 de 165 países evaluados.

El país con el mayor índice es Finlandia con 85.9 y el país con el menor índice es Sur Sudan con 43.7. Como puede apreciarse el nivel de cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sustentable en promedio mundial está por debajo de 66/100. Por lo que es necesario que los países se comprometan seriamente en su cumplimiento. En todo caso se ve difícil que el objetivo de la Agenda 2030 se cumpla, y así mismo será difícil lograr la meta de disminuir las emisiones de CO₂ para limitar el incremento de temperatura del planeta a 1.5 °C. No obstante, no podemos esperar a que los gobiernos soluciones a estos problemas, todos debemos hacer lo posible por aportar soluciones de acuerdo con lo que nos corresponde hacer. En el gremio de los arquitectos se dio un paso importante en temas de sustentabilidad desde el año 2009 en la COP15, cuando la UIA (International Union of Architects) emitió la declaratoria de Copenhague con el objetivo de reducir o revertir los impactos negativos de medio construido en el clima global. (UIA, 2009)

El lema central de la declaratoria es “La Sustentabilidad a través del Diseño”, dejando de manifiesto que el diseño es clave para lograr la sustentabilidad de los espacios habitables, tanto urbanos como arquitectónicos. Ciertamente, tomando los Objetivos de Desarrollo Sustentable como base, los arquitectos tenemos acción directa en seis de ellos.

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

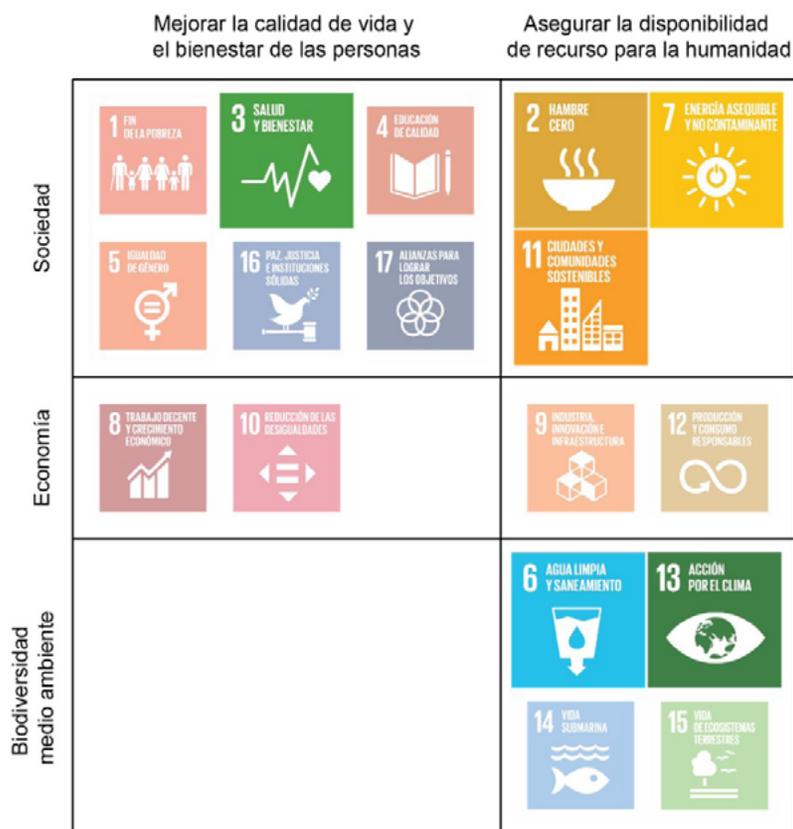


Figura 6. Objetivos de Desarrollo Sostenible con acción directa de los arquitectos.



Objetivo 3:

Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades.

“La salud es un estado de completo bienestar físico, mental y social, y no sólo la ausencia de afecciones o enfermedades” (WHO, 1948)

La salud de las personas empieza en los espacios habitables, ya que en gran medida ellos determinan el bienestar físico, mental y social de las personas que los habitan. Al hablar de espacios se deben considerar tanto los espacios abiertos como cerrados, urbanos y arquitectónicos.

El primer objetivo de la arquitectura bioclimática es crear espacios saludables y confortables, que cumplan con una finalidad funcional y expresiva, y que permitan el desarrollo integral del hombre y sus actividades. Esto se puede lograr a través del diseño pasivo, que considere

la integración de la arquitectura con su entorno natural. Sin lugar a duda, los espacios bien diseñados ayudan a propician la salud de sus ocupantes.

Ahora más que nunca, a partir de la Pandemia del Covid-19 se ha resaltado la importancia de contar con espacios saludables.



Objetivo 7:

Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna.

Este objetivo trata de eliminar la “pobreza energética” o acceso a la energía para toda la población. Sin embargo, la energía asequible debe ser sustentable, es decir que debe provenir de energías renovables y usarla de manera eficiente.

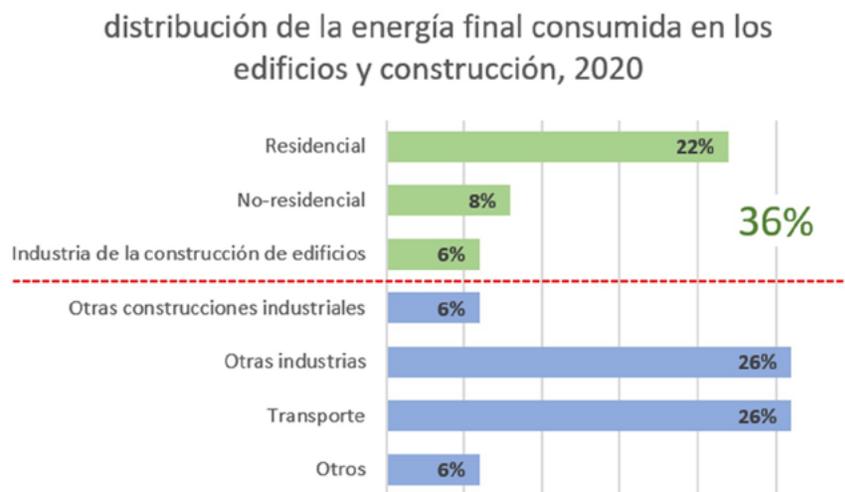


Figura 7. Distribución de la energía final consumida en los edificios y construcción en 2020 (United Nations, 2021).

Cualquier actividad humana así como y por lo tanto cualquier espacio, ya sea rural, urbano, arquitectónico, requiere de energía, y por lo tanto la eficiencia energética puede aplicarse en cualquier ámbito. De acuerdo con el Reporte del Estado Global 2021 para los Edificios y Construcción (United Nations, 2021), las edificaciones consumen en 36 % de la energía a nivel global. Es decir que, a través del diseño, rehabilitación, readaptación de las viviendas y edificaciones se puede incidir favorablemente en más de un tercio de la energía utilizada.

De hecho, el segundo objetivo de la arquitectura bioclimática es hacer un uso eficiente de la energía. A través del diseño pasivo es posible reducir la energía que demanda la edificación, seguidamente se puede reducir el consumo, y más aún se puede generar la energía que se requiere a través de energías renovables.



Objetivo 11:

Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles.

En el año 2020 el 56% de la población era urbana (Our World in Data, 2021), y se prevé que para el año 2030 el 60% de la población vivirá en las ciudades. En la actualidad (2021) la población mundial es alrededor de siete mil novecientos millones de personas y para el año 2030 se estiman ocho mil quinientos millones, por lo que más de cinco mil cien millones de personas vivirán en las ciudades.

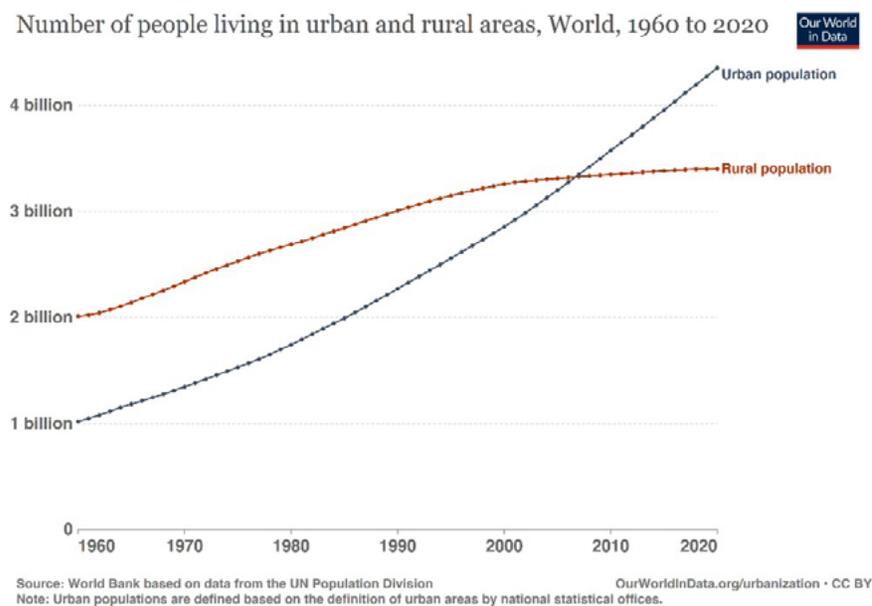


Figura 8. Número de personas viviendo en áreas urbanas o rurales de 1960 a 2020 (Our World in Data, 2021).

Actualmente en muchas de las ciudades el crecimiento urbano se da de manera desordenada, ya sea por asentamientos irregulares, por desarrollos de interés social o altos desarrollos inmobiliarios, no se hacen de manera planificada sino por especulación del suelo e inmobiliaria, acarreando una infinidad de problemas a la ciudad y sus habitantes. Por ello es muy importante la planeación, diseño y manejo o administración sustentable de las ciudades.

Existen varios métodos y técnicas para la planificación y diseño urbano. Para la solución de problemas geoespaciales complejos a distintas escalas, conviene incorporar en Geodiseño, el cual es un método colaborativo de planificación y diseño que se basa en la negociación entre todos los actores involucrados y en la toma de decisiones acordadas (Fisher, Steinitz, & Orland, 2020).

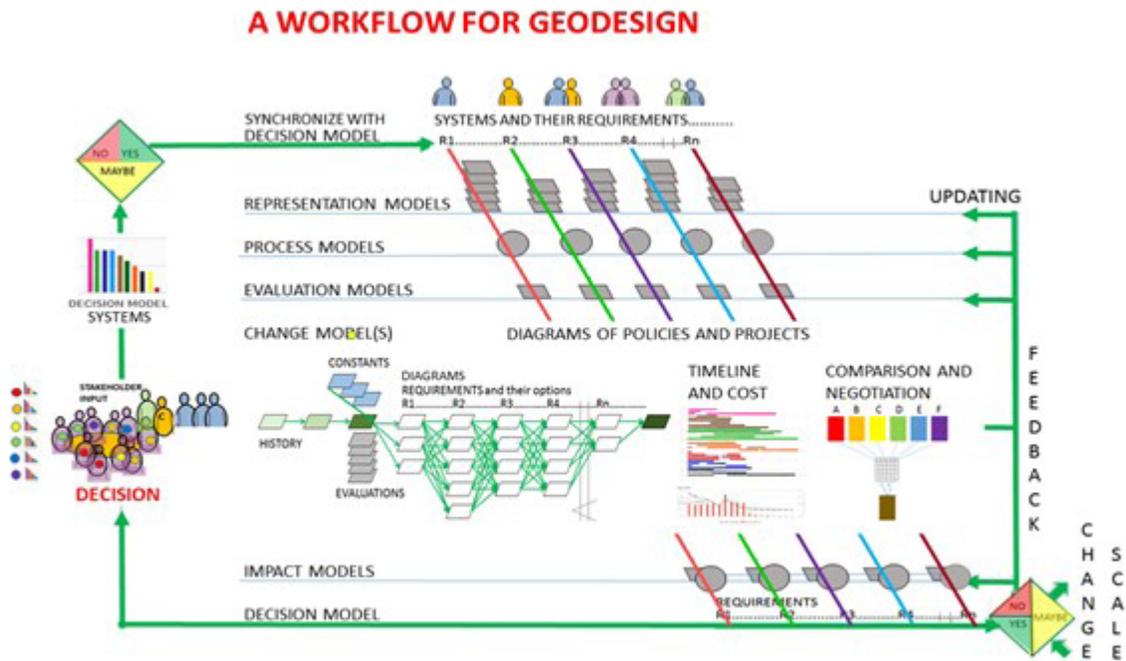


Figura 9. Flujo de trabajo del Geodiseño (Fisher, Steinitz, & Orland, 2020).



Objetivo 13

Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

2020 es el año más caluroso registrado a nivel mundial (NASA, 2021), y se espera que el año 2021 esté dentro de los 7 años más caluroso de la historia. De hecho, julio del año 2021 es el mes más caluroso registrado desde hace 142 años cuando se empezaron a tomar estos registros (NOAA, 2021).

Si duda las ciudades y edificaciones tienen mucho que ver con el calentamiento global, debido a los altos consumos energéticos y emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Como se vio anteriormente, el 36 % de la energía a nivel mundial la consumen las edificaciones, y las emisiones de CO₂ relacionadas con esa energía suman 37% (United Nations, 2021). Además, con una creciente población la demanda de energía y las emisiones de CO₂ también aumentan.

Comparando el comportamiento del sector de la construcción entre los años 2015 y 2020 se observa que tanto las emisiones de CO₂ como la energía consumida por metro cuadrado disminuyeron. Esto debido principalmente por el confinamiento obligado por la pandemia del Covid-19, sin embargo, los metros cuadrados construidos aumentaron 9.8%, lo mismo con el número de Contribuciones Determinadas Nacionalmente (NDC) que menciona a los edificios, también aumentó el número de países con códigos de energía en las edificaciones y desde luego la inversión.

Participación global de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía en los edificios y construcción, 2020

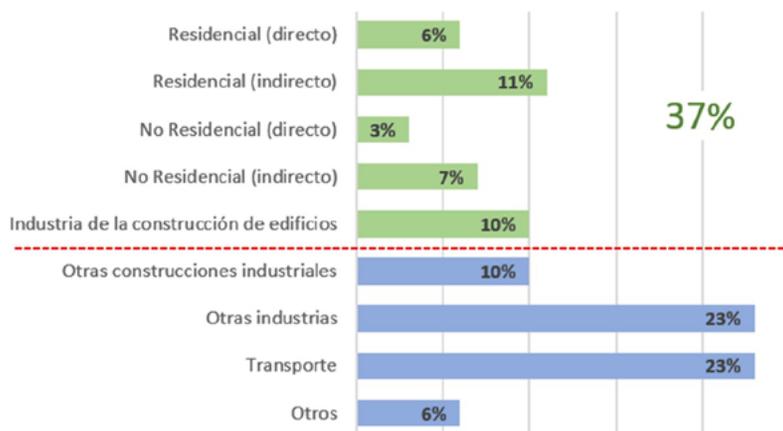


Figura 10. Participación global de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía en los edificios y construcción 2020 (United Nations, 2021).

Es decir que una vez pasado el confinamiento de las personas por el Covid-19, se espera nuevamente un crecimiento en las emisiones de CO₂ y en el uso de la energía. Por eso es tan importante que el crecimiento de las ciudades, con amplias áreas verdes y espacios exteriores que eviten la formación de islas de calor, su planificación, y el diseño de todas las edificaciones sea de manera sustentable.

Cambios clave en el sector de la construcción entre 2015 y 2020

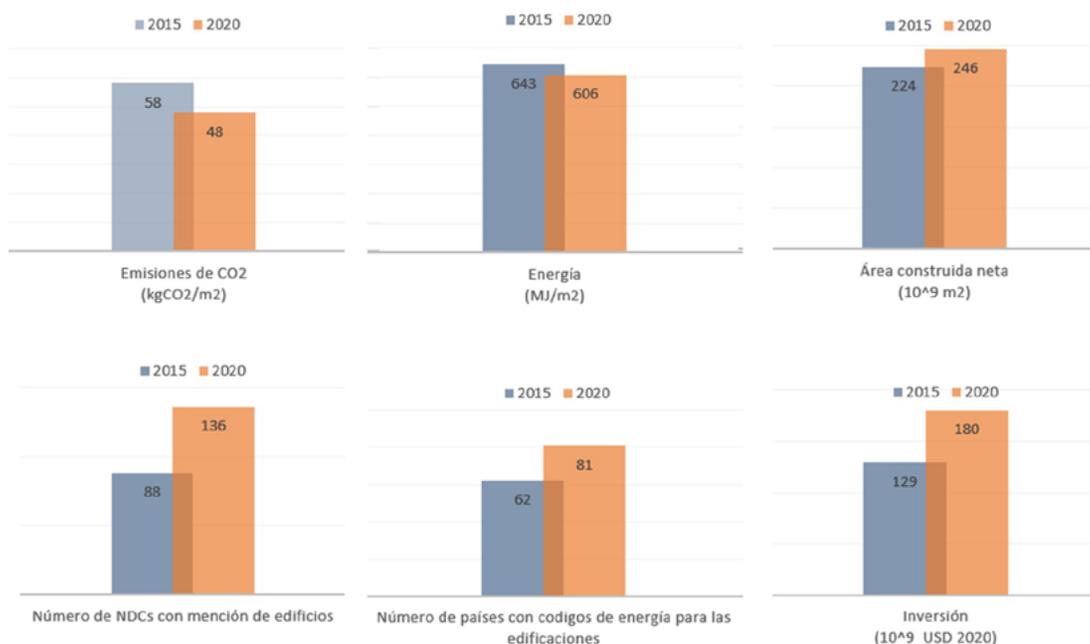


Figura 11. Cambios Clave en el sector de la construcción entre los años 2015 y 2020 (United Nations, 2021).



Objetivo 6

Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.

El agua va a ser un recurso crítico en los próximos años. De hecho, “una de cada tres personas en el mundo no tiene acceso a agua potable, dos de cada cinco personas no disponen de una instalación destinada a lavarse las manos con agua y jabón y más de 637 millones de personas aún defecan al aire libre”. (ONU, 2015)

“Después de cinco años de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, el mundo no está en camino de lograr las metas 6.1 y 6.2. Para lograr la cobertura universal para el 2030 se requiere cuadruplicar las tasas actuales en el progreso del manejo seguro de los servicios de agua potable, los servicios de saneamiento y los servicios básicos de higiene”. (WHO - UNICEF, 2021)

El agua potable para consumo humano cada vez va a ser más escasa, de hecho, en muchos lugares es un recurso crítico, motivo de problemas de salud e incluso detonador de conflictos sociales. En el año 2020 dos mil millones de personas carecían del servicio de agua potable segura. Uno de los problemas es que se piensa que el agua es un elemento muy abundante en la Tierra, ya que el 70 % de la superficie terrestre está cubierta de agua, razón por la que se le llama el planeta azul. Sin embargo, visto en términos de volumen la cantidad de agua es pequeña ya que representa poco más de una milésima parte del volumen de la Tierra (0.13 %) De este volumen, el 97.47 % corresponde a agua salada, y el 2.53 % agua dulce.

Tabla 1. Reserva de agua en la Tierra (Gleick, 1993)

Reserva de agua en la Tierra			
Fuente de Agua	Volumen de agua (km ³)	Porcentaje de agua dulce	Porcentaje total
Océanos y mares	1,338,000,000	--	96.54%
Casquetes polares, glaciares y nieve permanente	24,064,000	68.70%	1.74%
Agua subterránea	23,400,000	--	1.69%
<i>Dulce</i>	<i>10,530,000</i>	<i>30.06%</i>	<i>0.76%</i>
<i>Salada</i>	<i>12,870,000</i>	<i>--</i>	<i>0.93%</i>
Humedad del suelo	16,500	0.05%	0.0012%
Hielo terrestre y permafrost	300,000	0.86%	0.0216%
Lagos	176,400	--	0.0127%
<i>Dulce</i>	<i>91,000</i>	<i>0.26%</i>	<i>0.0066%</i>
<i>Salada</i>	<i>85,400</i>	<i>--</i>	<i>0.0062%</i>
Atmosfera	12,900	0.037%	0.0009%
Agua en pantanos	11,470	0.033%	0.0008%
Ríos	2,120	0.006%	0.0002%
Agua biológica	1,120	0.003%	0.0001%
Reserva total de agua	1,385,984,510		100.00%
Agua Salada	1,350,955,400		97.47%
Agua Dulce	35,029,110		2.53%

Del agua dulce disponible el 69.55 % se encuentra en forma de glaciares, hielo y nieve, mientras que el 30.06 % se encuentra de forma subterránea, por lo que el agua dulce superficial en ríos y lagos representa apenas el 0.27% del agua dulce total. Del total de esta agua dulce disponible, para consumo humano el 69 % se destina a actividades agrícolas y ganaderas y el 19 % para actividades industriales y sólo el 12% es aprovechada para consumo humano. (FCEA, s.f.)

Desafortunadamente el agua disponible no está distribuida uniformemente en todo el planeta, por lo que distintos países y regiones enfrentan diversos retos frente al agua. El cambio climático afectará a las distintas regiones de diferente manera, en algunos lugares se prevé aumento en la precipitación pluvial, mientras que en otros se espera disminución. La figura 12 “describe el cambio relativo en las precipitaciones anuales con un aumento de la temperatura de 2 °C comparado con el momento actual” (Un Water, 2020)

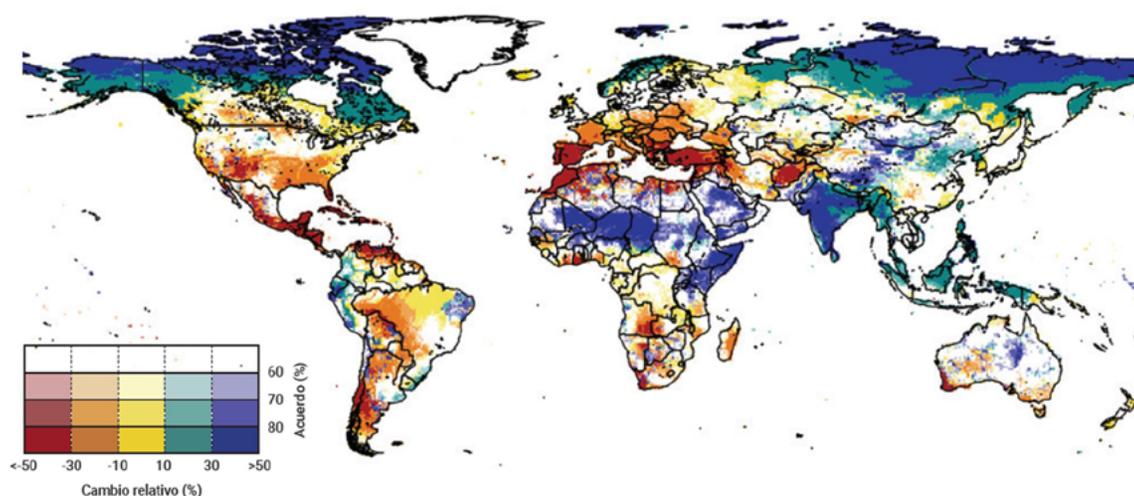


Figura 12. Tendencia de la disponibilidad de agua en un escenario de cambio climático. (Un Water, 2020)

La figura 13 Muestra la línea base del estrés hídrico. Este índice “mide la proporción entre las extracciones totales de agua y los suministros renovables de agua disponible. Las extracciones de agua incluyen las extracciones consuntivas y no consuntivas para uso doméstico, industrial, regadío y ganado. Los suministros disponibles de agua renovable incluyen las reservas de superficie y subterráneas, y tiene en cuenta el impacto de los usuarios consuntivos de agua arriba y de los grandes embalses en las disponibilidades de agua abajo. Los valores más altos indican que hay más competencia entre usuarios” (Un Water, 2020)

Al conocer el escenario de estrés hídrico, es evidente que se debe hacer algo para prevenir o al menos aminorar sus efectos. La arquitectura debe aprovechar el agua de lluvia, hacer un uso eficiente del agua en todas las edificaciones, reutilizarla en la medida de lo posible las aguas grises en usos secundarios y hacer un tratamiento adecuado antes de enviar las aguas negras a la red de drenaje público.

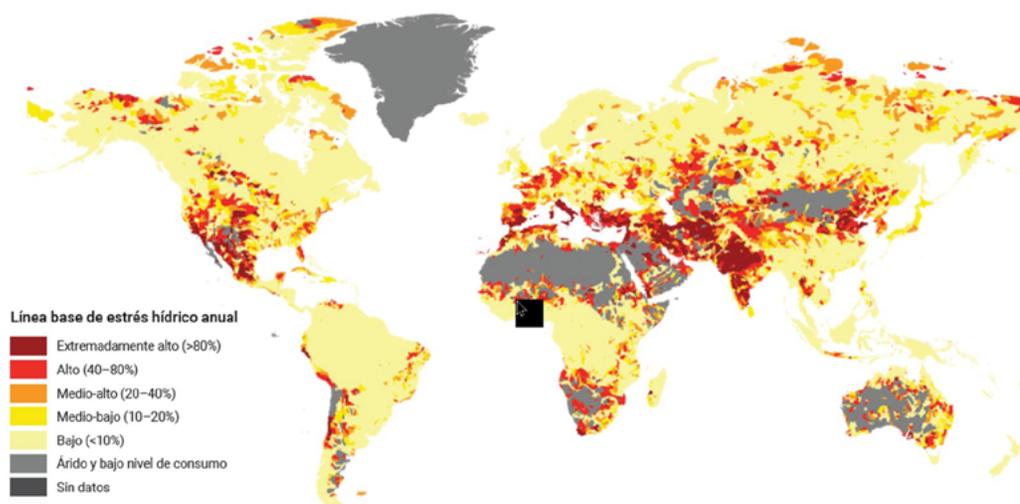


Figura 13. Línea base de estrés hídrico anual (Un Water, 2020)

En México se presentan condiciones geográficas y climáticas muy diversas, se tienen zonas desérticas con menos de 400 mm de precipitación pluvial total anual y otras zonas tropicales con más de 1,500 mm, y como se aprecia en las tendencias de la figura 12, se prevén cambios importantes en las precipitaciones. Por eso, es ahora más importante empezar a hacer conciencia de la importancia de hacer un uso eficiente de este vital recurso.



Objetivo 2

Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición, y promover la agricultura sostenible.

En el año 2021, 957 millones de personas en el mundo no tenían suficiente comida para alimentarse (UN, 2021) y en el año 2022, 274 millones están en necesidad de ayuda humanitaria para sobrevivir (UN, 2022). Por otro lado, en el año 2016 más de mil novecientos millones de adultos mayores de 18 años tenía sobrepeso y arriba de 650 millones eran obesos (WHO, 2021). Y de acuerdo con la Encuesta Nacional de Salud (INEGI, 2018), en México el 73% de los hombres y el 76.8% de las mujeres tiene sobrepeso u obesidad. En contraste el 22.6% de los hogares presentan inseguridad alimentaria moderada o severa y el 32.9% inseguridad alimentaria leve.

Estos datos de inseguridad alimentaria están relacionados con los niveles de pobreza. En el año 2020 había 55.7 millones de personas en condiciones de pobreza en México, lo que representa el 43.9 % de la población. De ellos, el 35.4 % correspondió a condiciones de pobreza moderada y 8.5 % a pobreza extrema. En México 28.6 millones de personas tiene carencia por acceso a la alimentación nutritiva y de calidad, es decir están en pobreza alimentaria (22.5 % de la población) (CONEVAL, 2020)

Evolución de la pobreza en México

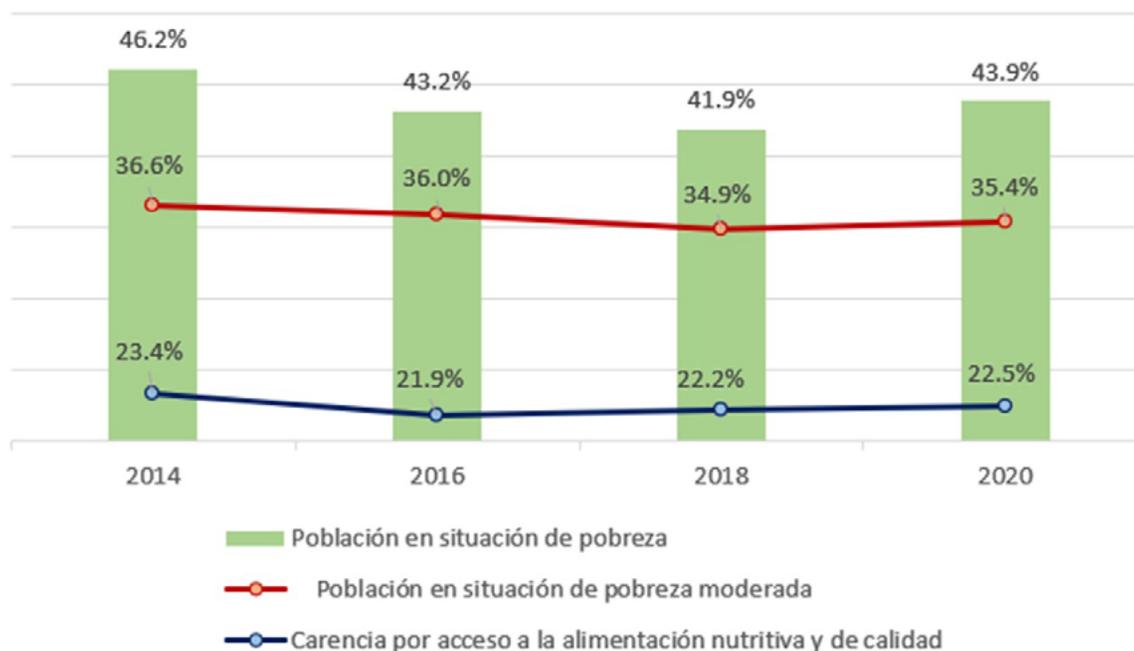


Figura 14. Evolución de la pobreza en México 2014-2020 (CONEVAL, 2020)

La mayoría de la población es urbana, de acuerdo con el censo de población y vivienda 2020, en México el 79 % de la población vive en las ciudades, y el 21 % en zonas rurales. Para apoyar la alimentación en las zonas urbanas se pueden implementar varias medidas: Acercar las áreas productivas a las ciudades por medio de agricultura urbana de alto rendimiento, sustentables y preferiblemente orgánicos. Propiciar los huertos urbanos y huertos familiares, aprovechar los jardines, las azoteas y muros verdes productivos. De esta forma no sólo se apoya a la economía familiar, sino también se mejora la alimentación nutritiva.

Como puede apreciarse, esto tiene mucho que ver con el diseño urbano y la arquitectura. Desde el punto de vista urbano se deben reverdecer las ciudades a través de corredores verdes, propiciar la peatonalización de la ciudad, ampliar las áreas verdes, destinar áreas periurbanas para la producción intensiva y sustentable de alimentos. Aprovechar lotes baldíos para el fomento de huertos urbanos.

Los arquitectos deben concebir sus diseños con la posibilidad de incorporar azoteas y terrazas verdes, con estructuras que puedan soportarlos. Jardines e invernaderos productivos que produzcan hortalizas y frutales de acuerdo con las plantas locales que se adapten a las condiciones climáticas del lugar.

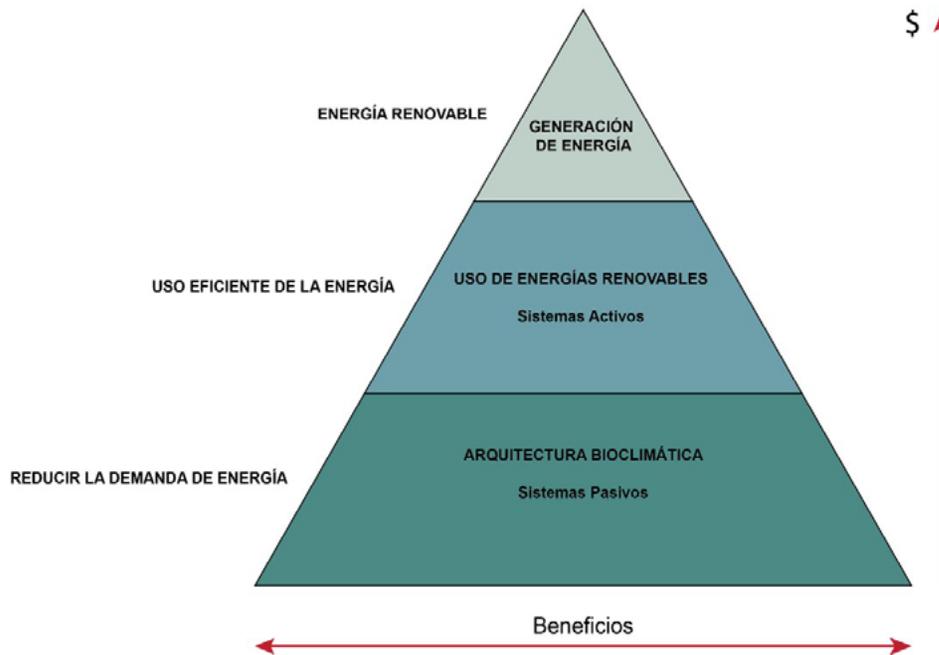


Figura 15. Proceso de diseño para lograr edificaciones Cero-Energía (González Cruz & Fuentes Freixanet, 2019)

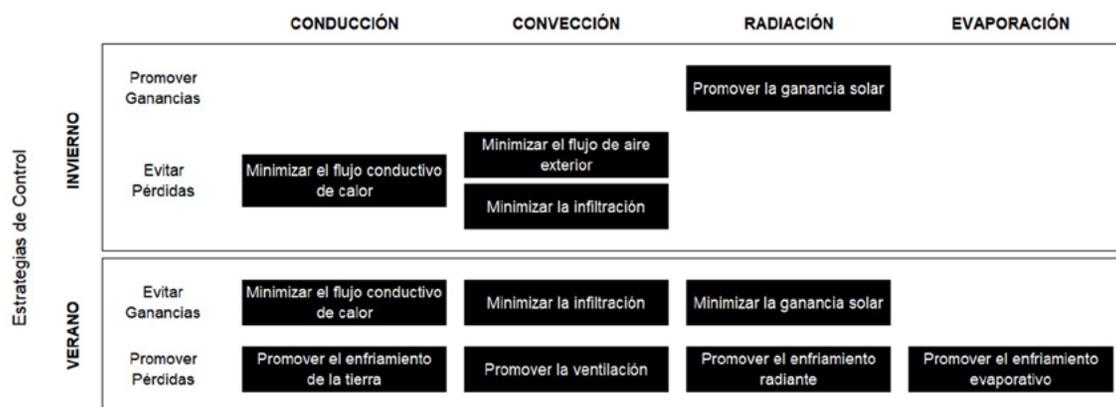
Arquitectura Bioclimática

La arquitectura bioclimática tiene tres objetivos fundamentales de acuerdo con los objetivos de desarrollo: crear espacios saludables y confortables, hacer un uso eficiente de la energía y los recursos e integrarse al medio ambiente generando los menores impactos posibles.

En la actualidad la arquitectura debe incorporar todos los recursos de diseño y criterios sustentables disponibles para aportar en la solución de los problemas ambientales, de salud y climáticos que está enfrentando nuestro planeta.

Se tienen que pensar en edificaciones que demanden la menor cantidad de energía posible, incluso que generen su propia energía (Cero Energía) y de esta forma también reducir al máximo las emisiones de CO₂ a la atmósfera (Cero Emisiones de CO₂).

Las acciones para lograr Cero Energía pueden agruparse en tres grandes rubros que pueden visualizarse en forma de triángulo mostrado en la figura 15. (González Cruz & Fuentes Freixanet, 2019). La base del triángulo corresponde a la reducción de la demanda de energía. Esta es la primera acción que debe emprenderse. La arquitectura bioclimática es el medio de reducir la demanda a través de un diseño adecuado al sitio y con la utilización de sistemas pasivos de climatización.



Reducción de la demanda

Arquitectura Bioclimática – sistemas pasivos

Ciertamente un buen análisis del sitio y análisis climático permitirán dar las mejores soluciones de orientación, ubicación, forma, compacidad, porosidad, etc. Las estrategias de diseño básicas se pueden describir a partir del esquema de Donald Watson. En la época fría es necesario promover las ganancias de calor y evitar perderlo. Por el contrario, en la época calurosa se debe evitar ganarlo y tratar de perderlo.

Estos principios básicos determinan distintos sistemas pasivos, como el diseño de los acristalamientos para promover la ganancia solar directa e indirecta, el uso de materiales para evitar los flujos conductivos de calor, la masividad para retenerlo y transferirlo de manera retardada, enfriamiento conductivo y radiante, ventilación natural, control de infiltraciones, control solar y enfriamiento evaporativo directo e indirecto¹. Con la implementación de estos sistemas, más el aprovechamiento de la iluminación natural, la edificación demandará menos energía para su funcionamiento. La reducción de la demanda deberá acompañarse de la reducción del consumo por parte de los usuarios (González Cruz & Fuentes Freixanet, 2019)

Uso eficiente de la energía

Energías renovables – sistemas activos

El siguiente nivel de acción es el uso de energías renovables a través de sistemas de baja energía, como calentadores solares de agua, sistemas de enfriamiento o calentamiento radiante en piso, plafón o zoclo, calentamiento solar activo, intercambiadores geotérmicos y bombas de calor, sistemas de recuperación de calor, etc.

El uso eficiente de la energía también puede lograrse con sistemas y equipos de alta eficiencia energética (refrigeradores, lavadoras, ventiladores, computadoras, etc.) y con un buen

1 Con base en los mecanismos de transferencia de calor los sistemas pasivos se pueden definir como: Sistemas de enfriamiento o calentamiento conductivo, convectivo, radiante o enfriamiento evaporativo. Enfriamiento o calentamiento pasivo y sistemas de ventilación natural.

diseño de la iluminación artificial, iluminación zonificada por tareas y uso de luminarias de alta eficiencia LED, etc. (González Cruz & Fuentes Freixanet, 2019)

Energía renovable

Finalmente, el último nivel del triángulo corresponde a la generación de energía renovable. Ya sea a través de sistemas fotovoltaicos o eólicos (González Cruz & Fuentes Freixanet, 2019)

Como se puede apreciar, la base del triángulo es más ancha, porque la aplicación del diseño bioclimático tiene más beneficios y menores costos. Conforme se asciende en el triángulo con la incorporación de sistemas activos y con la generación propia de energía, el costo será mayor. No obstante, es la incorporación de estos niveles lo que propicia edificaciones uso nulo de energía (Cero Energía, o Cero Energía Neta)

En conseguir una edificación de Cero Energía conlleva a una disminución drástica de las emisiones de CO₂, sin embargo, también hay que incorporar estudios de ciclo de vida de los materiales utilizados con el fin de reducir lo más posible las emisiones además de utilizar materiales sustentables.

Conclusión

El planeta enfrenta problemas ambientales, climáticos, sociales, económicos y actualmente de salud. Tenemos que hacernos responsables en lo que nos toca para su solución y no esperar a que los gobiernos o alguien más lo solucionen. La sustentabilidad empieza por el convencimiento de la necesidad de cambiar nuestra forma de relacionarnos con la naturaleza. Se requiere un cambio de paradigma. El hombre y la naturaleza estamos intrínsecamente unidos. El planeta tierra no puede ser visto de manera disgregada. La ciencia tiende a estudiarlo de manera separada por esferas geográficas, atmosfera, litósfera, hidrósfera, y biosfera, pero ahora entendemos que entre todos ellos forman una unidad y lo que afecta a una de ellas afecta directa o indirectamente a las otras. Actuar responsablemente empieza por entender esta unidad de los seres vivos y la unidad con el planeta que nos soporta y da vida.

Como arquitectos debemos entender que la responsabilidad de construir una edificación va más allá de los muros que la componen, nosotros diseñamos espacios habitables. Habitar es un término muy amplio, pero de manera simple comprende el espacio en donde las personas viven, crecen y se desarrollan física, mental y espiritualmente, en donde conviven y se relacionan socialmente. Es el espacio en donde se integran con el sitio, con el medio ambiente que los rodea. Los arquitectos somos responsables de brindar las mejores condiciones para que todo eso suceda de la mejor manera posible.

La arquitectura bioclimática ofrece la posibilidad de espacios saludables y confortables, que usan eficiente mente la energía y los recursos y que se integran armónicamente a su entorno. Estos principios son la base de la arquitectura sin adjetivos, simplemente arquitectura, el diseño de espacios habitables.

Referencias y bibliografía

CAT. (2021). Warming Projections Global Update. Berlín: Climate Action Tracker. Recuperado el 12 de 2021, de <https://climateactiontracker.org/>

CONEVAL. (2020). Medición de la Pobreza - Pobreza en México. (CONEVAL, Editor) Obtenido de https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza_2020.aspx

FCEA. (s.f.). Agua en el planeta. (A. Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, Editor) Recuperado el 4 de 1 de 2022, de <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>

Fisher, T., Steinitz, C., & Orland, B. (2020). The International Geodesign Collaboration. New York, USA: ESRI Press.

Gleick, P. (1993). Water in Crisis, A Guide to the World's Fresh Water Resources. New York: Oxford University Press.

González Cruz, E., & Fuentes Freixanet, V. A. (2019). The 6-Tier Approach to Near Zero Energy Building (nZEB). Madrid, España.

INEGI. (2018). Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2018. INEGI. Obtenido de https://ensanut.insp.mx/encuestas/ensanut2018/doctos/informes/ensanut_2018_presentacion_resultados.pdf

IPCC. (2019). Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C. Genova: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático - WMO. doi:ISBN 978-92-9169-351-1

NASA. (14 de 1 de 2021). 2020 Tied for warmest year on record, NASA Analysis Shows. Recuperado el 28 de 12 de 2021, de Earth: <https://www.nasa.gov/press-release/2020-tied-for-warmest-year-on-record-nasa-analysis-shows>

NOAA. (13 de 8 de 2021). it's official: July was Earth's hottest month on record. (N. O. Administration, Editor) Recuperado el 28 de 12 de 2021, de <https://www.noaa.gov/news/its-official-july-2021-was-earths-hottest-month-on-record>

NU. (2015). Acuerdo de París. Paris: Naciones Unidas. Recuperado el 21 de 12 de 2021, de <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>

NU. (2015b). Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. NU. Nueva York: Naciones Unidas. Recuperado el 21 de 12 de 2021, de https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=S

ONU. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Recuperado el 28 de 12 de 2021, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Our World in Data. (26 de 12 de 2021). Urbanization. Obtenido de Number of people living in urban areas: <https://ourworldindata.org/urbanization>

UIA. (2009). Copenhagen Declaration. Copenhagen: International Union of Architects. Recuperado el 26 de 12 de 2021, de https://www.uia-architectes.org/webApi/uploads/resourcefile/422/cop15_declaration_en.pdf

UN. (2021). Food Systems Summit 2021. Obtenido de 2021 is going to be a bad year for world hunger: <https://www.un.org/en/food-systems-summit/news/2021-going-be-bad-year-world-hunger>

UN. (2022). Global Humanitarian Overview 2022. (U. Nations, Editor) Recuperado el 5 de 1 de 2022, de <https://gho.unocha.org/>

Un Water. (2020). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo del los Recursos Hídricos 2020 - Agua y Cambio Climático. Oficina de Programa sobre Evaluación Mundial de los Recursos Hídricos, División de Ciencias del Agua, UNESCO. Perugia, Italia: UNESCO. Obtenido de https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372876_spa

United Nations. (2021). 2021 Global Status Report for Buildings and Construction, Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. Nairobi: United Nations Environmental Programme. Obtenido de <https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction>

WHO - UNICEF. (2021). Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000 - 2020 Five years into the SDGs. World Health Organization (WHO) and United Nations Children's Fund (UNICEF), Geneva. Obtenido de <https://www.who.int/es/news/item/01-07-2021-billions-of-people-will-lack-access-to-safe-water-sanitation-and-hygiene-in-2030-unless-progress-quadruples-warn-who-unicef>

WHO. (1948). Official Records of the World Health Organization No.2. WHO - United Nations. New York: World Health Organization. Obtenido de <https://www.who.int/es/about/frequently-asked-questions>

WHO. (9 de 06 de 2021). Obesity and overweight. (W. H. Organization, Editor) Obtenido de <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>

Aumento de la Temperatura Superficial del Mar: Principios de Diseño Arquitectónico Fundamentales para una Vida Sostenible en el Futuro Inmediato

Dr. Aníbal Figueroa Castrejón ¹

¹ Laboratorio de Arquitectura Bioclimática | Departamento del Medio Ambiente |
División de Ciencias y Artes para el Diseño | UAM-Azcapotzalco

Resumen

Un aumento constante de la temperatura en los océanos está generando cambios entre los que destacan: un incremento de huracanes, ciclones y tormentas tropicales con alteraciones en la intensidad y frecuencia de las lluvias y la velocidad del viento; también está subiendo el nivel medio del mar por el abatimiento de glaciares y la capa de hielo en los polos; y finalmente alteraciones de las corrientes marítimas globales entre otros.¹

Todos estos fenómenos están directamente relacionados con la forma en que diseñamos y construimos ciudades y edificios colindantes o cercanos al mar y otros cuerpos de agua. Ya que el origen del cambio de la temperatura de los mares son acciones antropogénicas y, en forma recíproca, estos cambios afectan a las construcciones, la infraestructura y la seguridad de las personas.

No obstante que ha aumentado el número de damnificados por eventos catastróficos asociados a los cambios en la temperatura del mar, se registra en todo el mundo un incremento anormal de la población en zonas costeras y la construcción de viviendas en zonas inundables.

Palabras Clave: temperatura superficial del mar, huracanes, velocidad de viento, nivel del mar, diseño en áreas costeras.

Abstract

A constant increase in temperature in the oceans is generating the strengthening of hurricanes, cyclones and tropical storms, alterations in the intensity and frequency of rains, increase in wind speed, rise of sea level, diseases in fauna, alterations of global sea currents and the distribution patterns of marine flora, among others.

All these phenomena are directly related to the way we design and construct cities and buildings adjacent to or close to the sea and other bodies of water, as they affect construction,

infrastructure and the safety of people. None the less, worldwide there is an increase in the population in coastal areas and the construction of housing in flood zones.

Keywords: ocean superficial temperature, hurricanes, wind speed, sea level, design in coastal areas.

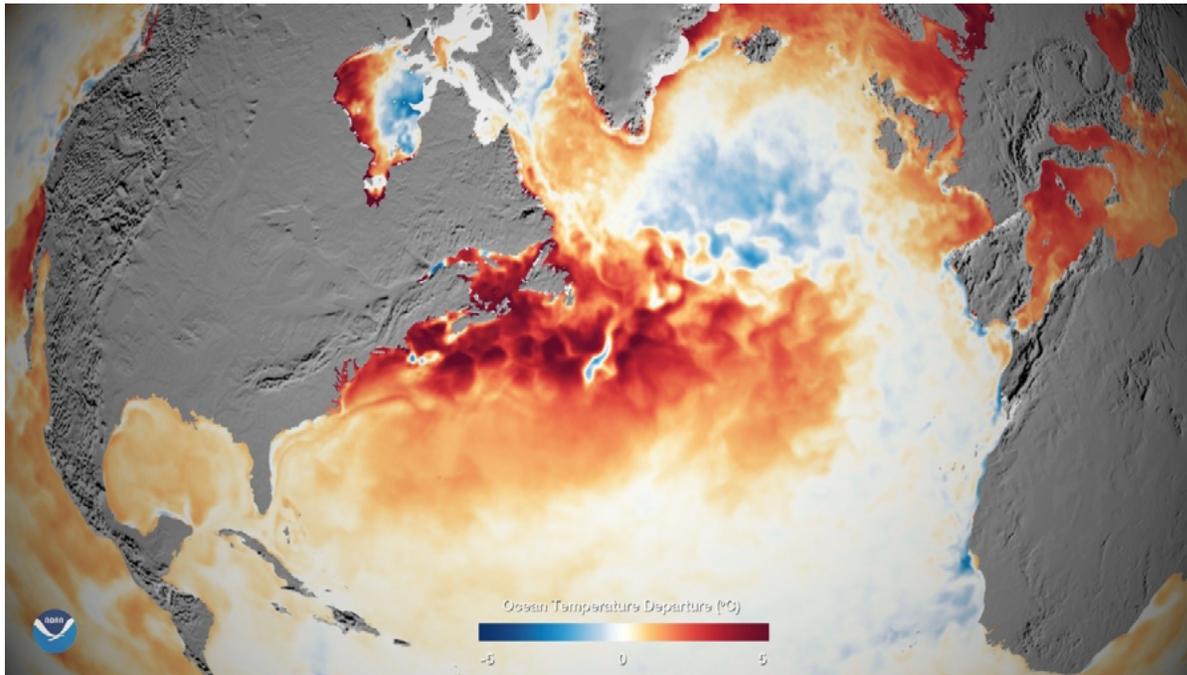


Figura 1. Cambios en la Temperatura Superficial Normal del Océano Atlántico Norte, Agosto 2018.

Fuente: NASA NOAA (2021), 2

1. Incremento del número e intensidad de los huracanes, ciclones y tormentas tropicales

El cambio de la temperatura del mar no es uniforme, detectándose anomalías hasta 6°C superiores a la normal de los últimos cuarenta años. El cambio en las condiciones del mar genera las condiciones idóneas para que se creen huracanes, ciclones y tormentas tropicales cada vez con mayor frecuencia e intensidad.

Una prueba de estos cambios es la temporada de huracanes de 2020 que con 30 ciclones en el Atlántico y 16 tormentas ciclónicas en el Pacífico ha sido la más activa desde que hay registros, a mediados del siglo XIX. Asimismo, en el 2021 hemos podido observar la presencia de hasta tres huracanes en forma simultánea que han afectado el territorio mexicano.

Los huracanes desde categoría 3, producen daños y destrucción a los edificios y a la infraestructura de las ciudades, por lo que representan una seria amenaza para las edificaciones costeras de todo el mundo. Sin embargo, cada vez viven más personas en las ciudades y pueblos costeros (Alggar, 2015)³. Muchos sueñan con una casa o un departamento con vista

al mar o aún mejor, con acceso a una playa; pero está demostrado que estos son edificios de alto riesgo que sufrirán daños por huracanes y ciclones cada vez con mayor frecuencia.

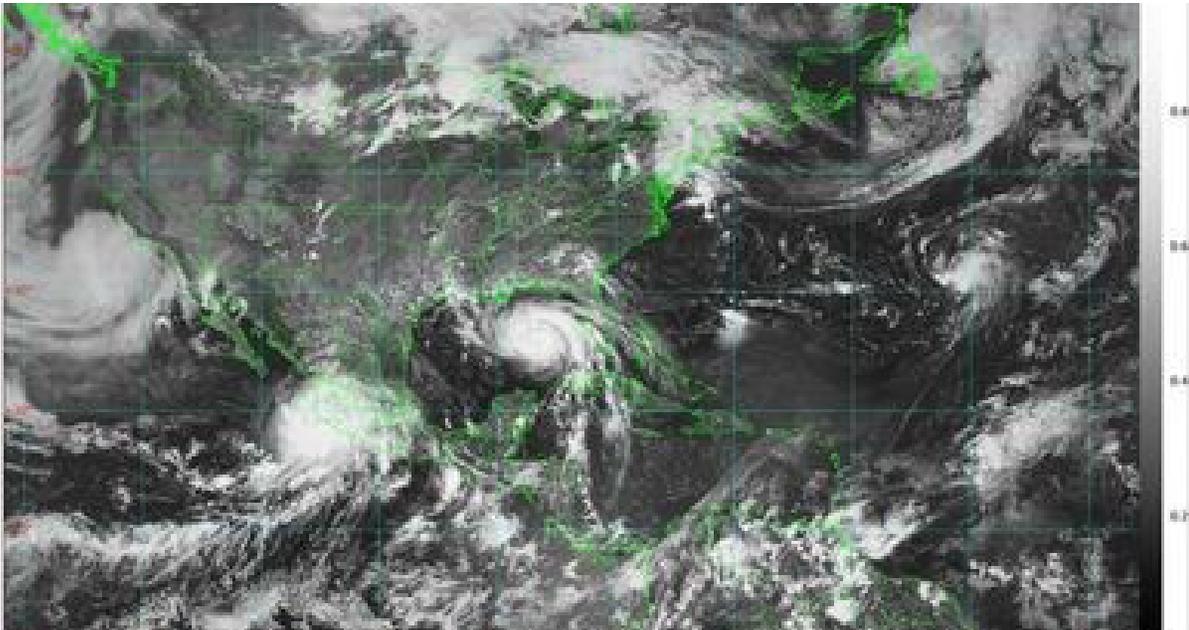


Figura 2. Tres huracanes simultáneos afectando la República Mexicana en el mes de agosto del 2021.

Fuente CONAGUA (2021), Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

Como ejemplo podemos tomar la Riviera Maya donde se encuentran Cancún, Playa del Carmen y Tulum en el Caribe Mexicano. Para dimensionar el problema debemos notar que la población del Estado de Quintana Roo pasó de 88,200 habitantes en 1970 a 1'857,000 en 2020, aumentando 21 veces en cincuenta años⁴. Playa del Carmen ha sido durante 20 años la ciudad mexicana con el crecimiento demográfico más acelerado. El riesgo es evidente si tomamos en cuenta que en los últimos años ya han afectado a esa región dos huracanes categoría 5 que han sido los más intensos registrados hasta ahora en el Atlántico en los últimos 150 años: Gilberto (1988) y Wilma (2005) ambos con velocidades de viento de hasta 298Km/h. Todavía hoy en día es posible ver edificios destruidos por estos fenómenos que permanecen abandonados como muestra de lo que seguirá ocurriendo en el futuro próximo.⁵

Aunado a ello, los constructores deben tomar en cuenta que hay dos meteoros asociados a los huracanes: la velocidad del viento que puede alcanzar más de los 250 km/h y un incremento de la precipitación pluvial incluso en zonas alejadas a cientos de kilómetros de la costa.

1.1 Incremento de la Velocidad del viento

Pocas veces se toma en cuenta en el diseño de ciudades y edificios las consecuencias que pueden tener los vientos huracanados que están directamente relacionados al incremento de la temperatura del mar. Estos pueden lanzar por el aire anuncios espectaculares, cubiertas ligeras y volados, arrancar árboles desde la raíz, tirar postes de cableado eléctrico y de

comunicaciones, romper cristales de las edificaciones, destruir el mobiliario exterior e interior, equipos como fotoceldas y calentadores solares, etc. Y en los casos extremos, como las mega tormentas categoría 5, pueden remover embarcaciones pequeñas y medianas de la costa y lanzar por el aire vehículos como automóviles y camiones, destruir muros y cubiertas sólidos, entre otros. En los datos climatológicos podemos observar un incremento no solo del número de huracanes, también de su intensidad que se mide en la velocidad de viento que alcanza el meteoro.

Un huracán categoría 3 tiene vientos entre 178 y 209 Km/h, uno categoría 4 entre 210 y 249 Km/h y un gran huracán categoría 5 tiene vientos de más de 250 Km/h y todos ellos son extremadamente destructivos. No solo se destruyen las edificaciones y la infraestructura, también son severamente afectados los cultivos y las instalaciones productivas, por lo que un huracán puede devastar la economía de una región o de un país por años. Esto ha ocurrido recientemente en Nueva Orleans (Katrina, 2005), Haití (Matthew, 2016) y Nicaragua y Honduras (Eta e Iota 2020). Dado el aumento de las velocidades de viento registradas en los últimos años, los climatólogos están proponiendo la creación de una categoría 6 para huracanes de más de 300 km/h.

El huracán Patricia con velocidades sostenidas de 345 Km/h y ráfagas de hasta 400 Km/h es el huracán con la velocidad de viento más alta registrada hasta la fecha. Ya reducido a categoría 4 tocó tierra en la costa de Jalisco y Colima en octubre de 2015 (Scientific American, 2019⁶).



Figura 3. Huracanes Eta e Iota: la crisis humanitaria que dejaron en Centroamérica las tormentas.⁷

Fuente: (BBC, 2020)

Adicionalmente al alterar con construcciones la topografía y la vegetación que protege ecosistemas costeros frágiles como los manglares y construir ahí edificios de varios niveles, cambian los patrones de viento superficial acelerando los procesos de erosión de playas y costas. En todos los casos, una construcción genera un efecto de succión a sotavento que puede remover fácilmente grandes cantidades de arena, lentamente en forma cotidiana y aceleradamente en una tormenta. Mientras más alta sea, mayor será el efecto de succión.

El fenómeno de erosión eólica del litoral se puede observar en muchas partes del planeta. “El litoral con mayor erosión en el mundo es la Isla Nebel en Alemania, donde una sección de 15 kilómetros pierde 176,000 metros cuadrados de arena y cede al mar 12.1 metros anualmente”⁸. Sin embargo, existen casos dramáticos en la costa atlántica de los Estados Unidos donde se construyeron “casas de playa” sobre bancos de arena o materiales sedimentarios de baja resistencia mecánica. El resultado ha sido la desaparición de la playa y con ello la aparición de muros de contención y rompeolas para tratar de contener la erosión y escaleras de varios niveles para llegar al mar al que antes se podía acceder fácilmente. Muchas de estas estructuras con terrenos vendidos al máximo precio y construcciones de alto costo, que ahora quedan inútiles, abandonadas o en proceso de demolición.



Figura 4. Erosión de la playa en la costa cerca de San Agustín, Florida.

Fuente: Foto Public Domain Pictures.

1.2 Incremento de la precipitación pluvial

Por otra parte, las lluvias estacionales generadas en los océanos y mares se están alterando respecto al comportamiento histórico de la precipitación pluvial.

Se ha observado en todo el mundo un aumento de los episodios de precipitación intensa (por ejemplo encima del percentil 95), incluso en lugares en que la cantidad total ha disminuido. Este incremento está asociado a un aumento de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, y se corresponde con el calentamiento observado... Con respecto a los valores extremos de precipitación, es muy probable que estos episodios aumenten en frecuencia. Su intensidad se incrementará particularmente en áreas tropicales y latitudes altas que experimentan aumentos de la precipitación media. En estas áreas la precipitación extrema aumentaría más que la precipitación media. (IPCC, 2008)⁹



Figura 5. Inundación por 204 mm de lluvia en 48 horas en el desierto de Oman. ¹⁰

El año 2021 demostró lo que está ocurriendo con la precipitación pluvial en todo el mundo ante el incremento de la temperatura del mar; fue un año con numerosas inundaciones catastróficas en Europa, Asia, Medio Oriente y América en lugares donde no se había presentado este fenómeno con tal intensidad. En Rineland, Alemania varios pueblos fueron destruidos y murieron 156 personas arrastradas por las aguas.

Desde octubre del 2021 hasta enero del 2022, Muscat en el desierto de Omán se convirtió en un lago cuando inundaciones repentinas afectaron vastas zonas de la ciudad y sus alrededores¹². En México, después de un periodo extremadamente seco donde se declaró en el

mes de abril que el 73% del país tenía algún grado de sequía; las precipitaciones pluviales del verano tuvieron registros históricos que saturaron los suelos y drenajes, llenaron las presas a su máxima capacidad y provocaron severas inundaciones sobre todo en la zona centro del país particularmente el Estado de México, Hidalgo y Querétaro, afectando a miles de personas en lugares como Metepec, Tula y Tequisquiapan¹³.



Figura 6. Inundaciones en Hidalgo por el desbordamiento de los Ríos Tula, Rosas y Salado, Septiembre 2021. ¹¹

Sin embargo, no es solo es relevante la cantidad de agua que se precipita al suelo, también hay que tomar en cuenta el periodo de tiempo en que esto ocurre. Se está incrementando la presencia de luvias de intensidad extraordinaria (trombas o bombas de agua). Un claro ejemplo de precipitaciones pluviales extraordinarias en periodos de tiempo muy breves fue el huracán Ida, ya convertido en tormenta tropical, que en la noche el 1º de Septiembre de 2021 produjo en la ciudad de Nueva York una precipitación de 80mm en una hora. En solamente tres horas se midieron 132 litros por metro cuadrado en el observatorio de Central Park. Esto ocasionó la inundación de líneas del metro, el cierre del aeropuerto de Newark y la inundación de varias zonas de la ciudad. No existía ningún antecedente de esta cantidad de lluvia en esta zona desde que se iniciaron los registros en el siglo XIX. ¹⁴



Figura 7. Inundaciones en Nueva York Septiembre 2021.

Fuente: Andrew, K. 2021.

1.3 Principios de Diseño Sustentable para contrarrestar los efectos de huracanes, ciclones y tormentas tropicales

Independientemente de la ubicación geográfica en que estemos diseñando, los ciclos hidrológicos tienen una gran importancia en nuestras construcciones, y serán aún más determinantes ante las consecuencias previsibles a corto plazo del cambio de temperatura de la superficie del mar.

- Ante esta situación, el primer criterio de diseño urbano y arquitectónico es no construir inmediato a las zonas costeras, particularmente en el frente de playa de aquellas más expuestas a los fenómenos ciclónicos como la costa de Quintana Roo, la porción sur de la Península de Baja California y la costa del pacífico en los estados de Jalisco, Michoacán y Guerrero.
- Los arquitectos y desarrolladores deben conservar el ecosistema natural duna de arena-manglar porque constituye la barrera de defensa natural del litoral.
- Diseñar solamente estructuras de baja altura (uno o dos niveles) para reducir la remoción de arena por viento
- Conservar la vegetación nativa e incrementar la densidad arbórea para reducir el impacto de los vientos huracanados en las construcciones.

-
- Calcular las estructuras para que resistan vientos de hasta 400 Km/h en lugar de los 250 Km/h que se usan actualmente como factor estructural de empuje por viento.
- Colocar ventanería con vanos operables que pueda cerrar herméticamente preferentemente con doble acristalamiento. En zonas costeras colocar cristal templado al exterior.
- En las zonas costeras equipar a todos los vanos y las superficies acristaladas con contraventanas plásticas, de madera o metálicas exteriores diseñadas contra huracanes.
- En todas las viviendas diseñar al menos una habitación sólida, bien aislada y sin asoleamiento que pueda funcionar como refugio ubicada en la planta más baja o en el sótano
- Dado el incremento de fenómenos con lluvia muy intensa, con registros de más de 80 mm/h, es necesario tomar en cuenta aumentos en las pendientes y drenajes de azotea. Los drenajes pluviales deben ser capaces de desalojar hasta hasta de 150 mm de precipitación por hora o 150 litros por metro cuadrado.
- Del mismo modo se deben considerar en todos los proyectos áreas libres suficientes para el incremento estimado de los escurrimientos superficiales. En su caso, se pueden complementar con pozos de absorción para manejar los volúmenes de agua que se presentan en eventos extraordinarios y evitar inundaciones.
- Separar las aguas pluviales en todas las edificaciones, garantizar el drenado de excedentes extraordinarios por escorrentía a los causes naturales.

2. Aumento en el nivel medio del mar por el abatimiento de los glaciares y de la capa de hielo en los polos

Se ha comprobado que el nivel medio del mar está aumentando a una velocidad mayor que la estimada en la cumbre de la Tierra de Rio en 1992. El aumento actual de 1.25°C en la temperatura media de la tierra significa que en algunos lugares se alcancen temperaturas superiores a los 80°C, cuando el límite de la resistencia humana son 48°C. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) reconoció que el 20 de junio de 2020 (solsticio de verano) se estableció un nuevo récord de temperatura en el Ártico en la localidad rusa de Verkhoyansk con 38°C, provocando una pérdida masiva de hielo marino. La tasa de calentamiento del Ártico es más del doble que la media mundial. También en ese año se registró un nuevo récord de temperatura máxima en el Antártico con 18.3 °C. ¹⁵

La elevación del nivel del mar, que se debe al calentamiento de los océanos y la fusión del hielo terrestre, constituye una amenaza grave para los sistemas costeros y las tierras bajas de todo el mundo a causa de las inundaciones, la erosión del litoral y la contaminación de las reservas de agua dulce y los cultivos alimenticios. Dado que son consecuencia de condiciones que ya existen, esos efectos son, en gran medida, inevitables y, si no se emprenden actividades de mitigación y adaptación, podrían resultar devastadores. Comunidades enteras

en las islas de tierras bajas (Kiribati, Maldivas y Tuvalu) no tienen dónde refugiarse. Muchas regiones costeras, particularmente algunos deltas bajos, están muy densamente poblados. Se calcula que más de 150 millones de personas viven en tierras cuya altitud está a no más de 1 m por encima del nivel actual de la pleamar y que 250 millones viven a altitudes que están a no más de 5 m por encima de ese nivel. (Naciones Unidas, 2017)

Los científicos del panel intergubernamental para el cambio climático mencionan un incremento de la temperatura media de 1.5°C como el límite máximo para poder corregir el deterioro de los sistemas naturales y 2°C para evitar una catástrofe climática irreversible de consecuencias muy graves para los seres humanos. Con toda claridad nos están advirtiendo que al pasar este límite se producirán alteraciones planetarias que llevarán, entre otras cosas a la desaparición del hielo polar y glaciación -que ya está ocurriendo aceleradamente- y al incremento irreversible del nivel medio del mar que en algunas zonas podría llegar a ser hasta de 5 metros, inundando numerosas ciudades en todos los continentes. Desde el 2005 el paso del noreste del polo norte es navegable, y en 2017 fue usado por primera vez por un barco metanero para viajar de Noruega a Corea del Sur. Sin duda el hielo polar se está derritiendo.

2.1 Desaparición de Playas, Pueblos y Ciudades

El aumento del nivel medio del mar incrementará el riesgo de daños o destrucción de las edificaciones por marejadas y erosión marina en las zonas costeras. Este fenómeno se observa en todo el mundo y va desde algunos milímetros hasta más de un centímetro por año. El problema real es que es acumulativo y se está acelerando. Los pobladores de la costa, consideran que el mar se está “llevando sus playas”, como si se tratase de una remoción de la masa de arena, ya que ven cada año más estrecha la zona de playa. Dado que esto ocurre lentamente, no nos percatamos que es el mar el que sube y la arena se hunde en el océano.

En forma contradictoria es precisamente en las zonas costeras donde se ha estado realizando una parte importante de la construcción de ciudades, desarrollos turísticos y fraccionamientos. En los Estados Unidos se estima que 3.5 millones de hogares existentes tienen un riesgo del 10% o mayor de sufrir daños por inundaciones costeras.

Por otra parte, en un escenario que cada vez se observa más probable, algunas zonas de la península de Yucatán quedarán bajo el mar, lo que ocasionará la destrucción de ciudades y pueblos, con las consecuentes pérdidas de construcciones y bienes, así como fenómenos de migración masiva.

Una herramienta muy valiosa para este análisis son las fotografías aéreas en secuencias de tiempo documentadas en Google Earth (MR). Por ejemplo, si comparamos fotografías aéreas del año 2004 de la zona de Progreso, cercana a Mérida, Yucatán, con otras de la misma zona del año 2017, es fácil observar que la línea costera está llegando a las construcciones y destruyendo algunas de ellas. Lo importante es que este cambio ha ocurrido en un intervalo de solamente 13 años. Se puede notar que los habitantes construyen rompeolas y colocan sacos de arena para tratar de detener la pérdida de terreno. Esto es inútil.

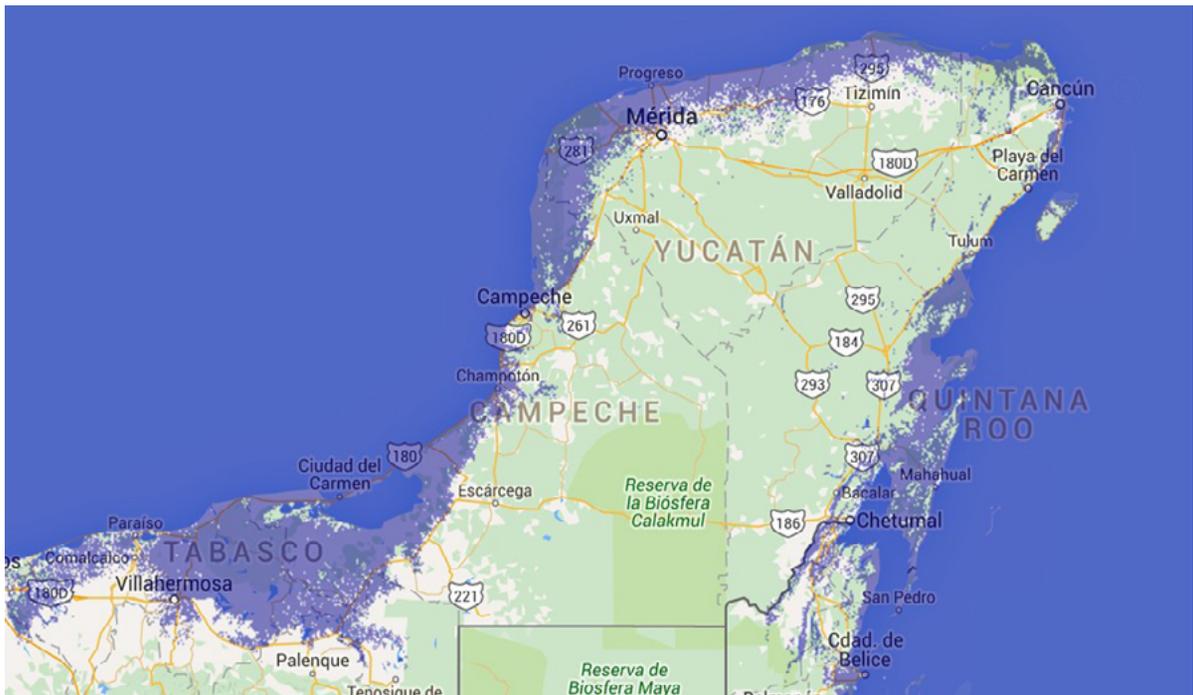


Figura 8. Nivel del mar en el sureste de México con un incremento de 5 metros.
Fuente: Climate Central, 2021. 16

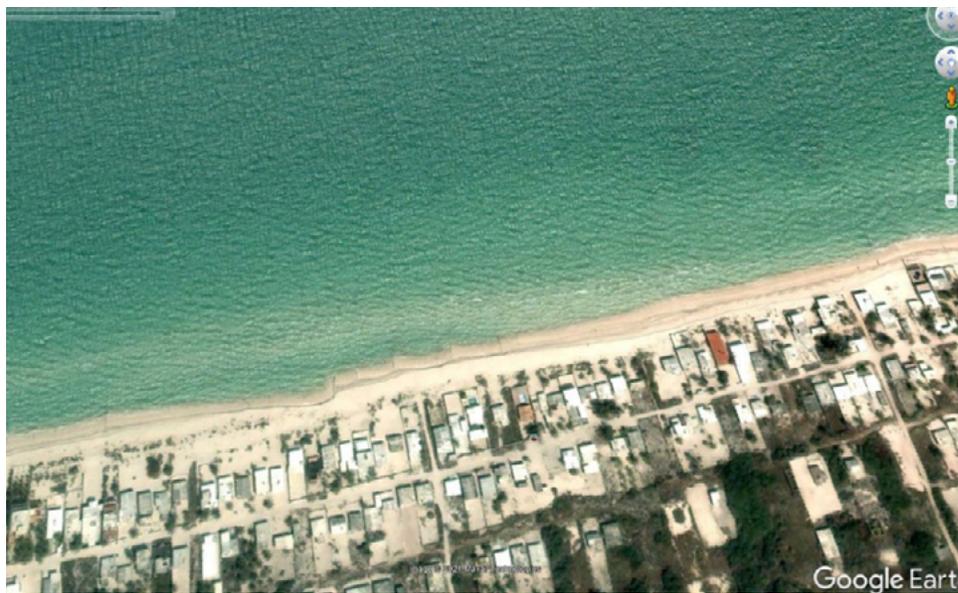


Figura 9. Aumento del Nivel del mar Progreso, Yucatán, México 2004.
Fuente: Google Earth



Figura 10. Aumento del Nivel del mar Progreso, Yucatán, México 2017.

Fuente: Google Earth

2.2 Islas Artificiales y Especulación Inmobiliaria

Hay muchos otros ejemplos en todo el mundo del conflicto entre la construcción costera y los efectos del cambio de temperatura en el mar. El caso extremo de propuestas de desarrolladores, urbanistas y arquitectos ha ocurrido en Dubái con tres mega proyectos de construcción de archipiélagos artificiales que iniciaron sus operaciones en 2001: The Palm, The World y The Universe. Con una inversión multimillonaria solo el primero esta en operación. Tiene una superficie aproximada de 28 km², agrega 232 kilómetros lineales de “costa”, es decir lotes con frente al mar para viviendas y desarrollos de lujo. Sin embargo, en solo veinte años, se han manifestado múltiples problemas ambientales: hundimiento de algunas islas, aumento del nivel del mar, canales de navegación obstruidos por arena, destrucción de los ecosistemas locales, pérdida de biodiversidad, alteración de las corrientes marinas y remoción de hasta 15,000 metros cúbicos de arena anualmente de las playas naturales, entre otros. Esto ha llevado a la crisis ambiental y financiera del proyecto.¹⁷

Otro ejemplo es Playa Rincón en Puerto Rico que era un destino de turismo que aumentó su demanda en pocos años. Nuevamente los desarrolladores contrataron arquitectos para que diseñaran condominios en el frente de playa. La construcción fue rápida e intensiva, siendo originalmente un éxito inmobiliario. Sin embargo, en pocos años el aumento del nivel del mar y la remoción de arena producida por las alteraciones al ecosistema, han hecho colapsar construcciones y dañar irremediablemente a otras. La prometida vida paradisiaca destruyó el lugar. Hoy en día muchos edificios en Playa Rincón están abandonados y enfrentan problemas legales incluyendo el costo para su (imposible) reparación o demolición.



Figura 11. Playa Rincón en Puerto Rico, edificios destruidos por el mar.

Fuente: CPI, 2018. ¹⁸

2.3 Salinización del Agua Potable

Florida y la península Yucatán por sus características geológicas no tienen ríos, dado a que se trata de una plataforma calcárea altamente porosa muy plana a pocos metros sobre el nivel del mar. El agua se filtra rápidamente y circula por sistemas subterráneos debajo de la superficie que afloran de forma natural en cenotes y grietas. Por esta razón, el agua dulce potable es tomada de corrientes y depósitos subterráneos. Las mayores amenazas de esta zona son el calentamiento de las superficies oceánicas y el incremento de la población que producen simultáneamente un incremento del nivel del mar y el abatimiento de los niveles del agua subterránea por la extracción de agua potable. Al ocurrir esto, el flujo del agua se invierte mezclando el agua salada marina con el agua dulce subterránea, volviéndola no apta para el consumo humano.

2.4 Principios de Diseño Sustentable para contrarrestar los efectos del aumento del nivel del mar

La asociación utópica deseada por una gran cantidad de personas de una vida de lujo y relajada en la playa, con una casa o departamento con vista al mar, ha llevado a los desarrolladores y arquitectos a levantar estructuras cada vez más osadas, densas y altas en las costas, e incluso a ganarle terreno al mar por medio de rellenos para construir islas artificiales. Por eso algunos principios de diseño aplicables son los siguientes:

- La tendencia a construir en regiones inundables como pantanos y manglares ya está generando daños en los edificios, debido a que estas intervenciones irrespetuosas con el

medio ambiente son afectadas por el incremento en el nivel del mar y el aumento de la intensidad y frecuencia de tormentas y huracanes.

- No es lógico construir edificios en donde antes había humedales costeros: dunas, manglares o pantanos ya que por sus características topográficas serán susceptibles constantemente a inundaciones y erosión. Estas áreas serán las primeras en ser afectadas por el aumento del nivel del mar.
- Conservar los humedales como sistema de protección contra tormentas y refugio de flora y fauna.
- En terrenos planos o con poca pendiente, aumentar al máximo posible el nivel de desplante de planta baja respecto al resto del terreno para evitar inundaciones.
- Filtrar y almacenar el agua pluvial en cisternas cuyo acceso este elevado sobre el nivel del terreno. Esta se puede emplear sin riesgo de forma regular para todos los usos domésticos excepto en el fregadero y en casos de desastre o escasez puede ser la única fuente de agua potable.
- No construir en el límite costero ni en las riveras de ríos y arroyos.
- En las zonas cercanas las costas o a ríos construir solamente en terrenos elevados, previendo un aumento del nivel medio normal de los cuerpos de agua de al menos 3 metros.

3. Alteraciones en las corrientes marinas

Es importante valorar la información que las ciencias de la Tierra han estado aportando en la relación entre los fenómenos climáticos y el medio construido, particularmente el aumento de la temperatura, incluyendo la temperatura superficial del mar, que constituye el 71% de la superficie del planeta. En este sentido las corrientes marinas tienen un papel crítico en el transporte y distribución de energía en el planeta

Como resultado de los cambios en el calentamiento de distintas partes del mar, también están cambiando las pautas de variación en la distribución del calor en los océanos. Hay datos que indican que estos fenómenos están alterando la circulación atmosférica y que la circulación mundial en mar abierto también está cambiando. (Naciones Unidas, 2017)¹⁹

Cada cambio en las corrientes marinas superficiales o profundas afecta el clima y a los seres vivos marinos y terrestres. Al distribuir la energía entre las zonas tropicales y los polos mitigan las condiciones extremas y le dan a la tierra una temperatura más uniforme. Asimismo, son corrientes transportadoras de nutrientes, plantas y animales que permiten vida en los océanos. Pero del mismo modo transportan los desechos que vertimos en ellos de una región a otra, e incluso de un continente a otro.

Se han estado documentando cambios en las corrientes marinas, incluyendo disminución en la velocidad de transporte de la masa de agua y diferencias de temperatura, lo que ocasiona ajustes y alteraciones en su dirección y ubicación.

3.1. Alteraciones en la distribución de flora marina

También como consecuencia del aumento en la temperatura superficial de los océanos se producen fenómenos que afectan a la flora marina. Uno de ellos es la aparición de la planta de sargazo en el Mar Caribe. Esta tiene su origen el sureste Atlántico entre África y Brasil. La macroalga duplica su masa cada 20 días favoreciéndose del incremento de la temperatura y de los nutrientes orgánicos (basura y residuos químicos) que están en la superficie, así como de los cambios en las corrientes marinas generados por las alteraciones a la temperatura.

Aún cuando es conocida la existencia del “mar del sargazo” en el océano Atlántico desde las primeras navegaciones transcontinentales, en las islas del Caribe y la Riviera Maya el problema se empezó a detectar hace 15 años y a partir del 2011 se ha convertido en una amenaza real para el turismo que en lugar de encontrar las aguas transparentes color azul turquesa que los han hecho famosos, llega a playas fétidas y contaminadas. Esta es una catástrofe ambiental con graves consecuencias sociales y económicas.²⁰ Aún cuando se han hecho programas permanentes para la remoción del sargazo y la limpieza de las playas estos no son suficientes y solo un paliativo que no puede resolver el origen del problema.

3.2 Alteraciones en la fauna marina

Las alteraciones en la temperatura superficial, la salinidad y el balance químico del mar, producto de las ciudades y las edificaciones, también tienen un efecto importante en los seres vivos que las habitan como los arrecifes coralinos, que desde hace más de dos décadas están sufriendo cambios y destrucción al ser particularmente sensibles a los cambios de temperatura, salinidad, balance químico y la contaminación del agua. El “emblanquecimiento” del coral se debe a la muerte de los organismos vivos que le dan color y lo mantienen vivo y creciendo. Estas colonias coralíferas como la Gran Barrera de Coral de Australia o la Barrera de Coral del Caribe Mexicano que va desde Cancún hasta Belice, son las colonias de seres vivos más grandes del planeta.

Al morir los arrecifes desaparecen muchas otras especies marinas que dependen de ellos, rompiendo completamente el sistema ecológico. Este fenómeno se observa en todo el mundo, pero es muy intenso en el Mar Caribe.²¹

Los arrecifes son la razón de ser de muchos destinos turísticos como las Antillas, Cozumel o Belice. Algunos países pequeños del caribe dependen fundamentalmente del turismo de playa y buceo para subsistir, por lo que la muerte de los corales tiene un impacto económico y social devastador. Sin embargo, las consecuencias mundiales de este problema son mucho mayores, ya que miles de especies marinas dependen directamente del coral para vivir. Al morir el coral mueren los peces que a la vez son una fuente vital para muchas especies

marinas y terrestres, incluyéndonos. Hasta la fecha no ha ocurrido ningún caso exitoso para devolver la vida a las colonias coralinas enfermas.



Figura 12. Playa Delfín Cancún en el año 2000



Figura 13. Playa de Cancún en el año 2018

Fuente: Barragán 2018



Figura 14. Arrecifes en el año 2010

Fuente: Shutterstock, 2014²²



Figura 15. Arrecifes Muertos en La Gran Barrera de Coral de Australia (2016)

Fuente: Financial Times Weekend, 2016

3.3 Principios de Diseño Sustentable para contrarrestar los efectos de las alteraciones de las corrientes marinas

Las causas de las alteraciones de las corrientes marinas tienen una escala global y no se pueden resolver con una sola acción local. Sin embargo, el diseño urbano y arquitectónico debe contribuir a reducir al máximo la emisión de gases de efecto invernadero y el consumo de energía los procesos constructivos y la operación de edificios. Para ello:

- Planear las regiones y ciudades para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, particularmente en el transporte y las actividades industriales.
- Evaluar en todas las construcciones nuevas o remodelación de edificios existentes la huella de carbono de los procesos y materiales, reduciéndola al máximo posible con sistemas constructivos sustentables, dando prioridad a los materiales naturales, con baja exergía y de producción local.
- Promover en todas las construcciones la instalación de sistemas de generación de energía limpia (fotoceldas o aerogeneradores) que generen la energía que consumen.
- Instalar en cada predio una planta de tratamiento de aguas negras correctamente supervisada para su uso secundario o vertido a los cuerpos de agua superficiales. En todos los casos evitar verter aguas negras directamente al mar, los mantos freáticos o corrientes subterráneas.
- Detener el uso de empaques desechables, particularmente plásticos, para reducir la contaminación y el transporte de basura en el mar. Instalar en los proyectos áreas específicas para colocar contenedores adecuados para la separación de residuos.
- Promover a nivel municipal o regional, la construcción de plantas de separación y reciclado de residuos sólidos.

Bibliografía

1. Harvey, Chelsea (2020). As the Oceans Warm, Hurricanes Stay Stronger Longer. Scientific American en <https://www.scientificamerican.com/article/as-the-oceans-warm-hurricanes-stay-stronger-longer/>
2. NASA NOAA (2021). Results for Satellite Imagery Collections, 2021. Tomado de <https://www.nesdis.noaa.gov/search/content/sea%20surface%20temperature%20map>
3. Alggar (2015). La Tendencia de los Huracanes en los últimos años. WordPress Revista Digital Nodos Geográficos en https://nodosgeograficos.wordpress.com/2015/12/29/la_tendencia_de_los_huracanes_del_atlantico_en_los_ultimos_anos/
4. INEGI (2021), Censos Nacionales de Vivienda, México
5. Cortazar, L. Alfonso (2020). Huracanes Yucatán: explicando los Ciclones Tropicales. En <http://www.huracanesyucatan.com/explicando/escala.htm>
6. Masters, J. (2019) Hurricane Worthy of a Category 6 Rating. Scientific American. Estados Unidos. Tomado de: <https://blogs.scientificamerican.com/eye-of-the-storm/hurricane-dorian-was-worthy-of-a-category-6-rating/>
7. BBC (2020). Huracanes Eta e Iota: la crisis humanitaria que dejaron en Centroamérica las tormentas. Tomado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-55479861>
8. Masa, Andres (2018). Así pierde el sur de EEUU la arena de sus playas. The Weather Channel. Tomado de https://weather.com/es-ES/espana/tiempo/news/2018-05-01-sur-eeuu_texas_arena_playa
9. IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático) (2008). El Cambio Climático y el Agua, Documento Técnico VI.
10. MK (2021). Oman 204 mm /48 hours and floods in the United Arab Emirates, Saudi Arabia and Iran. Mkweather, weather news from the world. En <https://mkweather.com/oman-204-mm-48-hours-and-floods-in-the-united-arab-emirates-saudi-arabia-and-iran/>
11. Rodríguez, Martha (2021). 2021 y sus eventos meteorológicos en México. Revista electrónica Meteored. En <https://www.meteored.mx/noticias/actualidad/meteorologia-mexico-desastres-2021.html>
12. (2020). Heavy floods as 180 km/h Cyclone Shaheen hits Muscat, Oman. En <https://www.youtube.com/watch?v=AdC0q8qOA9c>
13. Valdez, David (Foto 2021). Inundaciones en Tequisquiapan. Activan el semáforo rojo en Tequisquiapan. Diario de Querétaro. Tomado de www.diariodequeretaro.com.mx/local/activan-el-semaforo-rojo-en-tequisquiapan-7237700.html
14. Andrew Herrera, Karina (2021). Inauditas Imágenes de inundaciones en Nueva York por ciclón Ida. Televisa News. En: <https://noticieros.televisa.com/ultimas-noticias/inundaciones-nueva-york-ida-inauditas-imagenes-metro-central-park-estado-emergencia/>
15. Europapress (2021) Nuevo record de temperatura máxima en el Ártico de 38°C. Europapress Cienciaplus Cambio Climático. En <https://www.europapress.es/ciencia/cam->

bio-climatico/noticia-nuevo-record-temperatura-maxima-artico-38-20211214112441.html

16. Climate Central (2020). The Ocean at your door: new homes and the rising sea. 2019 Research Report en <https://www.climatecentral.org/news/ocean-at-the-door-new-homes-in-harms-way-zillow-analysis-21953>

17. Burbano, Lucia (2021). Las Islas Artificiales de Dubai: ¿Cuál es su estado actual? Tomorrow Daily. Tomado de <https://tomorrow.city/a/las-islas-artificiales-de-dubai>

18. Centro de Periodismo Investigativo (2018). Efectos de la Erosión en Rincón, Puerto Rico Tomado de <https://www.youtube.com/watch?v=EAJbOMlgZho>

19. Naciones Unidas (2017). Los Efectos del Cambio Climático y los Cambios Atmosféricos conexos en los Océanos- Resumen técnico de la Primera Evaluación Integrada del Medio Marino a Escala Mundial. Nueva York, EUA. En https://www.un.org/regularprocess/sites/www.un.org.regularprocess/files/17-05753_s-impacts-of-climate-change.pdf

20. Barragan, Almudena. (2018). Lo que debes saber sobre el Sargazo, el alga que ahoga a las playas del Caribe. Diario el País, España (versión electrónica). En https://verne.elpais.com/verne/2018/08/16/mexico/1534386438_281635.html

21. Financial Times Weekend. (2016). El Paraíso Perdido: la crisis en la Gran Barrera de Coral. Tomado de <https://www.elmostrador.cl/agenda-pais/vida-en-linea/2016/12/25/el-paraiso-perdido-la-crisis-en-la-gran-barrera-de-coral/>

22. AIDA (2014). Guía de Buenas Prácticas de Regulación para la Protección de Arrecifes de Coral. Asociacion Interamericana para la Defensa del Ambiente. Tomado de: https://aida-americas.org/sites/default/files/featured_pubs/guia_de_buenas_practicas_de_regulacion_para_la_proteccion_de_arrecifes_de_coral_0.pdf

Determinación de Estrategias de Diseño Bioclimático para Generar Condiciones de Confort en la Arquitectura

Mtro. Gerardo René Aranda Barajas¹

¹ Universidad Autónoma Metropolitana | Unidad Azcapotzalco, CyAD |
Correo: aranda@azc.uam.mx

Resumen

El objetivo de este trabajo es presentar una recopilación de distintos autores que determinan, en función de escalas macro y microclimáticas, la aplicación de posibles estrategias de diseño bioclimático para satisfacer las necesidades de confort en los medios edificados.

Derivado de las tendencias arquitectónicas establecidas desde la Revolución Industrial se han desarrollado nuevos modelos constructivos, de estructuras ligeras con escasa inercia térmica, en donde, las enormes envolventes transparentes, se encuentran expuestas a los efectos de la radiación solar directa. Esta exposición, permite ganancias o pérdidas de energía por el constante flujo térmico sin que existan barreras que sirvan como elemento regulador a las energías radiantes, así mismo, las extensas superficies de las plantas arquitectónicas interiores vuelven casi imposible la iluminación interior de manera natural en las horas que existe la disponibilidad de luz solar.

En la actualidad, las necesidades de acondicionamiento ambiental en los espacios interiores se satisfacen incorporando sistemas mecánicos de climatización y alumbrado artificial. La incorporación de estos sistemas creció de manera incontrolable, la velocidad a la cual las edificaciones fueron satisfaciendo las necesidades de confort utilizando medios artificiales fue desechando con la misma velocidad las técnicas pasivas de control ambiental (Coch y Serra, 1995).

Palabras clave: Estrategias, Confort, Diseño Bioclimático, Clima

Abstract

The aim of this paper is to present a compilation of different authors who determine, according to macro and microclimatic scales, the application of possible bioclimatic design strategies to meet the comfort needs of the built environment.

Derived from the architectural trends established since the Industrial Revolution, new construction models have been developed, of light structures with low thermal inertia, where the huge transparent envelopes are exposed to the effects of direct solar radiation, this exposure allows energy gains or losses by the constant thermal flow without barriers that serve as a regulating element to radiant energies, likewise, the extensive surfaces of the interior architectural plants, make almost impossible the interior lighting naturally in the hours that there is the availability of sunlight.

At present, the needs of environmental conditioning in interior spaces have been satisfied by incorporating systems, mechanisms and techniques of heating, air conditioning and artificial lighting, this incorporation of mechanisms grew uncontrollably, the speed at which the buildings were satisfying the needs of comfort using artificial means was discarding with the same speed the passive techniques of environmental control (Coch and Serra, 1995).

Keywords: Strategies, Comfort, Bioclimatic Design, Climate.

Introducción

De acuerdo con Szokolay (2008), las estrategias de control pasivo o de diseño bioclimático se determinan a partir de la relación de las condiciones climáticas con los requerimientos de confort de los ocupantes.

En la arquitectura bioclimática, las estrategias de diseño son las acciones óptimas para obtener un fin específico, estas acciones se basan en reglas, principios o directrices en busca de toma de decisiones, específicamente, para lograr los siguientes objetivos: (Fuentes, 2004, 2014) bienestar y confort, uso eficiente de la energía y la integración del medio edificado con el medio natural circundante.

Al respecto, Coch y Serra (1995) coinciden en que existe una preocupación en las prácticas arquitectónicas, sobre todo en dos aspectos del control ambiental: en el ahorro de energía y en la investigación de tecnologías pasivas.

El primero se encuentra directamente relacionado con el aislamiento de los edificios en donde las envolventes son diseñadas como barrera, filtro o regulador entre las condiciones ambientales exteriores e interiores (Altan, et al. 2016). El segundo se refiere a la investigación sobre las tecnologías alternativas que basan su funcionamiento en el uso de fuentes de energía renovable. Con la arquitectura pasiva, integrando técnicas y sistemas pasivos, se puede conseguir, en gran medida, la conservación del medio natural, el ahorro energético y la integración del medio construido al ambiente natural circundante.

El diseño pasivo y de bajo consumo de energía ayuda a la edificación a tomar ventaja del clima y de los flujos de energía natural para mantener el confort, así mismo, lo protege cuando las condiciones climáticas pueden llegar a ser severas (Altan, et al. 2016 y Rosenlund, 2015).

Las tecnologías pasivas, son sistemas que responden y utilizan los recursos naturales disponibles, con su uso ayudan a obtener niveles de confort en los espacios interiores minimi-

zando el uso de energías artificiales. Los sistemas pasivos de acondicionamiento ambiental utilizan como fuente principal a las energías naturales, por esto, las tecnologías pasivas y las edificaciones a las que se incorporan son considerados como sustentables.

Las estrategias de diseño bioclimático se aplican en dos casos en específico, el primero en condiciones de frío y el segundo en condiciones de calor. Para el primer caso, es necesario aplicar estrategias que permitan ganancias térmicas sin que existan pérdidas interiores de energía y para el segundo caso, las estrategias serán dirigidas a la protección de la radiación solar directa evitando ganancias térmicas y provocando las pérdidas de energía desde los espacios interiores.

Las estrategias de diseño bioclimáticos se determinan en función de las condiciones climáticas, ya sea globales o locales y se relacionan con los mecanismos de transferencia de calor (Fuentes, 2004, 2014), de acuerdo a la condición climática (frío o calor) el diseño de la edificación deberá admitir/excluir o conservar/rechazar la energía ambiental del exterior o el interior para mantener el confort para los ocupantes (figura 1).

Estrategias globales y locales de diseño bioclimático

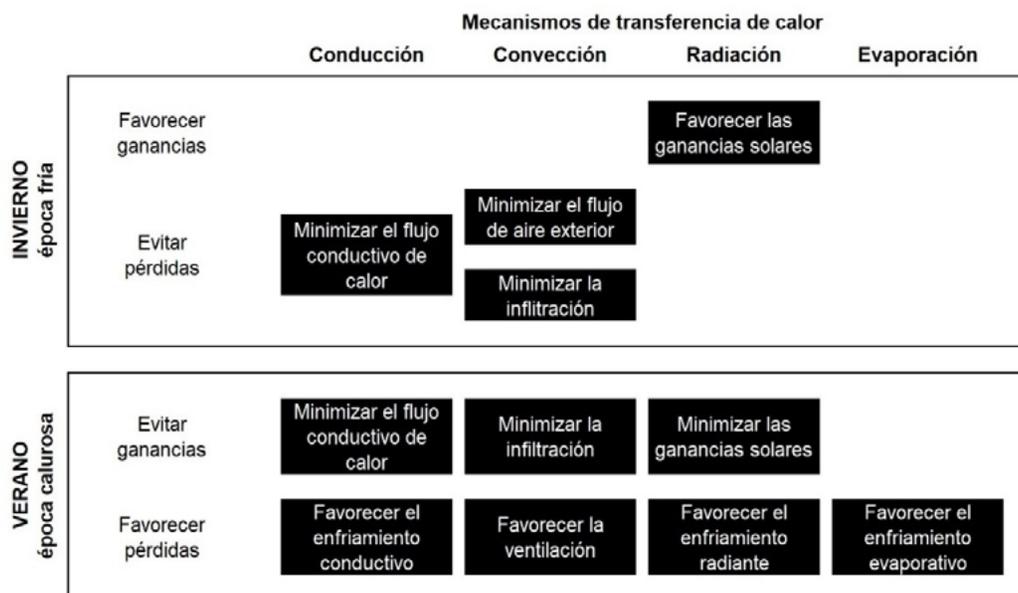


Figura 1. Estrategias básicas de diseño bioclimático en función de los flujos o conservación de energía.

Fuente: Watson, 1983 en Mapas Bioclimáticos de la República Mexicana (Fuentes, 2014).

La elección de la o las estrategias de diseño bioclimático que puedan ser incorporadas a la edificación dependerá de la escala climática a la que se pretenda dar solución, existen situaciones en donde la decisión se basa en la disposición de la información climática a la que se tenga acceso.

La disponibilidad de información climática a una escala macro o micro definirá la precisión de las estrategias a utilizar, ante esto, existen estrategias de diseño bioclimático que pueden denominarse globales o generales y estrategias locales o particulares.

Estrategias globales de diseño bioclimático

Los datos macroclimáticos disponibles constituyen el punto de partida para determinar las estrategias bioclimáticas que ayudarán a satisfacer los requerimientos de confort en las edificaciones (Tudela, 1982).

Existen criterios y estrategias bioclimáticas que se plantean en función de las características climáticas globales, sin embargo, por lo general, estas estrategias, por su escala, en ocasiones son consideradas como sólo guías de diseño proyectual.

En México, existe una gran variedad de climas, esta variedad es el resultado de una relación compleja multifactorial y no sólo responde a la posición geográfica o a la cantidad de radiación solar incidente. En México se han desarrollado diversas clasificaciones climáticas, sin embargo, algunas de las más utilizadas son la clasificación climática de Köppen, la Adaptación para México de la clasificación de Köppen realizada por Enriqueta García y la regionalización climática de México realizada por Rosalía Vidal.

Para cada uno de los climas o regiones climáticas que existen, las estrategias bioclimáticas serán distintas, existen autores que proponen, en función del clima global, estrategias generales o básicas de diseño bioclimático:

Docherty y Szokolay (1999) resumen las posibles estrategias de control térmico pasivo de la siguiente manera:

- **Periodo frío**
 - Calentamiento solar pasivo.
 - Efecto masa: almacenamiento térmico.
- **Periodo sobrecalentamiento:**
 - Efecto masa: almacenamiento térmico.
 - Ventilación nocturna.
 - Efecto movimiento de aire.
 - Enfriamiento evaporativo.
 - Enfriamiento evaporativo indirecto.

Watson (1983) propone las siguientes estrategias generales:

- **Época fría o de bajo calentamiento**
 - Promover la ganancia solar.
 - Minimizar la conducción.
 - Minimizar la infiltración y fugas de aire.

- **Época calurosa o de sobrecalentamiento**

- Minimizar la conducción.
- Minimizar la infiltración.
- Minimizar la ganancia solar.
- Promover el enfriamiento conductivo terrestre.
- Promover la ventilación.
- Promover el enfriamiento radiante.
- Promover el enfriamiento evaporativo.

Steven Szokolay (2008) menciona que la primera etapa para lograr un diseño bioclimático es analizar las condiciones climáticas y establecer la naturaleza del problema climático, es decir, relacionar el clima con los requerimientos humanos. Otra etapa consiste en la selección de las estrategias de control pasivo, Szokolay distingue cuatro estrategias básicas con algunas subdivisiones:

- Calentamiento solar pasivo.
- Efecto masa.
- Movimiento de aire.
- Enfriamiento evaporativo.

La Roche, et al. (2001) recomiendan, primero, identificar todas las causas probables que puedan causar disconfort térmico por sobrecalentamiento, segundo, analizar las variables que afectan a los flujos de calor en las edificaciones y tercero establecer principios de diseño para prevenir sobrecalentamiento, además de las recomendaciones anteriores, establecen estrategias generales para zonas de latitud baja:

- En latitudes bajas, regiones cálidas, la prevención de calentamiento constituye el primer paso para conseguir condiciones de confort y ahorros de energía.
- En las zonas tropicales, la alta intensidad de radiación solar, en combinación con las altas temperaturas, con frecuencia causan disconfort y un alto consumo de energías, en estos climas, minimizar las ganancias de calor en los edificios es la estrategia de diseño principal.

András Zöll y Steven Szokolay (2001) recomiendan la utilización de aislamiento térmico en los edificios como técnica para lograr y mantener el confort térmico en los espacios interiores de acuerdo a las siguientes consideraciones:

- En climas fríos, en edificios con calefacción, donde la pérdida de calor debe ser reducida.
- En climas cálidos, en edificios con aire acondicionado, donde las ganancias térmicas deben ser minimizadas.
- En climas donde inviernos fríos alternan con veranos muy cálidos, el aislamiento puede ser benéfico en ambas temporadas.

- En climas cálido secos la masa térmica de la edificación puede compensar las grandes variaciones de temperatura que se producen durante el día.
- En climas cálido húmedo el aislamiento puede ser reducido al mínimo utilizando ventilación cruzada.
- En edificios que se ubican en climas consistentemente fríos o cálidos, en donde el mayor uso de energía se destina al enfriamiento o calentamiento de los espacios interiores para lograr confort térmico.

Silvia de Schiller y Martin Evans (1991) realizan recomendaciones de estrategias en función de la caracterización de zonas bioambientales:

- **Zona bioambiental muy cálida**
 - Reducir o evitar el sobrecalentamiento estival o de verano.
 - Utilización de colores claros.
 - Incorporación de materiales o elementos con buen nivel de aislamiento térmico.
 - Proyección aleros para proteger superficies verticales o aberturas expuestas a la radiación solar directa.
 - Incorporación de postigos o cortinas de enrollar en todas las aberturas para controlar la radiación directa o difusa.
 - Facilitar la ventilación cruzada.
 - Incorporación de superficie con gran capacidad térmica en pisos y paredes interiores para reducir la amplitud térmica interior.
 - Controlar estrictamente el tamaño de las aberturas expuestas a las orientaciones con más incidencia de radiación solar directa.
- **Zona bioambiental cálida**
 - Aún, cuando las condiciones climáticas no son tan rigurosas como las que prevalecen en la zona muy cálida, se recomienda seguir las mismas recomendaciones.
 - Orientar las edificaciones y dimensionar los espacios interiores para optimizar el asoleamiento estival.
- **Zona bioambiental templada – cálida**
 - Aprovechamiento de las corrientes de aire para refrescar y deshumidificar.
 - Ventilación cruzada diseñando las aberturas para conducir los flujos del viento.
 - Agrupamientos compactos.
 - Utilización de materiales de alta densidad.
 - Utilización de aislamiento térmico para evitar aumentos en la TRM y del aire interior.
- **Zona bioambiental templada – fría**
 - Aislante térmico para periodos cálidos y fríos.
 - Uso de colores claros.

- Protección solar para evitar sobrecalentamientos.
- Formas compactas y materiales pesados para reducir el impacto de la amplitud térmica.
- **Zona bioambiental fría**
 - Uso de materiales con gran inercia térmica.
 - Aprovechamiento de la radiación solar directa.
 - Protección del viento frío.
 - Edificaciones compactas que conserven la temperatura interior.
 - Utilización de aislantes térmicos.
 - Utilización de ventanas con doble vidrio y cámara de aire.
 - Aberturas de tamaño reducido.
- **Zona bioambiental muy fría**
 - Las mismas recomendaciones que las efectuadas para la zona bioambiental fría, acentuando su utilización.

Fernando Tudela (1982) recomienda la utilización de las siguientes estrategias de acuerdo al clima global:

- **Climas cálidos y húmedos**
 - Ventilación como estrategia más importante.
 - Permeabilidad de la envolvente vertical al movimiento del aire.
 - Ventilación cruzada en edificaciones de crujía simple.
 - Espacio adecuado entre edificaciones para evitar la sombra de viento a las edificaciones cercanas.
 - Evitar el sobrecalentamiento de las corrientes de aire.
 - Espacios interiores con alturas libres suficientes, superior a los 3 m.
 - Enfriamiento radiante nocturno para reducir la TRM interna diurna.
 - Protección de los elementos constructivos expuestos a la radiación solar directa.
 - Utilización de aleros y pórticos cubiertos para proteger de la radiación solar directa y de la precipitación pluvial sin obstruir el flujo del aire.
 - Utilización de materiales y colores reflectantes en las orientaciones con incidencia de radiación solar directa.
 - Cubiertas dobles con cámara de aire interna para ventilación eficiente y control de la temperatura que ingresa por la superficie horizontal.
 - Uso de vegetación para exterior para generar sombras en los elementos expuestos a la radiación solar.
 - Correcta orientación, ventilación y aislamiento térmico en los espacios donde se genera mayor cantidad de calor humedad como cocinas y sanitarios.

- Diseñar de manera correcta los espacios para controlar la producción de calor metabólico excesivo.
 - Uso de aberturas para expulsar el calor y la humedad excesivas.
 - Evitar el deslumbramiento provocado por la luz solar.
- **Climas cálidos y áridos**
 - Utilización de aislamiento térmico como elemento fundamental.
 - Utilización de materiales con gran inercia térmica para atemperar las fuertes oscilaciones térmicas diurnas.
 - Uso de materiales con gran capacidad térmica para emitir radiación infrarroja en horas nocturnas, en caso de temperaturas bajas y cielo despejado.
 - Uso de elementos para protección de la radiación solar directa.
 - Formas compactas para evitar grandes exposiciones de las superficies.
 - Espacios exteriores y públicos resguardados de la radiación solar directa.
 - Aberturas pequeñas protegidas de la radiación solar directa para minimizar la entrada de aire caliente con polvo dirigidas a espacios resguardados como patios.
 - Utilización de vegetación para generar sombras y limitar la erosión del suelo.
 - Uso de cubiertas pesadas y aislantes con ventilación intermedia.
 - Uso de ventilación selectiva.
 - **Climas compuestos y de altura**
 - En estos climas, las estrategias deberán contemplar el carácter estacional de la variación del clima.
 - Espacios diseñados y adaptados para ser utilizados climáticamente al ciclo anual.

La Comisión Nacional de Fomento a la Vivienda (CONAFOVI), en la guía para el uso eficiente de la energía en la vivienda (2006) menciona que para obtener una disminución en el uso de la energía en las viviendas es necesario conocer las necesidades de diseño que se dan a partir de la interacción entre los habitantes y el clima, las condiciones de confort térmico establecidas y las formas en las que el calor se propaga en los medios edificados.

En la guía, las estrategias para la climatización pasiva fueron establecidas tomando como base los distintos bioclimas existentes en el país, Morillón (2004) define al bioclima como la asociación de elementos meteorológicos de un lugar que influyen en la sensación de bienestar higrotérmico del humano, para determinar el bioclima de cualquier lugar se correlacionan los siguientes elementos climáticos: temperatura seca del aire, humedad presente en el aire, radiación solar, viento y temperatura de radiación en el interior del entorno físico.

La CONAFOVI identifica en México tres principales tipos de bioclimas:

- Semifrío
- Templado
- Cálido

De los bioclimas principales, de acuerdo a la cantidad de humedad ambiental, se derivan los siguientes subtipos¹:

- Bioclima cálido seco
- Bioclima cálido subhúmedo
- Bioclima cálido húmedo
- Bioclima templado seco
- Bioclima templado
- Bioclima templado húmedo
- Bioclima semifrío seco
- Bioclima semifrío
- Bioclima semifrío húmedo

De acuerdo a los distintos bioclimas que determina la CONAFOVI para México se muestran los requerimientos de climatización natural (ver anexo1).

Estrategias locales de diseño bioclimático

Las estrategias de diseño bioclimático locales o particulares se determinan en función de las condiciones microclimáticas existentes, es decir, son una respuesta a las condiciones del clima circundante del emplazamiento y del análisis de la información climática obtenida.

En México, la principal fuente de información climática es la red de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), para conocer las condiciones climáticas particulares del lugar donde se emplazará la edificación se deben obtener los valores de los elementos climáticos necesarios para que los datos climatológicos puedan ser utilizados.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) establece criterios de validación de datos climáticos como la referencia 100, esta referencia indica que las estaciones climatológicas y los datos que de ellas se obtengan serán válidos para los lugares que se encuentren a una distancia que no supere un radio de 5 km desde la estación climatológica, que el terreno no sea montañoso y que la altitud no supere los 100 metros entre la estación y el sitio de análisis, en caso de que el terreno sea montañoso y la diferencia de altitud supere los 100 m. los valores tendrán que calcularse por diferencia de gradiente térmico.

Para determinar las estrategias aplicables a una escala local o particular para un emplazamiento específico, es necesario contar con la información climatológica de la estación más cercana, si no existen datos climatológicos cerca de la zona de estudio, se puede recurrir a métodos de interpolación mediante simulaciones que resultan ser muy precisas para la mayoría de las aplicaciones de diseño bioclimático (Morillón, 2004).

1 Para conocer los bioclimas que existen en las diferentes ciudades de México puede consultar la Guía para el uso eficiente de la energía en la vivienda.

Se han desarrollado herramientas de análisis climático y de confort que ayudan a determinar las estrategias bioclimáticas en función de las condiciones ambientales particulares.

Tablas de Mahoney

Carl Mahoney desarrolló una serie de tablas que permiten definir estrategias de diseño de acuerdo a los principales parámetros climáticos (Fuentes, 2004), temperatura, Humedad, Precipitación y Oscilación térmica (figura 2).

Partiendo de los datos climáticos del lugar para cada mes del año (temperaturas, humedad y precipitaciones), las tablas de Mahoney generan, mes a mes, un conjunto de seis indicadores en relación con la humedad y la lluvia (indicadores H1, H2, H3) y con la aridez y el calor (indicadores A1, A2, A3). Posteriormente, basándose en estos indicadores, un conjunto de reglas permite generar recomendaciones arquitecturales generales (Tablas de Mahoney).

INTRODUCCIÓN DE DATOS												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Media de las temperaturas máximas					29.5	28.9	28.8		28.2	29.0	29.5	29.1
Media de las temperaturas mínimas	22.4	22.4	23.5	23.4	23.3	22.9	22.8	22.8	23.1	23.8	23.9	23.5
Humedad relativa máxima	90%	91%	90%	89%	91%	89%	89%	94%	92%	92%	86%	88%
Humedad relativa mínima	83%	83%	80%	80%	83%	83%	79%	80%	79%	78%	82%	83%
Lluvia (mm Hg)	345.8	281.2	237.1	273.9	341	227.3	122.2	99.8	99.6	107.7	71.8	164.1

ESTRÉS TÉRMICO												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
DÍA	Frío	Frío	Frío	Frío	Calor	Calor	Calor	Frío	Calor	Calor	Calor	Calor
NOCHE	Calor											

INDICADORES												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
H1 Ventilación esencial (calor y humedad)					X	X	X		X	X	X	X
H2 Ventilación deseable (calor y humedad)												
H3 Protección contra la lluvia	X	X	X	X	X	X						
A1 Inercia térmica												
A2 Dormir fuera												
A3 Problemas con el frío												

RECOMENDACIONES ARQUITECTURALES												
PLAN MASA												
Edificios orientados en eje este-oeste para disminuir exposición al sol												
ESPACIO ENTRE EDIFICIOS												
Grandes espacios para favorecer la penetración del viento y protección contra vientos cálidos o fríos												
CIRCULACIÓN DEL AIRE												
Edificios de orientación simple. Dispositivos que permitan una circulación de aire permanente												
DIMENSIONES DE LAS ABERTURAS												
Grandes, 40 a 80% de las fachadas norte y sur												
POSICIÓN DE LAS ABERTURAS												
Aberturas en los muros norte y sur, a la altura humana del lado expuesto del viento												
PROTECCIÓN DE LAS ABERTURAS (*)												
Protección contra la radiación solar directa												
Prever una protección contra la lluvia												
MUROS												
Construcciones ligeras; débil inercia térmica												
TEJADO												
Ligero y bien aislado												
ESPACIOS EXTERIORES (*)												
Drenaje apropiado de agua de lluvia												
Protección contra las lluvias violentas												

Figura 2. Tablas de Mahoney.

Fuente: Tablas de Mahoney.

Los diferentes indicadores que utilizan las tablas de Mahoney son los siguientes:

- H1: Necesidades de ventilación debido a la humedad y el calor
- H2: Ventilación deseable debido a la humedad y el calor
- H3: Necesidad de protección contra la lluvia
- A1: Es deseable la utilización de inercia térmica para obtener confort en el edificio
- A2: Puede ser necesario dormir en el exterior
- A3: Frío; es necesario disponer de mecanismos de aclimatación naturales y/o artificiales

Además de presentar las estrategias bioclimáticas que se pueden aplicar, las tablas de Mahoney indica, para cada mes del año, la sensación térmica en tres estados: sensación térmica de calor, sensación térmica de frío y confort.

Gráfica bioclimática de Víctor Olgyay

Uno de las grandes aportaciones de Olgyay para la arquitectura fue la generación del Gráfico de Confort también conocido como Gráfica Bioclimática, Carta Bioclimática o Diagrama Bioclimático, en esta herramienta se relacionan, para ambientes exteriores, la Temperatura del aire y la Humedad relativa para determinar zonas de confort en invierno y verano, así como las correcciones por radiación, velocidad del aire o humidificación que pueden ampliar esta zona de confort (ZC).

Para determinar las correcciones arquitectónicas necesarias en la gráfica bioclimática se utilizan la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa de cada uno de los meses del año, en la parte central se encuentra la ZC entre los valores 21.1 °C como límite inferior y 27.8 °C como límite superior y con una HR de 20% a 70%, más abajo se encuentra la ZC para invierno, al colocar los valores de temperatura y humedad, a todos los momentos en donde sus valores se encuentren fuera de la ZC deberá aplicarse la estrategia correctiva recomendada (figura 3).

Por encima del límite superior de la ZC Olgyay recomienda aplicación de viento, enfriamiento y evaporación como correcciones bioclimáticas para regresar a la ZC. Por debajo del límite inferior de la ZC las correcciones bioclimáticas recomendadas son aplicación de radiación solar directa.

En el diagrama bioclimático de Olgyay se establece que el estado de confort se encuentra en espacios sombreados, sin la presencia de sombras las temperaturas aumentarán de manera rápida provocando un estado de insatisfacción térmica por calor.

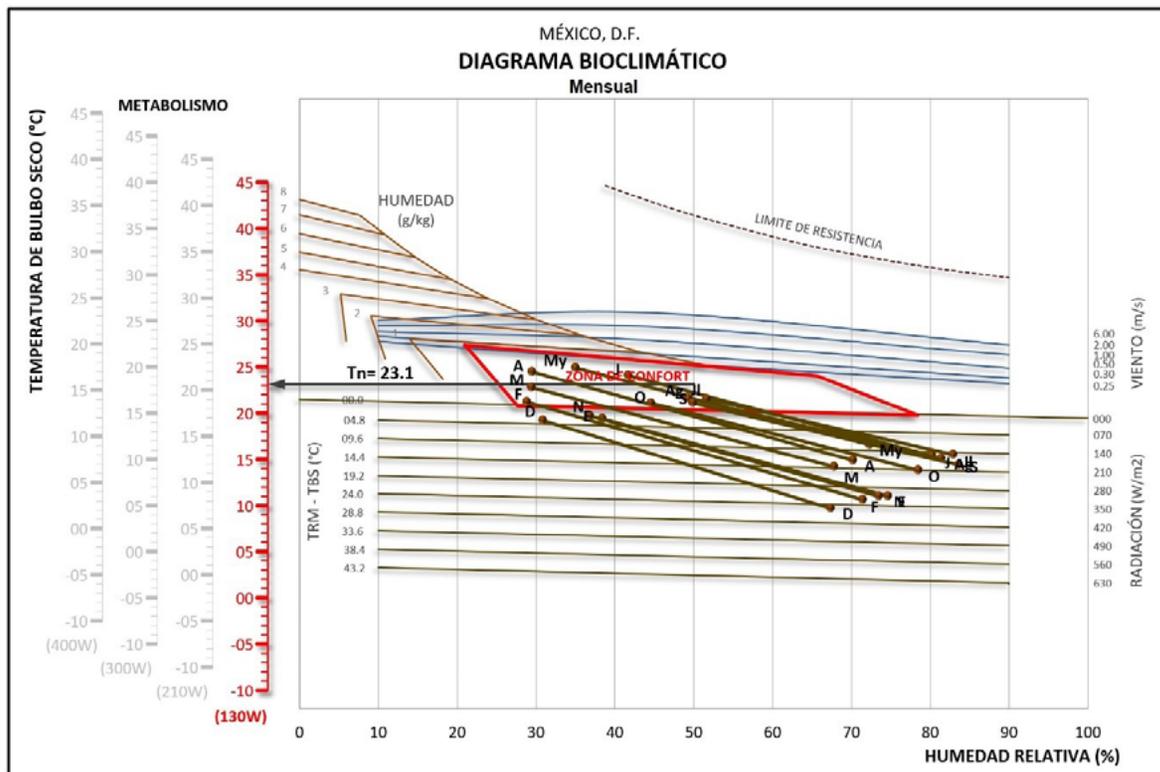


Figura 3. Gráfica bioclimática de Olgay con temperaturas locales de la ciudad de México.

Fuente: Bioclimatic Analysis Tool (BAT), Fuentes y Rincón 2014.

Carta Psicrométrica de Givoni

La carta psicrométrica de Baruch Givoni es un diagrama que permite determinar las posibles estrategias de diseño bioclimático que pueden ser utilizadas de acuerdo a las condiciones higrotérmicas de la edificación en distintos meses del año.

En la carta psicrométrica de Givoni se definen las relaciones y los parámetros psicrométricos del aire húmedo, los parámetros que se utilizan en la carta psicrométrica son los valores máximos y mínimos de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo en periodos mensuales, la presión de vapor de agua, humedad absoluta y la humedad relativa de la zona de estudio (Fuentes, 2004).

Graficando la posición de los valores de los parámetros psicrométricos utilizados sobre la carta, se determinan las estrategias de diseño que deben ser aplicadas para lograr condiciones de confort interior (figura 4).

La ZC se encuentra entre los valores 21 °C como límite inferior y 26 °C como límite superior, la HR se establece desde el 20% al 80%, fuera de la zona de confort, las estrategias de diseño que pueden aplicarse son:

- Calentamiento solar activo
- Calentamiento solar pasivo
- Humidificación
- Enfriamiento evaporativo
- Alta masa térmica
- Ventilación natural o mecánica
- Alta masa con ventilación nocturna
- Enfriamiento natural activo
- Aire acondicionado convencional
- Deshumidificación convencional

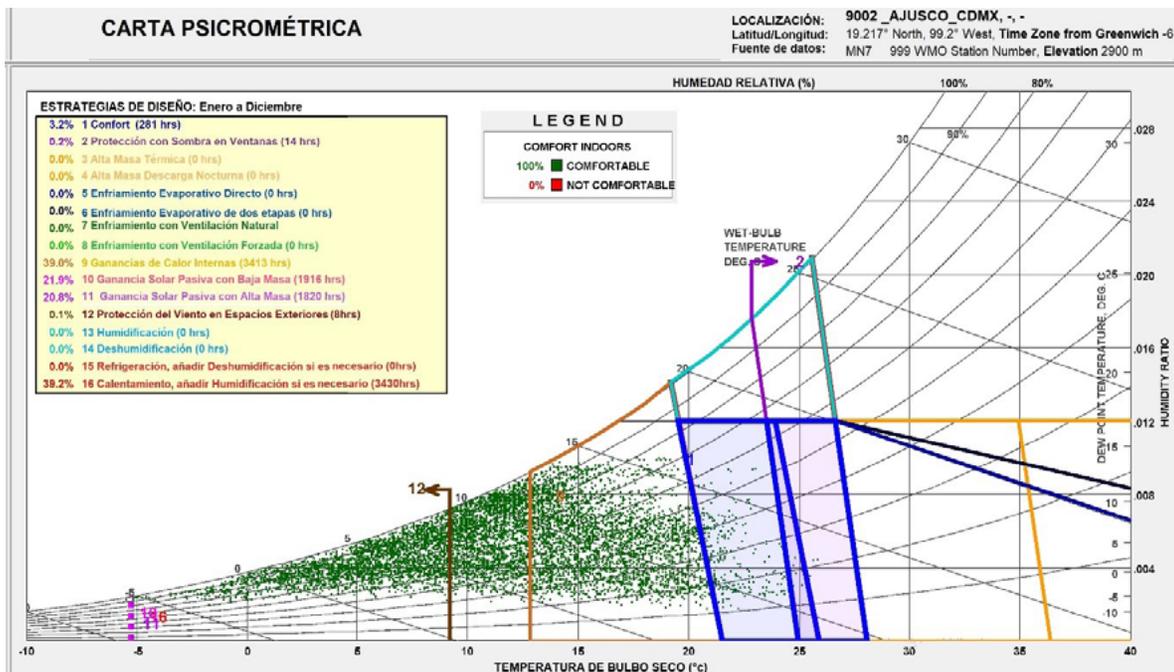


Figura 4. Carta psicrométrica con temperaturas locales de estación Ajusco en la ciudad de México.

Fuente: Climate Consultant 6.0 .

La carta psicrométrica se encuentra organizada de la siguiente manera:

- En el eje de las abscisas se representa la temperatura de bulbo seco.
- En el eje de las ordenadas se representa la tensión parcial de vapor de agua contenido en el aire.
- Las líneas curvas representan la humedad relativa.
- En la línea que corresponde al 100% de humedad relativa se encuentran los valores de la temperatura e bulbo húmedo.

A cada una de las 14 distintas zonas representadas en la carta psicrométrica de Givoni le corresponden un conjunto de estrategias de diseño bioclimático que pueden ser aplicadas (García de Diego, et al. 2011):

- **Zona de confort**

La ZC definida por Givoni se encuentran en el límite inferior con un valor de 21 °C y el límite superior con 26 °C y con valores de humedad relativa de 20% a 70%. En la ZC no se requiere de ninguna medida correctiva para la obtención del confort interior.

- **Zona de confort permisible**

Es un perímetro en el que el estado de confort es alcanzable realizando pequeñas correcciones principalmente en el grado del arropamiento, la actividad física y la capacidad de aclimatación.

- **Calefacción por ganancias internas**

En esta zona se consigue llegar a la ZC aumentando la temperatura interior a través ganancias térmicas aportadas por los ocupantes², por la generación de calor de los aparatos eléctricos y por procesos de combustión.

- **Calentamiento solar pasivo**

Se pueden llegar a la ZC utilizando elementos arquitectónicos que capten y acumulen calor y que posteriormente los transmitan a los espacios interiores que requieran ser calentados. Las estrategias de calentamiento solar pasivo pueden ser directas o indirectas.

- **Calefacción solar activa**

El calentamiento solar activo funciona de manera similar que los sistemas pasivos, sin embargo, pueden ser utilizados mecanismos activos independientes como bombas de calor, controles o motores que aumenten el rendimiento o la eficiencia de la energía solar.

- **Humidificación**

En esta zona se presentan situaciones de falta de humedad y frío, la estrategia bioclimática es aumentar la humedad relativa interior a partir del ingreso de aire previamente humedecido por una superficie húmeda.

- **Calefacción convencional**

En ciertas condiciones climáticas extremas es necesario generar ganancias térmicas a partir del uso de energías no naturales como el carbón, el gas o la electricidad.

Sin embargo, la tarea del proyectista bioclimático deberá considerar desde inicio al diseño y a las capacidades térmicas de los materiales constructivos como medio fundamental para lograr el confort interior y la calefacción convencional como sistema de apoyo.

2 Ganancias térmicas por radiación y por el calor metabólico producido.

- **Protección solar**

La tarea fundamental de los sistemas de protección solar es evitar la incidencia de radiación solar directa en la envolvente térmica, la radiación solar interceptada es acumulada, reflejada y disipada al aire exterior.

Estos sistemas incluyen la protección de los huecos o vanos con toldos, celosías, persianas, umbráculos, parasoles, con vegetación o a través de protecciones reflectantes en los cristales.

- **Refrigeración por alta masa térmica**

En esta zona es necesaria la reducción de la temperatura interior a través del amortiguamiento, la disipación y la protección del calor que puede ingresar a la edificación.

La cantidad de calor que puede absorber y fluir a través de la envolvente térmica se encuentra determinada por las propiedades y capacidades térmicas de los materiales constructivos, además, es necesario considerar el número y espesor de las capas, el tipo y color del acabado y la utilización de aislamiento térmico.

- **Enfriamiento evaporativo**

En esta zona es necesaria la reducción de la temperatura por medio de la evaporación de agua o algún otro fluido y el aumento de la humedad relativa.

Los sistemas de enfriamiento evaporativo pueden ser pasivos o activos directos e indirectos

Los sistemas pasivos directos enfrían el aire al pasarlo por vegetación, por cuerpos de agua o canalizaciones enterradas y parcialmente llenas de agua; los sistemas pasivos indirectos enfrían el aire interior a través del enfriamiento de elementos constructivos que absorberán el calor del aire contenido.

Los sistemas activos directos utilizan energías convencionales que introducen aire húmedo desde el exterior con el apoyo de ventiladores eléctricos; los sistemas activos indirectos rocían agua en elementos arquitectónicos con altas temperaturas para provocar evaporación y absorber el calor interior.

- **Refrigeración por alta masa térmica con renovación nocturna**

La función principal de estos sistemas es evitar que el calor captado por las superficies exteriores de la edificación ingrese al interior rápidamente, de acuerdo a las características ambientales a las que se encuentre expuesta la edificación se requieren de un amortiguamiento de unas ocho a 12 horas para que el calor fluya hacia el interior y así poder utilizar la ventilación nocturna para expulsar el calor acumulado por la envolvente térmica.

- **Refrigeración por ventilación natural y mecánica**

Este sistema utiliza la ventilación para lograr la reducción de la temperatura interior, así mismo con la ventilación natural o mecánica es posible renovar el aire con exceso de vapor de agua.

Para la ventilación natural pasiva existen distintas estrategias como la ventilación cruzada, el efecto chimenea, la torre de viento, cámara solar o el efecto venturi.

La ventilación mecánica utiliza elementos activos de apoyo para aumentar la eficiencia de la ventilación, pueden utilizarse torres evaporativas con ventiladores, patios conectados con los espacios interiores y ventilación subterránea.

- **Aire acondicionado**

En lugares en donde las condiciones climáticas no permitan un acondicionamiento pasivo es necesario utilizar sistemas del aire acondicionado para reducir las temperaturas interiores, sin embargo, estos sistemas deberán ser considerados de apoyo siendo necesario como primera opción el diseño bioclimático y sistemas pasivos de acondicionamiento ambiental.

- **Deshumidificación convencional**

La humedad excesiva en los espacios interiores reduce la capacidad de disipación del calor, una de las mejores técnicas para reducir la humedad relativa ambiental es la ventilación natural o mecánica.

Triángulos de Confort de Silvia de Schiller y Martin Evans

Los triángulos de Confort, es un modelo gráfico de diseño bioclimático que pone mayor énfasis en la amplitud térmica, los triángulos permiten la visualización directa y el análisis comparativo de la variación periódica diaria de temperatura.

Los triángulos de confort utilizan los valores de la temperatura media del periodo analizado (eje horizontal en °C) y los valores de la amplitud térmica (eje vertical en K), cualquier punto que se establezca en el gráfico representa la variación de temperatura durante el día con la combinación de temperatura media, la representación del gráfico tiene como objetivo facilitar las siguientes tareas y aplicaciones (Evans, 2000):

- Presentar y visualizar los datos climáticos representativos de la variación diaria típica de temperatura durante distintas épocas del año.
- Definir zonas de confort según el nivel de actividad física.
- Seleccionar estrategias de diseño bioclimático a través de modificaciones favorables de la variación de la temperatura exterior para lograr condiciones interiores deseables.
- Evaluar variaciones diarias de las temperaturas interiores mediante la utilización de registros de mediciones en proyectos realizados o con datos obtenidos con simulaciones numéricas.

Los triángulos de confort se encuentran organizados en dos secciones (figura 5):

La primera sección indica cuatro zonas de confort de acuerdo al grado de actividad, en relación a las zonas se forman los triángulos.

- A= Actividad sedentaria
- B= Descanso
- C= Circulación interior
- D= Circulación exterior

En esta sección, en el eje vertical, la amplitud térmica se determina con la siguiente fórmula:

$$T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}, \text{ expresada en K}$$

En el eje vertical, la T_{media} se determina con la siguiente fórmula:

$$T_{\text{med}} = (T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}) / 2$$

En la segunda sección se muestran las estrategias que pueden ser aplicadas de acuerdo a las condiciones climáticas de la zona de estudio, las estrategias bioclimáticas generales son las siguientes:

- 1= Ventilación cruzada
- 2= Ventilación selectiva
- 3= Inercia térmica
- 4= Ganancias internas
- 5= Ganancias solares

Además, de las estrategias anteriores, el gráfico permite combinar estrategias para conseguir el confort:

- 3 + 5= Inercia + Solar
- 3 + 2= Refrescamiento
- 3 + 4

Los triángulos de confort permiten clasificar y visualizar las condiciones térmicas de las edificaciones para apoyar en la toma de decisiones en el uso de las estrategias bioclimáticas aplicables.

Agrupación Bioclimática

Desempeño Bioclimático de una Escuela de Carlos Leduc en Clima Cálido Sub-Húmedo

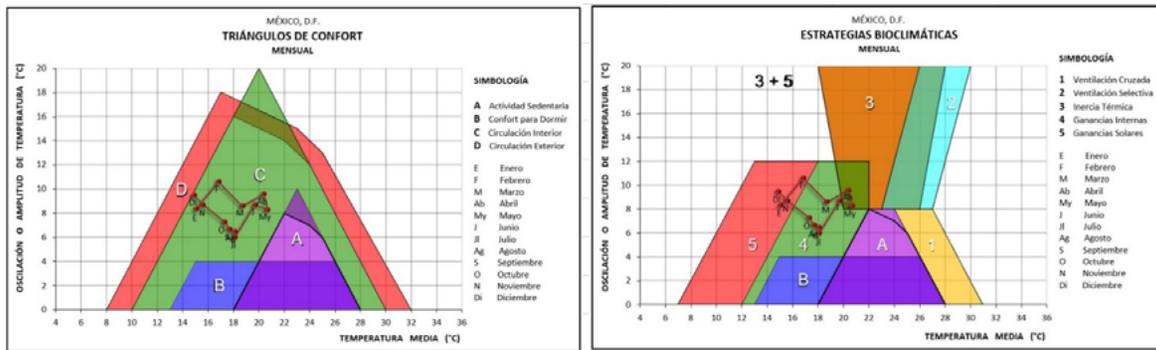


Figura 5. Triángulos de Confort y Estrategias Bioclimáticas.

Fuente: Bioclimatic Analysis Tool (BAT), Fuentes y Rincón 2014.

La Agrupación Bioclimática es una metodología desarrollada por Aníbal Figueroa y Víctor Fuentes, esta metodología permite definir el bioclima en función de los requerimientos de climatización natural, relaciona, en una matriz, tres valores de la Tmedia del mes más caluroso con tres valores de precipitación anual acumulada de la zona de estudio, a partir de esta relación de valores se definen los requerimientos bioclimáticos:

Temperatura media del mes más caluroso (°C)	Precipitación anual acumulada (mm)
<21 °C	<650 mm
21 °C a 26 °C	650 a 1,000 mm
>26 °C	>1,000 mm

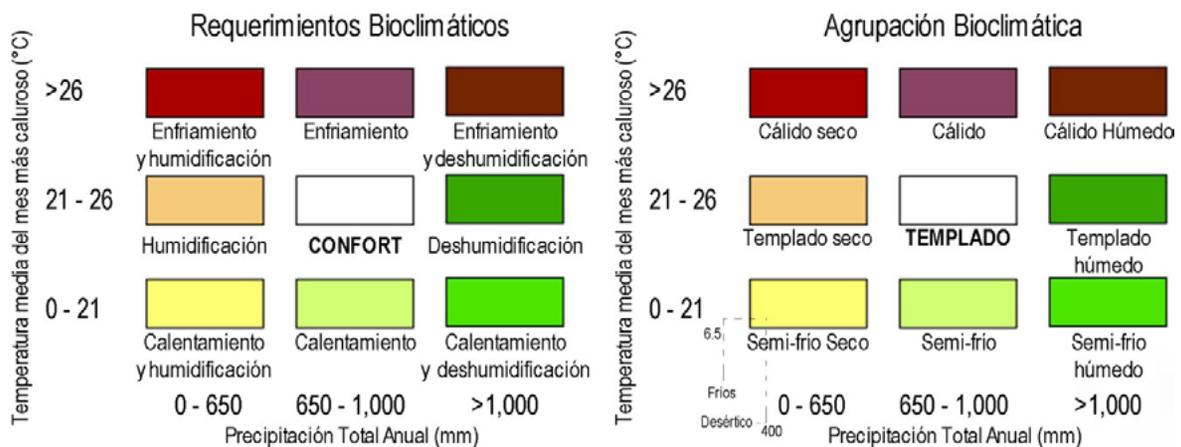


Figura 6. Requerimientos bioclimáticos y Agrupación Bioclimática.

Fuente: Mapas Bioclimáticos de la República Mexicana.

Con la relación entre los valores de temperatura media y precipitación pluvial se establecen nueve tipos de requerimientos bioclimáticos que pueden ser aplicados en las edificaciones para estar en condiciones de confort higrotérmico, así mismo, la metodología define la agrupación bioclimática en la zona de estudio de donde fueron obtenidos los valores de los elementos bioclimáticos utilizados (figura 6).

Esta metodología puede ser aplicada de manera local, sin embargo, como lo refieren los propios autores, no sustituye a las clasificaciones realizadas por Köppen o la modificada por Enriqueta García, por el contrario, esta herramienta muestra, de manera rápida, los requerimientos bioclimáticos desde un punto arquitectónico (Fuentes, 2014).

Víctor Fuentes (2014) realiza una descripción detallada de las estrategias de diseño bioclimático aplicables de acuerdo al periodo estacional en donde se presentan las distintas condiciones de frío o calor, las estrategias deben contrarrestar o aprovechar los elementos climáticos, con el objetivo de brindar confort en los medios edificados en función de los elementos climáticos existentes:

1. Calentamiento/Enfriamiento
2. Inercia/Masividad
3. Humidificación/Deshumidificación
4. Ventilación
5. Iluminación

Calentamiento/Enfriamiento

En periodo frío lo importante es el calentamiento de los espacios interiores promoviendo las ganancias térmicas a partir de ganancias solares utilizando las siguientes estrategias bioclimáticas:

a) **Ganancia Solar Directa:** cuando la radiación solar penetra por superficies acristaladas o transparentes se puede aumentar la temperatura interior, siempre que las temperaturas externas se encuentren por debajo de la ZC establecida (de Schiller y Evans, 1991).

b) **Ganancia Solar Indirecta:** esta estrategia funciona cuando la radiación solar incide sobre superficies opacas de la construcción las cuales captan, almacenan y distribuyen la energía recibida, a diferencia de la ganancia solar directa, que sucede de manera casi instantánea, los aportes térmicos, utilizando estrategias de ganancia solar indirecta, tienen un retardo en tiempo, este retardo, dependerá de la inercia térmica de los materiales constructivos (Fuentes, 2014).

c) **Calentamiento Solar Aislado:** esta estrategia se realiza a través de dispositivos pasivos de calentamiento, por lo general, los dispositivos se encuentran adosados o aislados de la edificación, un ejemplo de esta estrategia la podemos encontrar en los

invernaderos adosados, en donde se almacena calor, para luego ser compartido con el interior de la edificación cuando sea requerido.

En periodo de calor, enfriar los espacios interiores se vuelve el objetivo fundamental, esta condición es requerida cuando las temperaturas medias se encuentran por encima de los límites superiores de la ZC, debido a esta necesidad, se deben restringir las ganancias solares utilizando las siguientes estrategias:

a) Minimizando el flujo conductivo

Masividad: utilizando materiales masivos o aislantes, las ganancias por conducción térmica pueden ser minimizadas, la masividad puede ser combinada con ventilación nocturna, el material constructivo funciona como sumidero de la energía captada, el proceso de acumulación térmica se realiza durante el día, la distribución, en función de las características térmicas del material, se realiza en la noche, con lo cual, una ventilación nocturna ayudará a vaciar y expulsar hacia el exterior al calor acumulado en los materiales constructivos.

b) Enfriamiento evaporativo

Esta técnica de enfriamiento pasivo es un proceso que se realiza por el efecto de evaporación como disipador natural del calor, cuando el calor y el aire seco entran en contacto con el agua, esta comienza a evaporarse con la ayuda del calor latente tomando energía del aire, por lo tanto, la temperatura disminuye y la humedad relativa aumenta.

Cuando la temperatura ambiente se aproxima a la temperatura corporal el ser humano activa sus mecanismos termorreguladores y utiliza el enfriamiento evaporativo mediante la transpiración y el jadeo para disipar el calor hacia el ambiente y reducir su temperatura corporal (Tejeda, et al, 2018).

c) Enfriamiento radiante

Todos los materiales emiten energía en forma de radiación electromagnética, las edificaciones absorben energía radiante durante el día y la emiten durante la noche, de acuerdo al flujo de energía, los materiales con mayor energía comparten energía con aquellos elementos con menor energía, durante la noche, la envolvente térmica, en especial la cubierta, emite radiación electromagnética que es absorbida por el cielo, el potencial de absorción del cielo se encuentra determinado por la cantidad de nubes y contaminación que se encuentre suspendida en la atmósfera, en cielos totalmente despejados, el potencial se incrementa.

d) Enfriamiento hacia la tierra

La estabilidad térmica del suelo, debido a la masividad del material, permite que las temperaturas, entre los 3.50 y 6.00 metros de profundidad se mantengan en un estado relativamente estable sin cambios drásticos (Fuentes, 2014), la arquitectura bio-

climática aprovecha esta característica térmica como estrategia para enfriar el interior de los medios edificados.

Para aprovechar el potencial de enfriamiento del suelo, puede utilizarse el denominado enfriamiento por sistema directo, en el cual, las edificaciones deberán estar en contacto directo con el suelo o con espacios construidos que se encuentren enterrados en la tierra para enfriar el aire y posteriormente compartir ese aire reducido en temperatura hacia los espacios interiores.

Los sistemas indirectos son aquellos que utilizan tuberías o ductos denominados Tubos de enfriamiento de tierra, estos tubos enterrados en la tierra inyectan aire fresco desde el exterior, con lo cual, la temperatura interior se reduce de manera pasiva.

Inercia/Masividad

Las estrategias de Inercia térmica y Masividad pueden ser utilizadas para enfriamiento y calentamiento, su aplicación dependerá de las condiciones climáticas existentes en la zona donde se encuentre emplazado el medio edificado.

a) Inercia térmica

Con el uso de materiales con gran inercia térmica se aseguran temperaturas más elevadas durante las horas nocturnas, esto se debe al almacenamiento térmico que sucede durante el día, por el contrario, en las noches cuando las temperaturas disminuyen el calor almacenado es compartido con los espacios interiores manteniendo temperaturas confortables (de Schiller y Evans, 1991).

b) Masividad

El efecto masa es una de las más importantes estrategias de control pasivo, en climas fríos, la masividad puede mantener las temperaturas estables, si se combina con un aislante ligero, las condiciones ambientales pueden ser aún mejor. En climas cálido-secos con una gran variación diurna, con temperaturas exteriores demasiado altas o demasiado bajas, una construcción pesada o masiva puede garantizar y mantener condiciones interiores confortables sin la necesidad de recurrir a refrigeración mecánica durante el día o calefacción por la noche (Szokolay, 2008).

Humidificación/Deshumidificación

El aire que respiramos debe encontrarse sometido a un proceso de acondicionamiento que regularmente se presenta en tres procesos: calentamiento, humidificación y filtración. Para que el aire que aspiramos no represente un problema para nuestra salud, debe calentarse por convección, dentro del mismo organismo, y debe de humedecerse por el agua que se encuentra dentro de nuestras mucosas (Tejeda, et al. 2018), si el cuerpo humano no puede garantizar condiciones necesarias en el aire que inhalamos se pueden provocar afectaciones en la salud.

De manera análoga, en el interior de los espacios interiores, la humedad relativa debe mantenerse en valores relativamente estables para reducir la formación de infecciosos o alérgicos, la Universidad de Simon Fraser de la Columbia británica en Canadá (1986, citado en Tejeda, et al.) establece un valor mínimo de 40% y un valor máximo de 70% para evitar problemas de salud.

Olgay estableció que la Zona de Confort, en relación a la Humedad Relativa, debe encontrarse entre el 20% y 80% para sentir comodidad (Morales, 2019). por su parte, Givoni estableció los valores de la humedad relativa entre el 20% y 80% (Fuentes, 2014).

El porcentaje de humedad relativa que se encuentra presente en el ambiente interior afecta de manera directa al confort térmico, por lo cual, los valores deben de controlarse con estrategias de humidificación, cuando el porcentaje es bajo, esta estrategia se lleva a cabo agregando más cantidad de agua a la masa de aire, o, por el contrario, estrategias de deshumidificación cuando el porcentaje es alto, es decir, remover vapor de agua del aire.

Si la humedad es alta dificulta la transpiración del cuerpo humano y la disipación del calor corporal, si existe humedad ambiental alta en combinación con temperaturas altas, las sensaciones térmicas se vuelven incómodas, altos porcentajes de humedad reducen la capacidad de perder calor por medio de la transpiración. Con porcentajes de humedades relativas bajas, entre 20% y 25%, los ocupantes presentarán resequedad en ojos, piel y mucosas, con humedades del 10% la pérdida de fluidos por evaporación en el cuerpo humano aumenta hasta un 28% (Tejeda, et. AL. 2018).

Ventilación

La ventilación es el proceso de suministrar aire, natural o acondicionado y removerlo de cualquier espacio por cualquier método (Boutet, citado en Fuentes y Rodríguez, 2004).

La importancia de esta estrategia bioclimática radica en que la ventilación determina, en gran medida, la salud de los usuarios dentro de los espacios interiores, del mismo modo, la ventilación aporta beneficios higrotérmicos que tienen un efecto directo en el cuerpo humano a través de efectos fisiológicos.

La ventilación en las edificaciones puede ser suministrada a partir de tres maneras (Fuentes y Rodríguez, 2004):

- a) **Ventilación natural:** esta forma de ventilación puede considerarse como intencional o intencionada, la ventilación natural se realiza a través de las aberturas existentes en la envolvente de una edificación.

Este tipo de ventilación funciona a partir de la diferencia de presiones existentes, por lo general, entre el exterior y el interior; así mismo, puede provocarse también por la diferencia de temperaturas, la cual modifica la densidad del aire, lo que provoca su movimiento dando como resultado la ventilación pasiva.

b) Infiltración: este tipo de ventilación se considera no intencional, esto debido a que sucede a partir de elementos no controlados o no previstos en la edificación como aberturas, fisuras o ranuras, en climas cálidos, puede ser un elemento importante para alcanzar el confort, por el contrario, en climas fríos, puede aumentar la posibilidad de discomfort térmico por sensación térmica.

c) Ventilación forzada: esta ventilación es la única que se considera controlada y es de tipo artificial, se utilizan sistemas mecánicos para forzar el flujo de aire, con los cual, los niveles de temperatura y humedad pueden ser controlados de manera oportuna.

El uso de la ventilación en las edificaciones permite mantener la calidad del aire interior para prevenir enfermedades en los usuarios, renovar el aire “viciado” por aire fresco del exterior, en cuanto al confort, permite que los ocupantes disipen más rápido el calor producido por el efecto de convección, los requerimientos de ventilación dependen del tipo de clima y puede variar en función a las estaciones de una región determinada (Givoni, 1981).

El uso del viento debe ser considerado en todas las etapas de diseño, el agrupamiento y la forma de las edificaciones modificarán el flujo, lo que implica una adaptación de las aberturas en las fachadas para la ventilación de los espacios interiores.

Distintos autores (Olgay, de Schiller y Evans) han demostrado que, aprovechando los flujos de aire provocados por la ventilación natural, se pueden conseguir sensaciones de refrescamiento de hasta 2°C si la corriente de viento incide a la altura de los usuarios y no a la altura de la cubierta en el interior, en este caso, el flujo de aire tendrá otra función y otros resultados.

Silvia de Schiller y Martin Evans (1981) muestran los efectos que provoca el movimiento de aire en el interior de las edificaciones.

En la tabla podemos observar que el efecto del flujo de aire en los espacios interiores se potencializa con la temperatura del aire, con una velocidad inferior a 0.1 m/s no existe efecto alguno en los ocupantes, por el contrario, con velocidad de 2.0 m/s y temperatura seca de 15 °C el enfriamiento puede alcanzar los 10 °C, este efecto de enfriamiento aparente corresponde a personas con ropa liviana y actividad sedentaria.

Cuando la ventilación es utilizada para climatizar los espacios interiores, se pueden aplicar las siguientes estrategias bioclimáticas:

a) Ventilación cruzada: esta ventilación se logra cuando existen dos aberturas, una en la fachada de barlovento y la otra en la de sotavento, este término se refiere a las condiciones en las que un espacio se conecta a partir de aberturas que funcionan como zonas tanto de presión como de succión desde el exterior.

Existen diversas configuraciones en las aberturas para que la ventilación cruzada pueda tener el efecto deseado (figura 7).

Velocidad (m/s)	Impacto en los ocupantes	Efecto de enfriamiento				
		Piel seca			Piel húmeda	
		Temperatura del aire °C				
		15	20	25	30	30
<0.1	Sin impacto, puede producir sensación de encierro	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.25	Humo de cigarrillos indica movimiento, enfriamiento perceptible con bajas temperaturas	2.0	1.3	0.8	0.5	0.7
0.5	Velas necesitan protección, refrescamiento a temperaturas confortables, frío con temperaturas bajas	4.0	2.7	1.7	1.0	1.2
1.0	Mueve papeles sueltos, cómodo con temperaturas cálidas, máximo para confort nocturno	6.7	4.5	2.8	1.7	2.2
1.5	Excesivo para trabajo de escritorio, límite para actividad sedentaria	8.5	5.7	3.5	2.0	3.3
2.0	Aceptable solamente en condiciones cálido-húmedas en ausencia de alivio alternativo	10.0	6.7	4.0	2.3	4.2

Fuente: Diseño Bioambiental y Arquitectura Solar.

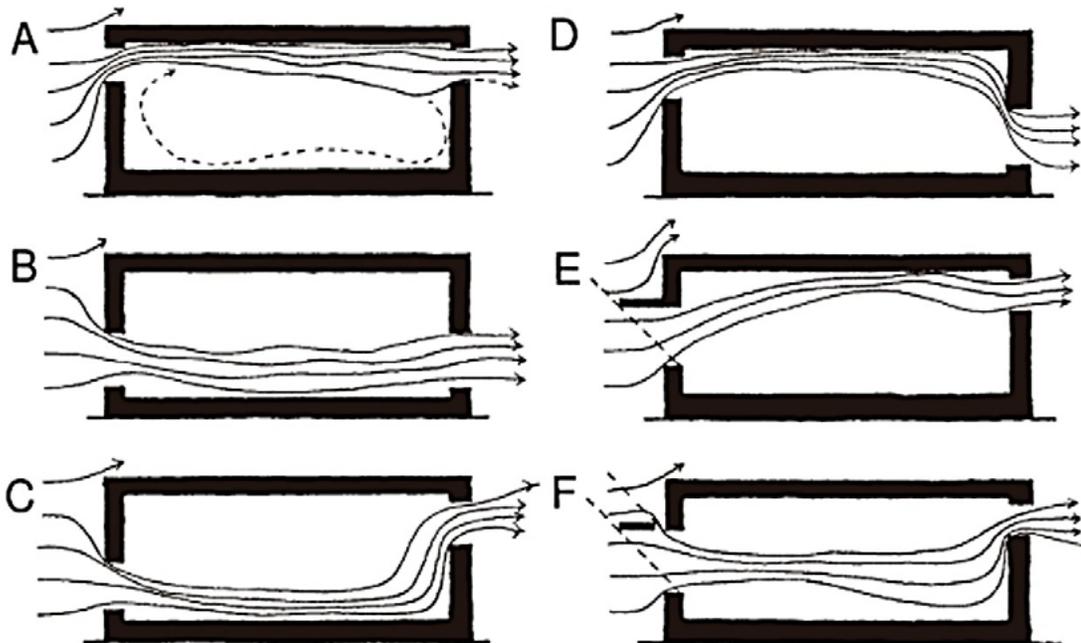


Figura 7. Comportamiento de la ventilación cruzada en relación a las aberturas.

Fuente: Climatic Design of Buildings using Passive Techniques, Rosenlund, 2015.

De acuerdo con la figura anterior, el comportamiento y los efectos de la ventilación en los espacios interiores son los siguientes (Rosenlund, 2015):

- Con aberturas situadas en la parte superior de los muros no se produce un buen efecto a nivel del cuerpo.
- Con aberturas situadas en la parte inferior de los muros se produce un buen patrón de movimiento de aire, si es que con la ventilación se busca lograr enfriamiento.
- Con abertura de entrada en la parte inferior y abertura en la parte superior del muro se consigue un bajo patrón de viento.
- El flujo de aire a la altura del techo producido por una entrada situada en la parte superior del muro apenas se ve afectado por una salida a una altura menor.
- La proyección de dispositivos de sombreado en el exterior produce un flujo de aire hacia la parte superior del espacio interior.
- Una ranura entre el muro y el dispositivo de sombreado dará una mejor dirección al flujo de aire utilizado para ventilar.

El potencial de uso de la ventilación cruzada se encuentra supeditada, en gran medida, a las condiciones climáticas y de polución exteriores, si bien es cierto, que esta estrategia ayuda a lograr condiciones de salud y de confort, existe la posibilidad, en climas muy cálidos o contaminados, que el uso de esta estrategia pueda ingresar aire caliente o con polución, lo que generaría condiciones de disconfort y de insalubridad para los usuarios de los espacios interiores.

b) **Ventilación nocturna o selectiva:** cuando la temperatura promedio se encuentra por encima de los límites máximos de confort, tanto en el interior como en el exterior de los espacios construidos, la ventilación selectiva permite restringir el flujo de aire caliente desde el exterior, en las noches, cuando las temperaturas exteriores disminuyen, la ventilación nocturna permite aprovechar el aire fresco para enfriar el interior.

La elección del sistema de ventilación tendrá una gran repercusión en la forma y orientación del edificio.

Iluminación

La luz es uno de los más importantes requerimientos de las edificaciones en los espacios interiores, debido a que la luz permite la visibilidad, se considera indispensable para desarrollar las actividades propias del espacio interior, la luz es toda radiación electromagnética emitida o reflejada por cualquier cuerpo (CSIC³).

3 Consejo Superior de Investigaciones Científicas del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España <https://www.csic.es/es>

El objetivo principal de la iluminación es producir un adecuado ambiente visual que garantice confort visual, este tipo de confort puede definirse como el estado generado por la armonía o equilibrio de múltiples variables, en las que se encuentran la naturaleza, estabilidad y cantidad de luz.

Es necesario diferenciar la iluminación natural de la iluminación artificial, aún, cuando los objetivos de ambas son los mismos, no pueden considerarse equivalentes. Con el uso de iluminación artificial pueden ser controladas la cantidad y la calidad de la luz de acuerdo a las necesidades de un uso en específico, por el contrario, para considerar el uso de la luz natural como medio para iluminar de manera pasiva los espacios interiores, es necesario tomar en cuenta ciertas consideraciones, características y comportamiento de la luz natural (Majoros, 1998) como los niveles de iluminación, necesidades horarias y temporales de cada espacio interior y los recursos y características de la luz natural de cada emplazamiento.

El aprovechamiento de la luz natural en una edificación se realiza por las superficies transparentes, este aprovechamiento de luz puede realizarse de manera lateral o cenital, la lateral se realiza utilizando las aberturas localizadas en los muros y la cenital se realiza a partir de la utilización de aberturas situadas en la cubierta, tragaluces o lucernarios (Ching y Shapiro, 2014) (Véase figura 8).

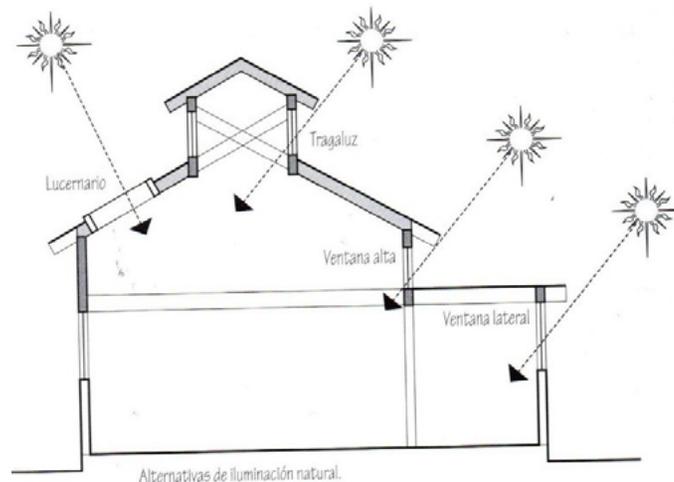


Figura 8. Aprovechamiento de la luz natural lateral y cenital.

Fuente: Arquitectura ecológica un manual ilustrado.

Los valores de iluminación, entendida como el flujo que incide sobre una superficie, proveniente del sol y que puede ser aprovechada sobre una superficie horizontal sin obstrucciones puede ser de entre 0 hasta 100,000 lux, la cantidad aprovechable de iluminación natural varía de acuerdo al ángulo de la altitud solar y a la nubosidad existente de acuerdo a la posición geográfica de cada emplazamiento.

La distribución de la luz natural es uno de los elementos que debe procurar atención, esto debido a que es común encontrar diferencias importantes en los niveles de iluminación en las

áreas que se encuentran cerca de las ventanas y los espacios más alejados a ellas, si es que existe una gran diferencia en los niveles de iluminación, será necesario utilizar iluminación artificial para satisfacer las necesidades de los ocupantes

Las ventanas, por donde iluminaremos naturalmente los espacios interiores, deberán satisfacer no sólo las necesidades de iluminación necesaria, además de ello, se vuelven un elemento esencial para conectar de manera directa los espacios interiores con los exteriores, esta conexión, además de satisfacer las necesidades de confort visual, puede generar bienestar psicológico y emocional en los ocupantes.

Sin embargo, la colocación de ventanas o aberturas para el aprovechamiento de la luz natural no solamente obedecen a la necesidad de iluminación de los espacios interiores, la privacidad, las ganancias térmicas y el aumento del uso de las energías contaminantes son elementos que limitan el uso de las superficies transparentes en las edificaciones (Véase figura 9).

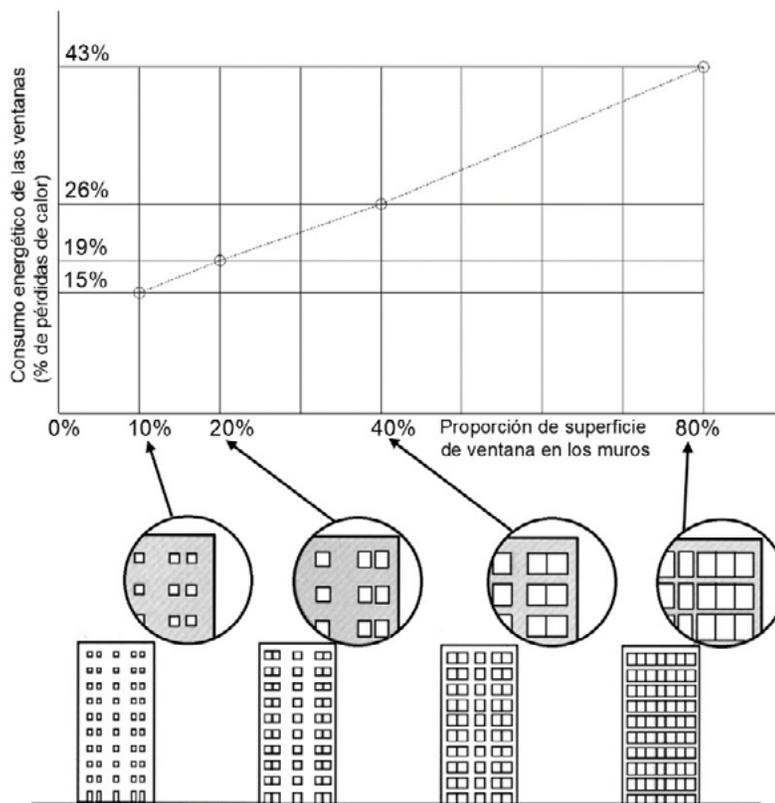


Figura 9. Pérdida de energía a través de las ventanas.

Fuente: Arquitectura Ecológica un manual ilustrado.

En México, la Norma Técnica Complementaria para el Proyecto Arquitectónico del año 2011 en la sección *Iluminación y Ventilación* indica que “los locales habitables⁴ y complementa-

⁴ La Norma considera locales habitables a las recámaras, alcobas, salas, comedores, estancias, salas de televisión o de costura, locales de alojamiento, cuartos para encamados de hospitales, clínicas o similares, aulas de educación básica y media, vestíbulos, locales de trabajo y de reunión.

rios⁵ deben tener iluminación diurna natural por medio de ventanas que den directamente a la vía pública, azoteas, superficies descubiertas o patios”, en la Norma se establece la posibilidad de iluminar de manera artificial aquellos locales considerados como habitables y complementarios exceptuando las recámaras, salas, comedores, alcobas, salas de televisión y de costura, estancias, locales de alojamiento, cuartos para encamados de hospitales y clínicas y similares, aulas de educación básica y cocinas domésticas.

La Norma determina el dimensionamiento de las ventanas para iluminación de acuerdo a lo siguiente:

- El área de ventanas mínima para iluminación natural no puede ser inferior al 17.5% del área del local en todas las edificaciones.
- Para los locales considerados como complementarios, el porcentaje de área de ventanas respecto al área total del local no puede ser inferior al 15%.
- Las ventanas que se encuentran protegidas por algún dispositivo de sombreado, no podrán encontrarse remetidas más que la distancia total de la altura de piso a techo del local.
- Para iluminación natural diurna utilizando dispositivos como domos o tragaluces, la norma considera dos posibilidades: en edificaciones domésticas⁶, la proyección horizontal del vano debe tener como base mínima el 4% de la superficie del local, en edificaciones industriales el porcentaje mínimo será del 5%, en ambos casos, el coeficiente de transmisibilidad del espectro solar no será inferior al 85%.
- No se permite la iluminación natural por fachadas de colindancia, además, los bloques prismáticos no son considerados para efecto de iluminación natural.

En el caso de la utilización de patios exteriores para iluminación natural, la norma considera que la dimensión mínima requerida es de 2.50 mts. medidos perpendicularmente al plano de la ventana sin considerar remetimientos:

Tipo de local	Proporción mínima del patio de iluminación (con relación a la altura de los paramentos del patio).
Locales habitables	1 / 3
Locales complementarios e industria	1 / 4

La norma no establece los valores mínimos para iluminar de manera natural, sin embargo, se establecen los valores mínimos necesarios para iluminar de manera artificial en las edificaciones de acuerdo a su tipo (Véase anexo II).

⁵ Se considera locales complementarios a los sanitarios, cocinas, cuartos de lavado y planchado doméstico, las circulaciones, los servicios y los estacionamientos.

⁶ Se permite su uso en sanitarios, cocinas no domésticas, locales de trabajo, reunión, almacenamiento, circulaciones y servicios.

Conclusiones

Las estrategias de diseño bioclimático son métodos, procedimientos y sistemas arquitectónicos que aprovechan los potenciales de las energías pasivas para satisfacer las necesidades de confort y energía dentro de los medios edificados, sin embargo, resultará muy difícil, por no decir casi imposible, satisfacer las necesidades de confort y energía a partir de sólo la utilización de medios naturales o pasivos (Olgay, 2010).

Una vez establecidas las particularidades del clima y habiendo definido los requerimientos biológicos en función de las necesidades de los ocupantes, sólo queda determinar las estrategias de diseño bioclimático que permitirán conseguir estados de confort dentro de los medios edificados para el bienestar y salud de los usuarios.

Este trabajo busca ofrecer una visión general de las distintas estrategias pasivas de diseño bioclimático que pueden ser aplicadas en función de una escala climática global o como producto de un análisis de las condiciones microclimáticas de la zona de estudio, sin embargo, las estrategias descritas en este documento deben de ser consideradas sólo como guías generales, por este motivo, la utilización de las posibles estrategias de diseño bioclimático a utilizar deberá realizarse en función del análisis climático y de confort para cada emplazamiento arquitectónico.

Bibliografía

- Altan, H. et al. (2016). *Passive Design*. Australia, The University of Melbourne.
- Arroba, M. et al. (2007). La implantación de las instalaciones en la iglesia de San Lorenzo de Segovia. *Oppidum*, No. 3. Universidad SEK. Segovia, 2007, 265-2080.
- 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>
- Coch, H. & Serra, R. (1995). *Arquitectura y energía natural*. España, Universidad Politécnica de Cataluña.
- CONAFOVI [Comisión Nacional de Fomento a la Vivienda] (2006). *Guía CONAFOVI uso eficiente de la energía en la vivienda*. México CONAFOVI.
- de Schiller, S. & Evans, M. (1991). *Diseño Bioambiental y Arquitectura Solar* (2ª ed.). Argentina, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo.
- Docherty, M. & Szokolay, S. (1999) note 5 *Climate Analysis PLEA*. Australia. University of Queensland.
- Evans, M. (2000). *Técnicas Bioclimáticas de Diseño: Las "Tablas de Mahoney" y los "Triángulos de Confort"*. Venezuela. COTEDI.
- Figueroa, A. & Fuentes, V. (1988). *Recomendaciones y normas de diseño bioclimático para el Instituto Mexicano del seguro Social*. México, Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco.

Fuentes, V. & Rincón, J. (2014). Bioclimatic Analysis Tool [BAT]. México, Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco.

Fuentes, V. & Rodríguez, M. (2004). Ventilación natural Cálculos básicos para arquitectura. México, Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco.

Fuentes, V. (2004) Clima y Arquitectura. México, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.

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

García de Diego, M. et al. (2011). Manual de Diseño Bioclimático para Canarias. España.

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

IMSS (1999). Norma de Diseño de Ingeniería en Acondicionamiento de aire del IMSS ND-01-IMSS-AA-97.

La Roche, P. et al. (2001). Keeping Cool Principles to avoid overheating in buildings Note6 PLEA. Australia. University of Queensland.

Lamberts, R. (s.f.) Desempenho Térmico de edificações Aula 4: Avaliação bioclimática. Brasil, Universidade Federal de Santa Catarina.

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

Norma Técnica Complementaria para el Proyecto Arquitectónico (8 de febrero del 2011). Ley orgánica de la administración pública del Distrito Federal. Secretaría de Obras y Servicios.

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

Rosenlund, H. (2015). Climatic design of Buildings using Passive Techniques. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/238104641_Climatic_Design_of_Buildings_using_Passive_Techniques

Szokolay, S. & Zöld, A. (2001). Note 2 Thermal Insulation PLEA (reimpresión). Australia. University of Queensland.

Szokolay, S. (2008). Introduction to Architectural Science The Basis of Sustainable Design (2ª ed.). Estados Unidos, Elsevier.

Tejeda, A., et al. (2018). La humedad en la atmósfera Bases físicas, instrumentos y aplicaciones. México. Universidad de Colima.

Tudela, F. (1982). Ecodiseño. México, Universidad Autónoma Metropolitana unidad Xochimilco.

Vélez, R. (1990). Diseño Bioclimático y Ecotécnicas Evaluación y Datos Prácticos (2ª ed.) Universidad Autónoma Metropolitana unidad Xochimilco.

Watson, D. & Labs, K. (1983) Climatic Design. Energy-Efficient Building Principles and Practices. McGraw-Hill Book Company, New York. USA.

Anexo I

Requerimiento y estrategias para la climatización pasiva por bioclima de acuerdo a la Comisión Nacional del Fomento a la Vivienda (CONAFOVI)

Bioclima	Meses	Estrategias
CÁLIDO SECO	Meses fríos (diciembre a marzo)	Calentamiento directo por las mañanas e indirecto por las tardes
		Inercia térmica
		Evitar infiltraciones
		Evitar vientos fríos de invierno
	Meses en transición (abril, mayo y noviembre)	Ventilación adecuada para el control higrotérmico
		Humidificación por las tardes
	Meses de calor (julio a octubre)	Evitar ganancias solares directas e indirectas
		Espacios enterrados, semienterrados, taludes
		Formas compactas y contiguas
		Áreas exteriores protegidas (microclimas con patios)
Ventilación natural con tratamiento previo (enfriamiento y humidificación)		
CÁLIDO SEMIHÚMEDO	Meses de frío (diciembre a enero)	Calentamiento, evitar pérdidas de calor durante la noche
		Utilización de materiales masivos en áreas con ventilación natural diurna y nocturna
		Control de enfriamiento y humedad
	Meses de transición (febrero, octubre y noviembre)	Ventilación para lograr condiciones de confort térmico
	Meses con calor (marzo a septiembre)	Evitar ganancias solares directas e indirectas
		Sombrear la vivienda
Materiales ligeros		
CÁLIDO HÚMEDO	Meses de confort (diciembre a enero)	Ventilación selectiva nocturna
	Meses con calor (febrero a noviembre)	Deshumidificar y enfriar
		Evitar ganancias solares directas e indirectas todo el año
		Ventilación natural
		No se recomienda vegetación en el interior
		Materiales ligeros
Espacios de uso diurno muy ventilados		

Desempeño Bioclimático de una Escuela de Carlos Leduc en Clima Cálido Sub-Húmedo

TEMPLADO HÚMEDO	Meses de frío (diciembre a enero)	Elementos medianamente masivos
	Meses de transición (febrero, octubre y noviembre)	Control de ventilación
	Meses con calor (marzo a septiembre)	Evitar ganancia solar directa por la tarde, en primavera y verano
		Control solar
		Ventilación natural
Barreras de vapor en los muros y techo		
	Cubierta con aislante térmico	
TEMPLADO	Meses con frío (diciembre y enero)	Ganancias térmicas directas en invierno por las mañanas en las fachadas este, sureste y sur
		Ganancias térmicas indirectas en las fachadas suroeste, oeste y noroeste
	Meses confortables (febrero, julio, agosto, noviembre)	Ventilación natural
	Meses con calor (marzo a junio, incluye octubre)	Humidificación en primavera
		Evitar ganancias térmicas por radiación
Ventilación por las tardes en primavera		
	Enfriamiento evaporativo en primavera	
TEMPLADO SECO	Meses con frío moderado (septiembre, diciembre y enero)	Calentamiento directo, en las primeras horas de la mañana
		Calentamiento indirecto por las fachadas oeste, sureste y noroeste
		Controlar oscilaciones de humedad
		No ventilar por las noches
	Meses con calor (marzo a junio)	Enfriamiento con ventilación y humidificación por las tardes
		Reducir oscilaciones de temperatura
		Inercia térmica en muros
	Ventilación por las tardes	
SEMIFRÍO SECO	Meses de frío (julio a marzo)	Calentamiento solar pasivo
		Calentamiento directo por las mañanas en las fachadas sur-este
		Calentamiento indirecto por las tardes en elementos que almacenan calor en las fachadas del sureste-noroeste
		Protección de los vientos fríos nocturnos
	Meses de confort (abril a junio)	Calentamiento y almacenamiento de calor en muros de las fachadas oeste, suroeste y noroeste
		Renovación de aire para condiciones higiénicas
		Uso moderado de vegetación interior

SEMIFRÍO	Meses de frío (julio a febrero)	Calentamiento solar pasivo
		Calentamiento solar directo por las mañanas en las fachadas sur-este
		Calentamiento solar indirecto por las tardes
		Evitar pérdidas de calor por las ventanas
		Espacios de transición entre el exterior e interior
	Meses de confort (marzo a junio, incluyendo septiembre y octubre)	Almacenamiento de calor en pisos, techos y muros, en las fachadas oeste y sur
		Renovación de aire por higiene
SEMIFRÍO HÚMEDO	Meses de frío (diciembre a febrero)	Calentamiento solar pasivo
		Calentamiento directo al medio día
		Calentamiento indirecto por almacenamiento o invernadero
		Protección de los vientos fríos de invierno y nocturnos
		Espacios de transición entre el exterior y el interior
	Meses de confort (marzo a noviembre)	Control de vegetación
		Ventilación controlada o selectiva
		Ventanas operables de buen sellado

Fuente: Guía CONAFOVI uso eficiente de la energía en la vivienda

Anexo II

Niveles mínimos de iluminación artificial Norma Técnica Complementaria para el Proyecto Arquitectónico

TIPO DE EDIFICACIÓN	LOCAL	NIVEL DE ILUMINACIÓN (Lux)
HABITACIONAL		
Vivienda unifamiliar	Circulaciones horizontales y verticales	50
Vivienda plurifamiliar		
COMERCIAL		
Abasto y almacenamiento	Almacenes	50
	Circulaciones	100
Mercados públicos	Naves	75
Venta de combustibles y explosivos	Áreas de servicio	70
	Áreas de bombas	200

Desempeño Bioclimático de una Escuela de Carlos Leduc en Clima Cálido Sub-Húmedo

Tienda de productos básicos y especialidades	En general	250
Tienda de autoservicio		
Tiendas departamentales y centros comerciales	Baños	100
Agencias y talleres de reparación		
Tiendas de servicios y servicios diversos		
Baños públicos	Sanitarios	75
Gimnasios y adiestramiento físico	En general	250
SERVICIOS		
Administración		
Bancos, casas de bolsa y casas de cambio	Áreas y locales de trabajo	250
	Circulaciones	100
Oficinas privadas y públicas	Cuando sea preciso apreciar detalles	100
	Cuando sea preciso apreciar detalles: toscos o burdos	200
	Medianos	300
	Muy finos	500
Hospitales y centros de salud		
Atención médica o dental a usuarios externos	Consultorios o salas de curación	300
	Salas de espera	125
Atención a usuarios internos	Circulaciones	100
	Salas de encamados	75
Servicios médicos de urgencia (públicos y privados)	Emergencia en consultorios y salas de curación	300
Asistencia social		
Residencias colectivas	Circulaciones horizontales y verticales	50
Asistencia animal		
Centros antirrábicos, clínicas y hospitales veterinarios	Salas de curación	300
Educación e instituciones científicas		
Atención y educación preescolar	Aulas	250
Educación formal básica y media	Aulas y laboratorios	300
	Circulaciones	100

Educación formal media-superior y superior, y educación informal	Aulas y laboratorios	300
	Circulaciones	100
Institutos de investigación	Aulas y Cubículos	250
Exhibiciones		
Galería de arte, museos, centros de exposición	Salas de exposición	250
	Vestíbulos	150
	Circulaciones	100
Centros de información	Salas de lectura	250
Instituciones religiosas		
Lugares de culto (templos, iglesias y sinagogas)	Áreas de reunión	100
Alimentos y bebidas		
Servicios de alimentos y bebidas con o sin esparcimiento	En general	250
	Restaurantes	50
	Centros nocturnos	30
	Cocinas	200
Entretenimiento y recreación social		
Espectáculos y reuniones	Salas durante la función	1
	Iluminación de emergencia	25
	Salas durante los intermedios	50
	Vestíbulos	150
	Circulaciones	100
	Emergencia en circulaciones y sanitarios	30
Deportes y recreación		
Prácticas y/o espectáculos deportivos	Circulaciones	100
Alojamiento		
Hoteles y moteles	Habitaciones	75
Casas de huéspedes	Circulaciones	100
Albergues turísticos juveniles	Vestíbulos	150
	Áreas y locales de trabajo	250
Campamentos para remolques y campismo	Estacionamiento de vehículos	30
	Circulaciones	75

Desempeño Bioclimático de una Escuela de Carlos Leduc en Clima Cálido Sub-Húmedo

Policía y bomberos		
Centrales de policía, estaciones de bomberos y cuarteles	Áreas y locales de trabajo	250
Funerarios		
Agencias funerarias	Velatorios	125
Transportes		
Estacionamientos privados y públicos, incluyendo encierros de vehículos	Entrada y salida	300
	Espacio de circulación, pasillos, rampas y zonas peatonales	100
	Espacios para estacionamientos (cajones)	50
	Caseta de control	200
	Zona de espera	50
	Pasillos y cajones	50
Servicios de mudanzas	En general	250
INDUSTRIA		
Para todo tipo de industria	Áreas de trabajo en que no sea preciso apreciar detalles	100
	Áreas de trabajo en que sea preciso apreciar detalles: toscos o burdos	200
	Medianos	300
	Muy finos	500
	Área de almacenamiento	50
	Circulaciones	100
	Comedores	150
Comunicaciones		
Servicio al público de correos y telégrafos, mensajería y paquetería	En general	250
INFRAESTRUCTURA		
Infraestructura		De acuerdo a los locales de que se trate
ESPACIOS ABIERTOS		
Plazas y explanadas	Circulaciones	75
Parques y jardines	Estacionamientos	30

Fuente: Norma Técnica Complementaria para el Proyecto Arquitectónico.

El Empleo de la Metodología BIM en el Diseño Bioclimático

Arq. Christian Raúl Rivera Laureano¹

Mtra. Isaura Elisa López Vivero²

Dr. Víctor Armando Fuentes Freixanet³

MSc. In Arch. Gerardo Velázquez Flores⁴

1 Universidad Autónoma Metropolitana | Posgrado en Diseño Bioclimático |
Correo: al2201800662@azc.uam.mx

2 Universidad Autónoma Metropolitana | Departamento de Procesos y Técnicas de
Realización, CyAD
Correo: ielv@azc.uam.mx

3 Universidad Autónoma Metropolitana | Departamento de Medio Ambiente, CyAD |
Correo: ffva@azc.uam.mx

4 Universidad Iberoamericana | MSc. in Arch: Environmental Design of Buildings, por
la Universidad de Cardiff, Reino Unido.
Correo: gerardo@bioarquitectura.com.mx

Resumen

Building Information Modeling por sus siglas en inglés (BIM) es una metodología que ha cambiado a la industria de la construcción y la arquitectura en sus diferentes especialidades y subespecialidades por medio del uso de recursos tecnológicos para la obtención y manejo de la información, así como por la generación de documentos que permiten administrar el modelo virtual, tal es el caso de un plan de ejecución BIM o BEP (BIM Execution Plan) para la gestión del proyecto y así cumplir con los objetivos del mismo en cada una de sus fases.

En una especialidad como la Arquitectura Bioclimática podemos avocarnos a lograr condiciones de confort para los usuarios, uso eficiente de la energía y los recursos, sustentabilidad de la edificación y ahorros económicos por medio del mismo modelo. BIM es integrador de los conceptos de diseño bioclimático a través de diversas plataformas tecnológicas para la simulación de tales condiciones en un modelo virtual y a su vez generador de la documentación necesaria para la fase de pre-construcción de un proyecto.

Palabras clave: BIM, Bioclimática, Diseño, Procesos, Plan de Ejecución BIM.

Abstract

Building Information Modeling (BIM) is a methodology that has changed the built environment, and its different specialties and subspecialties, through technological resources to obtain and manage information. Managing the virtual model through a BIM execution plan allows the management of the project and thus meet the objectives of bioclimatic architecture in each of its phases, allowing to achieve comfort conditions for users, efficient use of energy and resources, sustainable buildings and economic savings. In this methodology, the different concepts of bioclimatic design are integrated through different technological resources for the management of a virtual model and all the necessary documentation for the pre-construction phase of a BIM project.

Introducción

La arquitectura ha evolucionado tecnológicamente con el paso del tiempo, implementando metodologías en el proceso de diseño que benefician el desarrollo de proyectos con el uso de nuevas tecnologías. Eventos como la gran contingencia del SARS-CoV-2 / COVID-19 que se ha vivido en los últimos dieciocho meses han venido a alterar la dinámica de convivencia, trabajo y economía en la sociedad. Esto ha obligado a que las metodologías de trabajo colaborativo sean cada vez más usadas por los arquitectos y profesionistas de la industria de la construcción, permitiéndoles mayor familiaridad con el uso de las tecnologías digitales. Actualmente es más común la aplicación de las nuevas herramientas digitales, electrónicas y manuales debido a una gran cantidad de información que está al alcance de todos, sin embargo, esto ha generado una falta de sistematización y análisis de procesos en la aplicación de los recursos tecnológicos con las metodologías de trabajo y gestión de proyectos. Ante el desatino en su correcto uso surgen las preguntas: ¿qué pasaría si se conocieran a fondo los beneficios de cada una de estas metodologías?, ¿cómo se podría aprovechar al máximo cada una de ellas?, ¿qué pasaría si se utilizara BIM para desarrollar proyectos innovadores, los cuales sean guiados por los criterios de desarrollo bioclimático y que estén al alcance de todos sin comprometer el costo-beneficio en su desarrollo? Si esto se aplicase a edificios nuevos, pueden cumplir ideales de rendimiento, ahorro energético y bajo impacto ambiental. En la actualidad ya no es opcional el implementar un diseño bioclimático en los proyectos arquitectónicos, pues las condiciones ecológicas que se viven en la actualidad necesitan una respuesta eficaz en las decisiones que tomamos.

El diseño bioclimático tiene aportaciones sustanciales en la vida útil de un proyecto (operación y mantenimiento), actualmente es un reto implementar nuevos procesos dentro de una urbanización que crece a ritmos acelerados, ya que mientras crece la demanda, los recursos se agotan y existe la necesidad de considerar soluciones sustentables que se puedan ejecutar con planeación y eficacia. BIM es una metodología de trabajo colaborativo para la construcción, donde la generación de contenidos de todo el proyecto se comparte de forma digitalizada entre todos los agentes implicados; esto permite tener un mejor resultado en menor tiempo. Es un trabajo interdisciplinario donde distintas profesiones trabajan a la par; complementándose y trabajando por un fin común para tener un proyecto en su mejor desarrollo con la posibilidad de tener una buena planeación y detección de problemas en etapas de planeación y no de ejecución.

BIM, a lo largo de su evolución, se ha beneficiado de diferentes complementos dentro de los softwares, algunos de ellos enfocados al diseño bioclimático. Estos complementos, comúnmente conocidos como herramientas o plug-ins, son necesarios para poder implementar de una manera óptima las distintas soluciones que nos propone el diseño bioclimático para la realización sustentable en los proyectos; adaptándose a estas nuevas formas de trabajo, que en un futuro cercano serán la base de la elaboración y planeación para la arquitectura y construcción.

Descripción del Método

El objetivo general de la investigación es generar una propuesta adaptativa de un plan de ejecución BIM que integre los procesos de análisis y diseño de la arquitectura bioclimática para su implementación en los proyectos gestionados con la metodología BIM asegurando así, los estándares de calidad que requiere la industria de la construcción para su correcta operación y mantenimiento.

Objetivos Específicos:

- Promover la habitabilidad y mejorar la calidad de vida en los proyectos mediante la obtención y análisis de datos dentro de las herramientas que ofrece BIM.
- Identificar las herramientas de análisis de datos para obtener criterios y propuestas de diseño bioclimático dentro del proyecto a trabajar o a ejecutar, así como conocer sus alcances y funcionamiento en etapas precisas de la metodología BIM.
- Establecer procesos de diseño que se integren al análisis bioclimático para su implementación en la gestión de modelos virtuales y su documentación para la pre-construcción.
- Identificar variables y gestionar indicadores de calidad en cada uno de los subprocesos del plan de ejecución BIM.

La primera etapa de la investigación comprende la compilación del estado del arte, análisis del marco normativo y la información generada por las distintas instituciones que han desarrollado investigación y un análisis sobre la metodología del diseño bioclimático para la identificación de procesos aplicables a un proyecto.

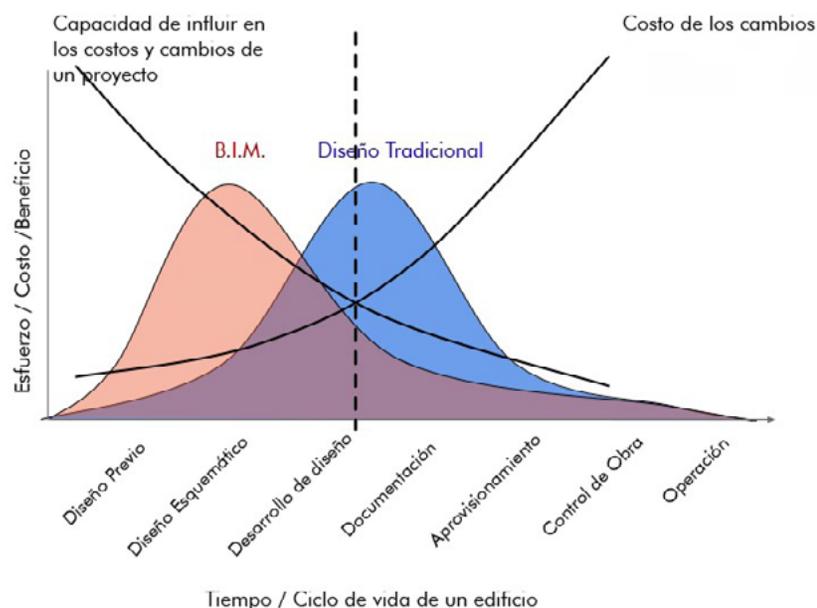


Figura 1. Curva de esfuerzos de Macleamy

Fuente: IDEAbuilder, 2012.

Tal como lo indica Patrick Macleamy (IDEAbuilder, 2012) en su curva de esfuerzos (figura 1), la relación entre el costo-beneficio y tiempo-efecto en proyectos con o sin uso de BIM, tienen un mayor o menor esfuerzo y planeación en cada una de las etapas de las distintas fases del ciclo de vida del edificio y esto influye directamente en los cambios que presente el proyecto en su ejecución. BIM concentra una mayor planeación en la fase de diseño para así generar una oportunidad de negocio para los dueños de los inmuebles al poder hacer modificaciones o detección de errores sin haber nada construido físicamente, es decir pre-construir no sólo modelar. Permite la posibilidad de visualizar cada uno de los elementos en un modelo virtual sin tener que involucrar recursos en los procesos constructivos cuando se encuentra el proyecto en etapa de construcción. En el caso de los procesos del diseño Bioclimático estos estarán aplicados desde el pre-diseño, hasta la fase de operación y mantenimiento.

BIM contiene diferentes formatos de presentación entre los medios electrónicos basándose en los métodos tradicionales de diseño y construcción para una mayor adaptación al campo laboral, sin embargo, buscando siempre el intercambio de la experiencia entre los involucrados en el proyecto, desde la parte administrativa, directiva, logística, de diseño y constructiva. El manejo de protocolos, estándares, procesos, sistemas de gestión y metodologías ágiles es una práctica común en BIM. En un proyecto los roles dentro de la organización, perfiles profesionales, grados de decisión e intereses entre otros, van a definir los tipos de procesos y su flujo en el trabajo; las personas, los procesos y la tecnología son y serán en todo momento los recursos principales y su papel en el proyecto será clave para llevar a cabo el trabajo colaborativo.

El intercambio de información a diferencia de la interoperabilidad implica la organización de la misma, entender cómo fluyen los datos entre cada uno de los agentes involucrados, evitando triangulación de datos en la cual exista una posible pérdida de información. Un modelo BIM estará siempre como en una visión central o concéntrica y será alimentado por cada uno de los responsables del proyecto.

BIM en su concepción integra entre otros métodos ágiles el IPD por sus siglas en inglés o “Integrated Project Delivery” (Entrega de Proyecto Integrado), cuyo enfoque es respaldar el proceso de construcción en su punto más débil: la comunicación. Esta visión busca que los proyectos se generen en un entorno colaborativo unificando a los agentes involucrados o Stakeholders – partes internas y externas de una empresa u organización dentro del proyecto, entre ellos están: los diseñadores, ingenieros, especialistas, administradores de la construcción, trabajadores, proveedores y constructores.

El diseñador o consultor bioclimático trabaja en conjunto al equipo de diseño interviniendo en procesos específicos dentro del proyecto como emplazamiento inicial, orientación, ejes de diseño y demás que serán plasmados en el documento o guía “Plan de ejecución BIM o BEP” como Pre-diseño, dichas actividades contendrán una serie de KPI’s (Key Performance Indicators) o indicadores de calidad los cuales son clave para evitar la pérdida de información, cumplir con los objetivos y usos de BIM y evitar el re-trabajo en el modelo virtual.

Cabe resaltar que BIM es una metodología que está en constante adaptación, su aplicación en la industria de la construcción varía según las condiciones de quién la usa y pocos países han logrado aplicarla en todo el ciclo de vida de un proyecto debido a su “falta de comprensión total”. Es por ello que, durante la investigación, se desarrollará un caso de estudio en el cual se apliquen los procesos propuestos dentro del Plan de Ejecución BIM o BEP (figura 2) y que tendrá como alcance la generación de los documentos de pre-construcción y un modelo virtual del mismo.

El plan de ejecución BIM es un concentrado de información (flujos de trabajo, partes interesadas, objetivos del proyecto, información sobre los modelos entre otros datos). Ambos son guías para orientar a los profesionales en la elaboración de un plan con el objetivo de llevar a las buenas prácticas las distintas disciplinas involucradas en la gestión de un proyecto incluyendo un lenguaje según la disciplina.

El ciclo de vida de un edificio se va a componer en una serie de etapas que están dentro de las distintas fases por las cuales va a ser sometido un proyecto para su ejecución definiéndose en las siguientes etapas: planeación, diseño, construcción y por último la operación y mantenimiento. Estas fases del ciclo de vida incluirán diversos procesos que generarán un trabajo lineal y un camino por el cual deba desarrollarse el modelo virtual para cumplir con los objetivos señalados en el Plan de Ejecución. Esto nos permite crear variaciones e iteraciones en un proyecto para definir las distintas etapas evitando contratiempos y re-trabajo en una edificación.

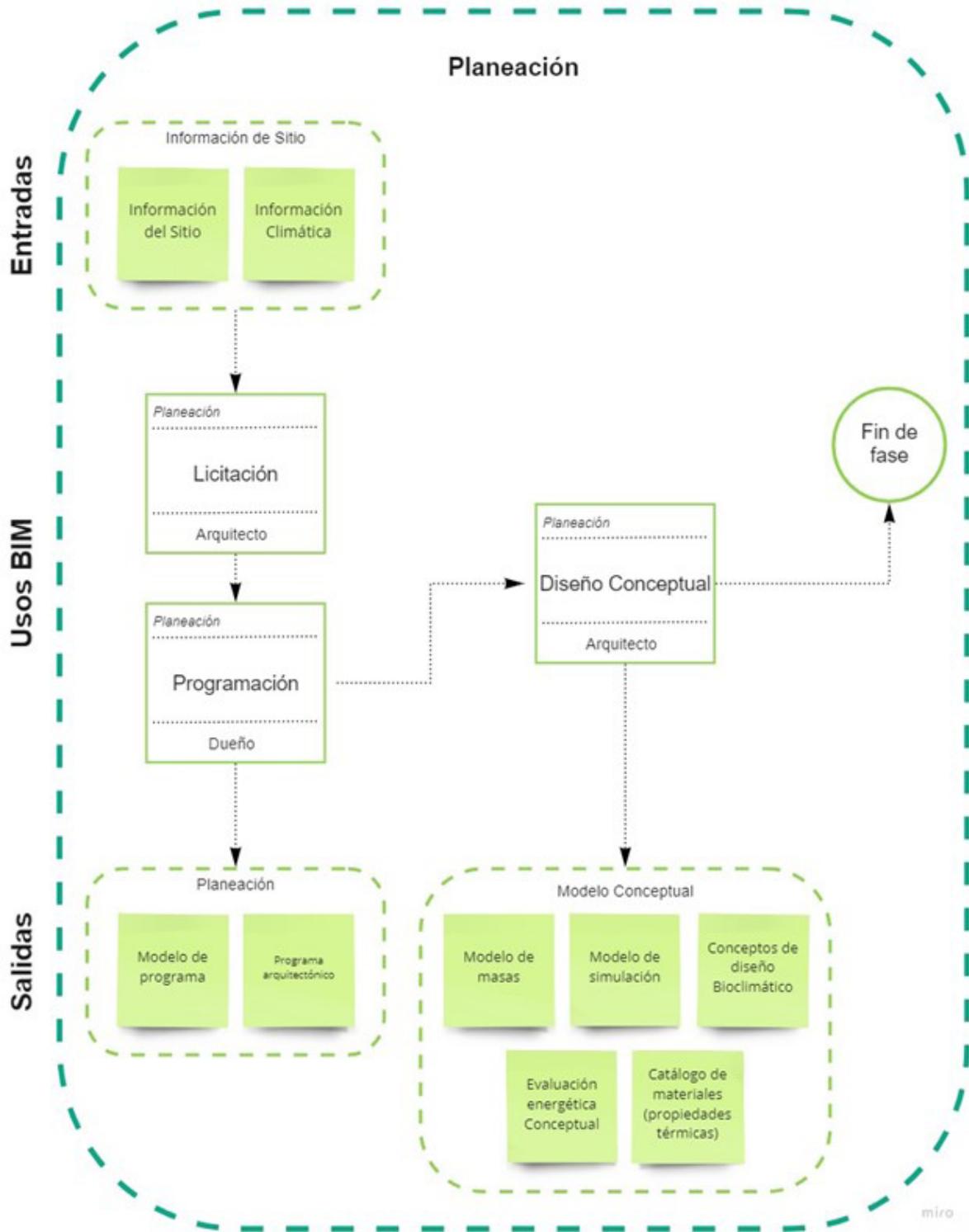


Figura 2. Mapa de Procesos de nivel 1 (Fase Planeación para proyectos Bioclimáticos/sustentables BIM. (Elaboración propia). (Texto correspondiente se encuentra en la pág 101).

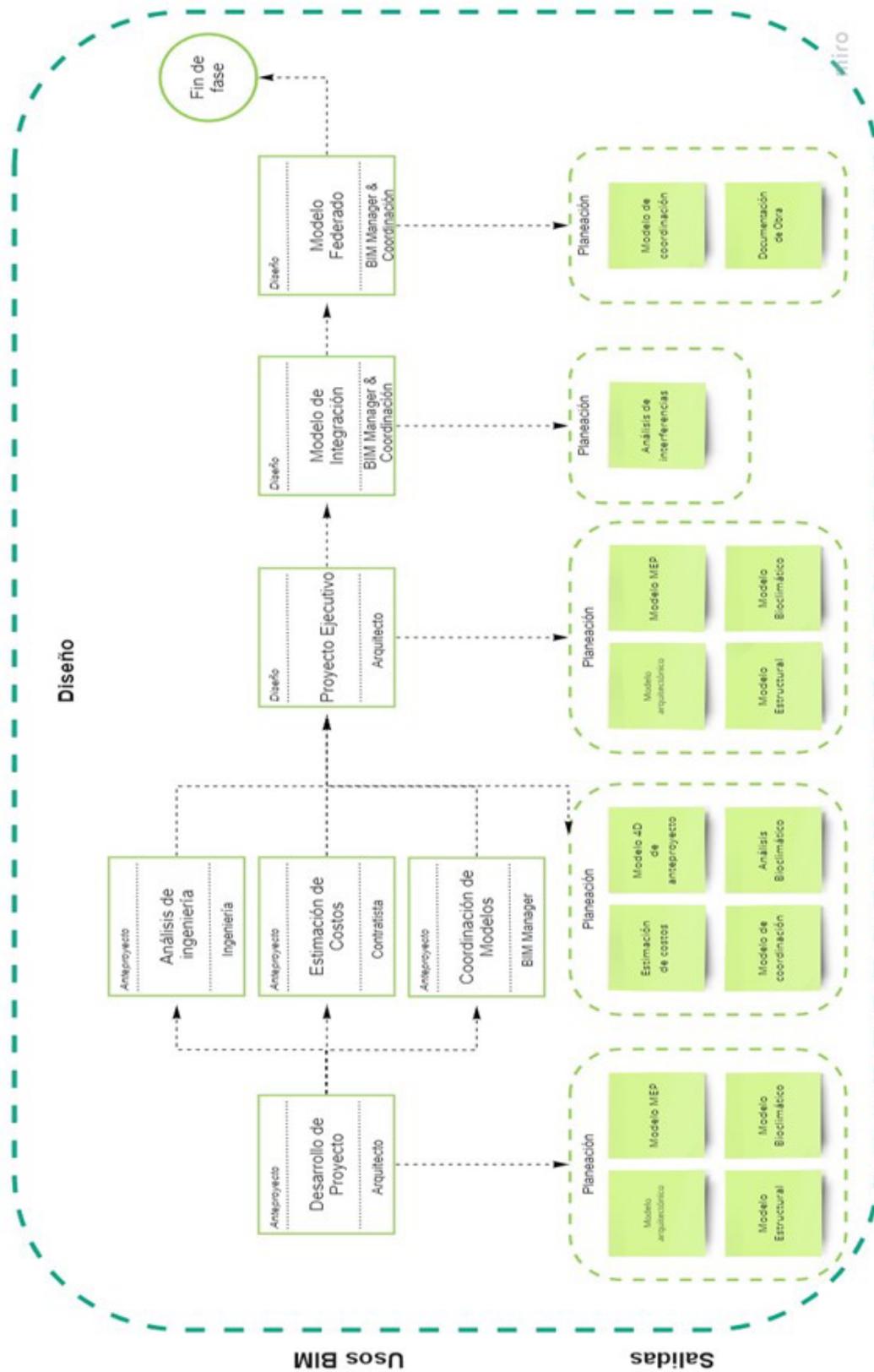


Figura 3. Mapa de Procesos de nivel 1 (Fase Diseño) para proyectos Bioclimáticos/sustentables BIM. (Elaboración propia).

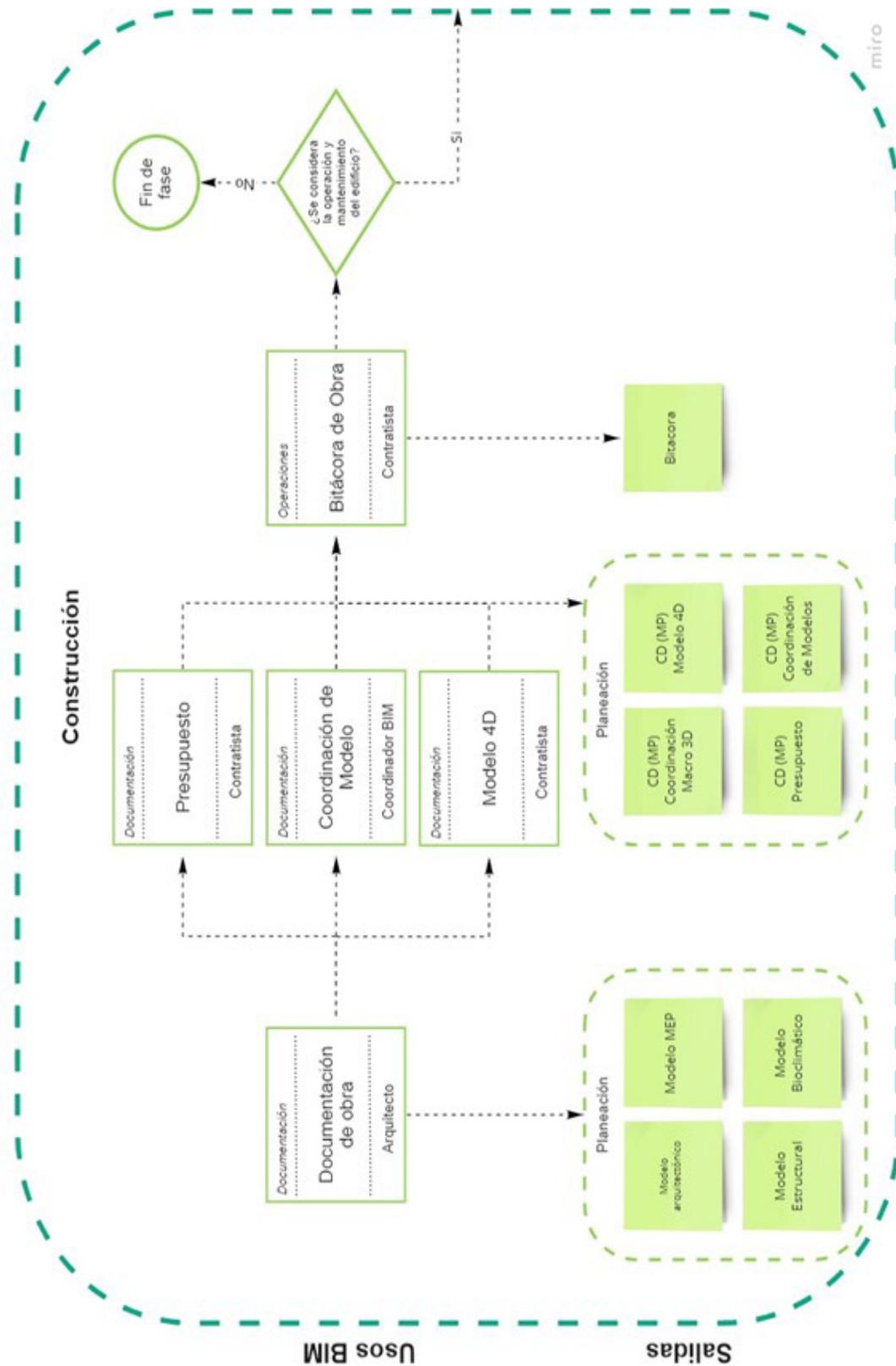


Figura 4. Mapa de Procesos de nivel 1 (Fase Construcción) para proyectos Bioclimáticos/sustentables. (Elaboración propia). (Texto correspondiente se encuentra en la pág 103).

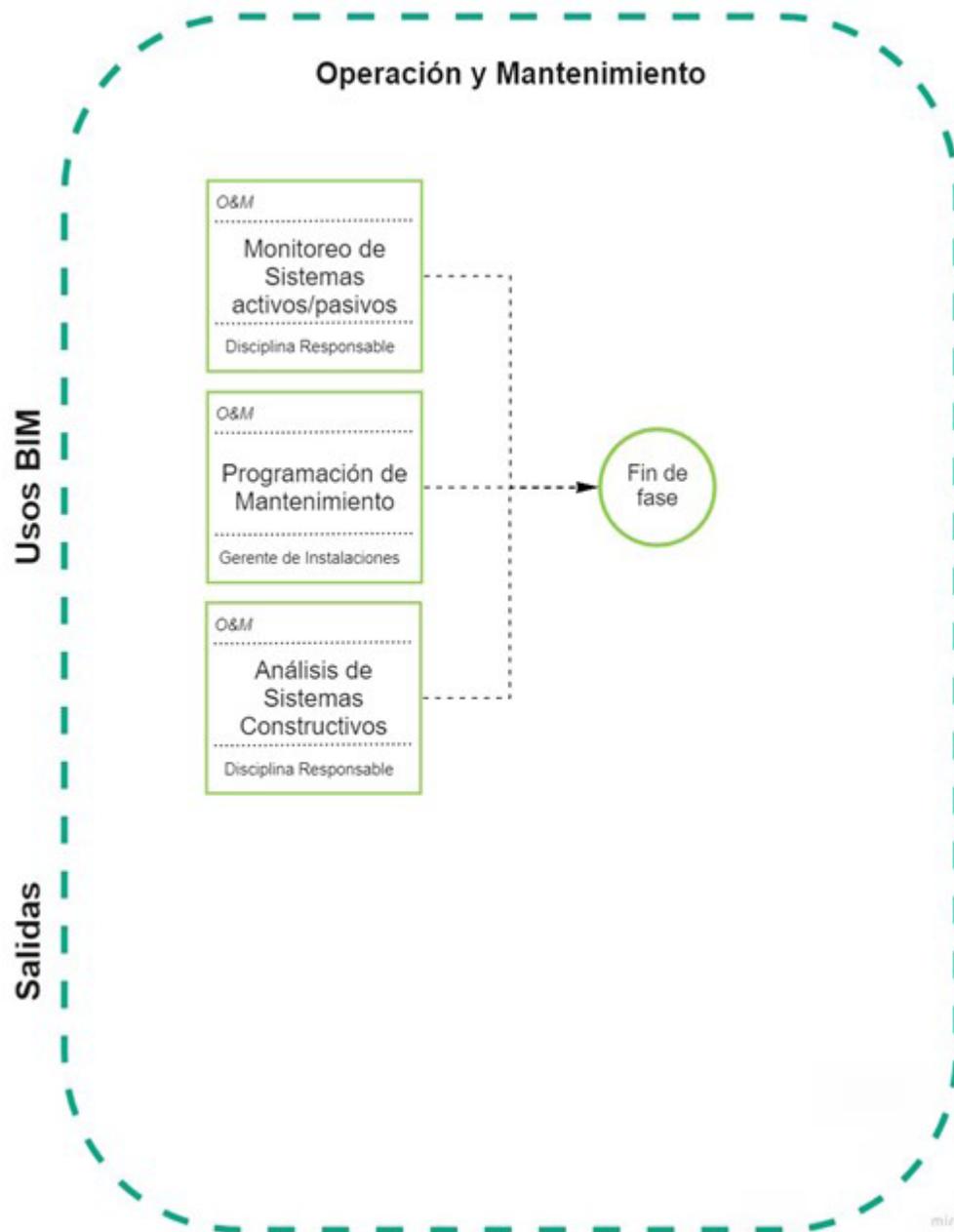


Figura 5. Mapa de Procesos de nivel 1 (Fase Operación y Mantenimiento) para proyectos Bioclimáticos/sustentables BIM. (Elaboración propia).

En la implementación de BIM en un proyecto debemos identificar las fases en que se desarrollará, de ahí dependerá el plantear macro-procesos, es decir condiciones de entradas de información, modelado a nivel volumétrico, de emplazamiento, por zonas o áreas y micro-procesos o de detallado del proyecto por familias, componentes o sistemas para fases como construcción y operación y mantenimiento.

En la figura 2 se observa un macro-proceso que equivale a las primeras dos fases del ciclo de vida de un edificio: planeación y diseño; en donde los conceptos y procesos de la metodología del diseño bioclimático estarán contenidos; en esta investigación hay un mayor desarrollo del diseño debido a que en este plan, la disciplina del diseño bioclimático no será sólo un agente que intervendrá el modelo tridimensional para simulación o simple consultoría, sino que tendrá influencia desde los primeros modelos conceptuales apoyando a toda la información de referencia proveniente de la investigación que desarrolla la misma metodología del diseño bioclimático, para posteriormente llevar a la creación de modelos con las herramientas y recursos tecnológicos que ofrece BIM. Como se mencionó previamente, el diseño bioclimático tendrá mayor impacto en las primeras fases del ciclo de vida de un proyecto, es por lo que en el plan de ejecución BEP de esta primera etapa se verán plasmados los distintos procesos de la metodología del diseño bioclimático, generando así una línea de acción aplicable en la generación del proyecto y hasta la operación y mantenimiento del mismo, siendo referente para monitorear la eficacia de las estrategias planteadas y sus análisis a partir de las simulaciones en el modelo.

No obstante, para poder generar un proyecto bioclimático aplicando la metodología BIM, es necesario como se ha mencionado reconocer y ubicar los procesos en las etapas del ciclo de vida correspondiente de acuerdo con los usos y objetivos BIM de manera detallada. Por lo que antes de definir una serie de procesos en los mapas de nivel 2, se deben identificar los usos potenciales BIM en el plan de ejecución o BEP, el cual servirá también como documento legal de contratación, entrega y como la guía para la resolución del proyecto aplicando las herramientas tecnológicas que permiten un trabajo colaborativo, solución a solicitudes de información, flujo de información y comunicación entre las partes interesadas del proyecto.

La Arquitectura Bioclimática da información necesaria para la planeación de un edificio sea cual sea su categoría, es por ello que, el mapa de procesos de la fase de diseño conceptual integra la mayoría de los conceptos iniciales para la generación de propuestas para la mejora y la aplicación de las estrategias pasivas que se rigen en función al clima y las condicionantes del sitio. En la siguiente figura, se muestra el mapa de procesos de la fase conceptual de un edificio bioclimático/sustentable BIM.

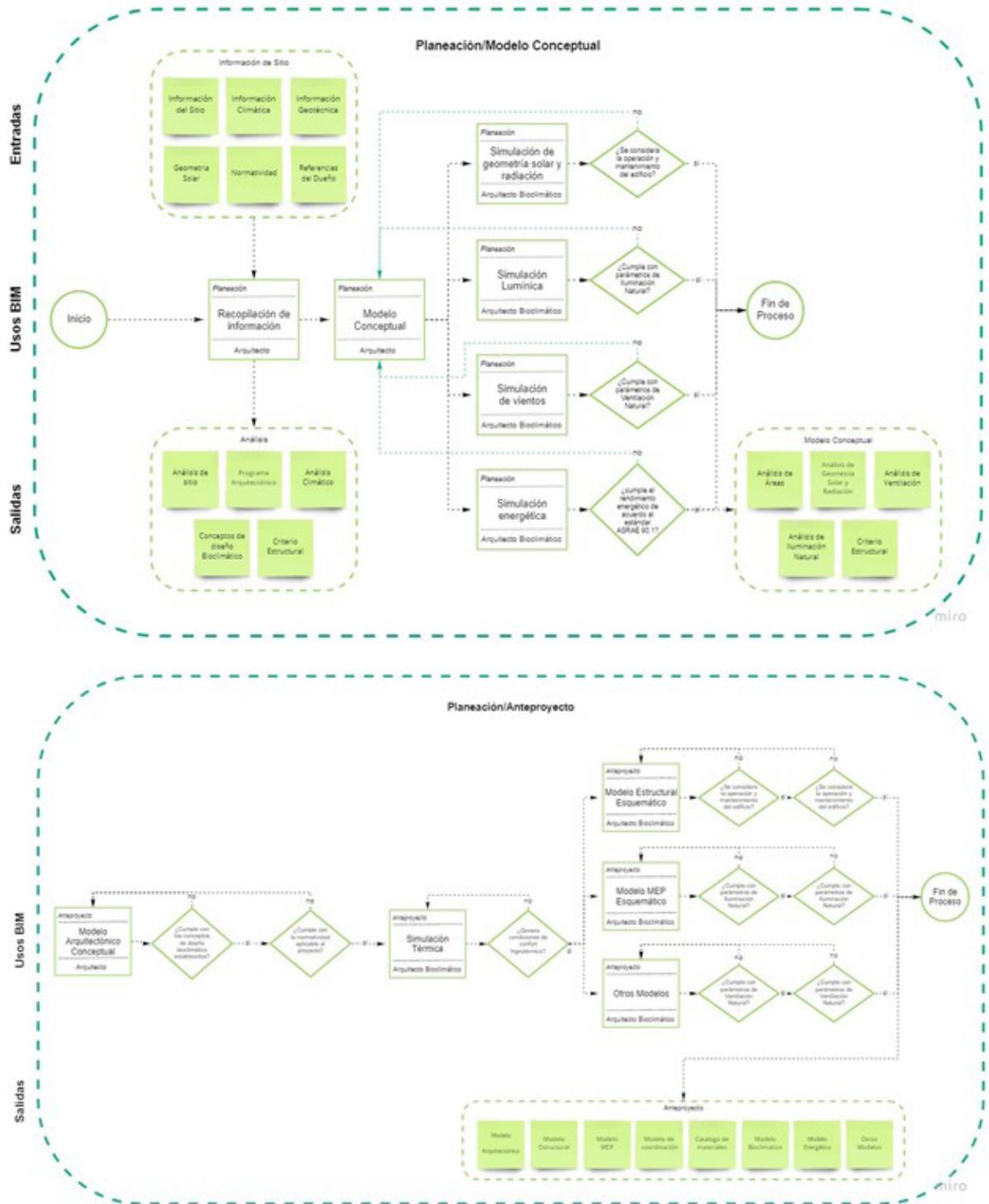


Figura 6. Uso BIM y proceso del “Diseño Conceptual” (Elaboración propia).

Dentro del proceso del diseño conceptual, habrá una recopilación de información o entradas que principalmente analizarán y procesarán una serie de documentos que permitirán tomar decisiones y criterios en la primera fase de diseño. Esta documentación dará claridad para crear diseños integrales que se plasmarán en el modelo conceptual con nivel de detalle y nivel de la información llamado LOD100 y LOI100¹. En la figura 4, tenemos una serie de documentos básicos para iniciar la recopilación de datos y el procesamiento de información, cada uno de estos tiene un fin específico que aportará al plan general los fundamentos iniciales para elaborar un proyecto bioclimático.



Figura 7. Información de referencia en la fase conceptual de un proyecto bioclimático BIM. (Elaboración propia).

Cada uno de estos documentos será procesado por el especialista correspondiente para poder generar estrategias de diseño bioclimático que el equipo de diseñadores aplicará en los primeros modelos para así evaluar la funcionalidad y viabilidad de las posibles volumetrías aplicando las herramientas y recursos tecnológicos que ofrecen las distintas plataformas de modelado virtual que hay en el mercado. Una vez generado el modelo conceptual del edificio y simulado para obtener una serie de resultados que deberán ser evaluados por los consultores bioclimáticos aplicando los indicadores KPI, se podrá generar un modelo arquitectónico a nivel anteproyecto con un nivel de detalle LOD200 y LOI200 el cual tendrá modelados todos los elementos arquitectónicos que definen los conceptos de diseño pasivo tales como dispositivos de control solar, elementos que fomenten la iluminación natural, configuración de los espacios para implementar estrategias de ventilación, entre algunas estrategias definidas por el estudio climático del sitio.

1 LOD (Level of detail) por su traducción "Nivel de detalle o desarrollo" es un código para definir la cantidad de información contenida en un modelo, el nivel de detalle 100 señala elementos tridimensionales conceptuales que definen la forma del elemento. LOI (Level of Information) por su traducción "Nivel de información" describe la cantidad de información contenida en un componente (propiedades, dimensiones, especificaciones, materiales, etc.) dentro de un modelo 3D.

Una vez definido a nivel volumétrico el anteproyecto arquitectónico, se procede, en el mapa de procesos, a generar un modelo analítico de simulación térmica, el cual definirá los sistemas constructivos y materiales del anteproyecto previo a la intervención de las demás disciplinas involucradas en el proyecto. Esta fase de simulación es de suma importancia ya que se definirá las condiciones de temperatura operativa que marca los niveles de confort higrotérmico al interior de los espacios proyectados con estrategias de diseño pasivo previamente evaluadas. De esta manera se podrán proponer materiales para el proyecto con propiedades térmicas que controlen las condiciones de temperatura en el modelo mediante la simulación y análisis; así se podrán proponer únicamente en los locales con condiciones desfavorables por orientación o radiación solar incidente sobre las superficies, tratamientos específicos en muros, cubiertas o aberturas para mejorar las condiciones de confort térmico en el espacio. Esta información a su vez será necesaria para que el equipo de ingeniería en instalaciones, sistemas y estructuras puedan generar el modelo estructural con la información obtenida de los procedimientos constructivos empleados en el proyecto arquitectónico, con valores térmicos justificados en la simulación térmica del modelo. La captura de la información generada, su gestión y definición debe ser compartida entre las demás partes interesadas en el entorno común de datos CDE o Common Data Environment cumpliendo las condiciones ideales de comportamiento térmico de acuerdo a los rangos de confort calculados por el análisis climático.

También es importante considerar que, si el clima no permite generar condiciones de confort aplicando el 100% de las estrategias pasivas identificadas, será responsabilidad del especialista bioclimático definir mediante criterios de evaluación, las condiciones más favorables para generar un uso controlado de sistemas de climatización activo los cuales mejorarán considerablemente el consumo energético del edificio final.

Se puede generar un modelo analítico y simulación energética que compruebe la efectividad de las estrategias de diseño bioclimático aplicadas en la fase conceptual del edificio previo a su intervención por las demás especialidades para la generación del proyecto ejecutivo, este modelo de simulación funcionará como el principal indicador de calidad (KPI) en la fase de diseño conceptual del ciclo de vida del edificio. En esta simulación se podrán identificar elementos que no pueden ser evaluados fácilmente en un modelo conceptual de bajo nivel de detalle como lo es el sistema de climatización que se empleará con un uso de energía específico o la eficiencia energética en los dispositivos electrónicos del proyecto. Esta información será necesaria para que las ingenierías encargadas del diseño de instalaciones puedan generar sus modelos a partir de una copia local del modelo de arquitectura.

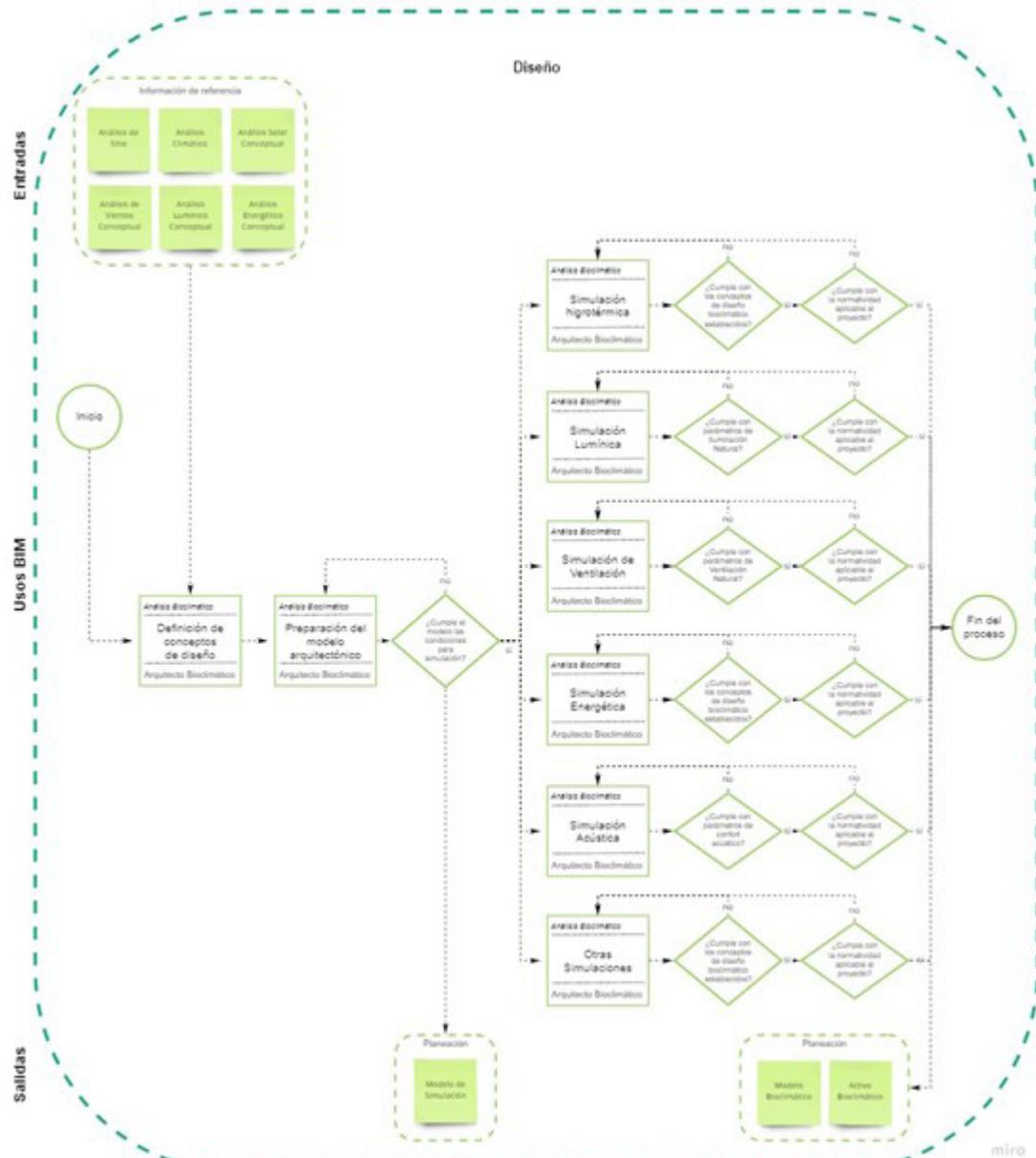


Figura 8. Uso BIM y proceso del “Diseño Conceptual” (Elaboración propia).

El análisis bioclimático dentro del modelo tridimensional será ejecutado una vez que se terminen de desarrollar cada uno de los análisis individuales de las distintas especialidades que intervendrán el modelo para la optimización disciplinaria según lo requiera el proyecto. Este proceso evaluará en la fase de diseño (anteproyecto o proyecto ejecutivo previo a los modelos de integración y federación) cada uno de los conceptos de diseño bioclimático definidos en los objetivos y usos BIM del proyecto del plan de ejecución BEP. De esta manera, se asegura mediante la evaluación y aplicación de normas nacionales e internacionales, cada uno de los parámetros que definen el confort multisensorial del usuario.

Comentarios Finales

Resumen de resultados

Se plantea una serie de procesos donde se integran las fases del diseño bioclimático en la gestión del ciclo de vida de un proyecto, permitiendo un mayor alcance en las posibilidades de un edificio bioclimático adaptando las nuevas metodologías de trabajo que vienen a revolucionar la industria la construcción y de la arquitectura. La aplicación de dichos procesos en cada una de las fases del ciclo de vida de un edificio permitirá que la comunicación entre los agentes involucrados sea más eficiente y con ello se aseguran los estándares de calidad que busca la bioclimática y la metodología BIM para la gestión de proyectos de dicho nivel por medio del uso del software y los avances tecnológicos que permiten al diseñador, visualizar, procesar, controlar, operar, mantener, evaluar y aprender datos que no pueden ser identificados fácilmente aplicando los métodos tradicionales.

Conclusiones

El plan de ejecución BEP es el documento con el cual será desarrollado un proyecto siguiendo la metodología BIM, este es el documento legal mediante el cual cada una de las partes interesadas identificará cómo será la resolución exacta del proyecto mediante la implementación de procesos y la comunicación entre especialistas haciendo uso de la tecnología y las herramientas digitales que atacan el principal problema que ha tenido la arquitectura la cual es la comunicación. Este documento el cual debe ser desarrollado por el denominado BIM Manager, contendrán una serie de procesos en los cuales se indicará el trabajo colaborativo, el empleo de herramientas, estándares, control de modelos, preferencias compartidas, datos contenidos, nomenclatura, simbología, contratos y recursos tecnológicos entre otros, para establecer una mayor eficiencia y calidad en la gestión de proyectos. El diseño bioclimático de una edificación asegura por su parte una serie de factores que favorecen en su totalidad el desarrollo del proyecto, cada uno de estos conceptos deberá estar identificado en los objetivos del proyecto y los usos potenciales BIM del mismo dentro del BEP. La aplicación de estos usos BIM y la implementación de estrategias de diseño pasivo genera espacios adaptados con el entorno mientras que asegura el confort y bienestar del usuario que le dará uso y sentido al edificio final. A su vez, asegurará una mayor eficiencia energética debido al manejo adecuado de los recursos por la aplicación de un buen diseño que aprovecha las cualidades del entorno asegurando así la sustentabilidad.

La aplicación de los procesos del diseño bioclimático en conjunto con la metodología de trabajo colaborativa BIM permite que el rol del diseñador o consultor bioclimático tenga mayor impacto en la fase de planeación lo cual generará que el edificio integre los conceptos de diseño que se obtienen por medio del análisis de las distintas variables del entorno climático y sitio que asegurarán una integración armónica del edificio y medio ambiente natural y artificial que le rodea. Enfatizando que el rol del diseñador bioclimático ya no sólo será integrarse en una etapa avanzada del diseño donde se requiere por requisito de concurso y/o licitación hacer evaluaciones del proyecto con el fin de encontrar adaptaciones o mejoras, sino que es-

tará integrado en cada uno de los procesos de las distintas fases de un proyecto permitiendo así una entrega de proyecto integrado y una gestión de calidad eficiente en la edificación para su ejecución en obra, su operación y mantenimiento hasta que cumpla con su ciclo de vida y pase a la última etapa de demolición o reutilización.

Referencias

BIM21. (2019). ¿Qué es BIM? Obtenido de <https://www.construccionesbim21.com/metodologia-bim-building-information-modeling/>

Eastman, C. M. (2011). BIM Handbook (Segunda ed.). John Wiley & Sons Ltd. Recuperado el 09 de septiembre de 2020

EDITECA. (06 de junio de 2019). Dimensiones BIM, el alcance del programa. Obtenido de <https://editeca.com/dimensiones-bim-alcance-del-programa/>

Equipo BIMnD. (19 de marzo de 2019). Las 7 Dimensiones BIM. (BIMnD España) Recuperado el 20 de mayo de 2020, de BIMnD España: <https://www.bimnd.es/7dimensiones-bim/>

Fuentes Freixanet, V. A. (enero de 2002). Metodología de Diseño Bioclimático - El Análisis Climático. 83 - 90. Ciudad de México, México: Universidad Autónoma Metropolitana. Recuperado el 25 de marzo de 2020, de http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/5605/Metodologia_diseno_bioclimatico_Fuentes_2002_MAB.pdf?sequence=1

García Sanz, G. (2018). BIM: Conceptos Generales. Móstoles, Madrid, España. Recuperado el 20 de mayo de 2020, de <https://docplayer.es/80318749-Bim-conceptos-generales-gonzalo-garcia-sanz.html>

IDEAbuilder (2012) The MacLeamy Curve -Real World BIM and IPD. Recuperado de: <http://greghowes.blogspot.com/2012/06/macleamy-curve-real-world-bim-and-ipd.html>.

Messner, J., Anumba, C., Dubler, C., Goodman, S., Kasprzak, C., Kreider, R., . . . Zikic, N. (31 de enero de 2021). BIM Project Execution Planning Guide, Version 3.0. State College, Pennsylvania, Estados Unidos. Recuperado el 23 de febrero de 2021, de <https://psu.pb.unizin.org/bimprojectexecutionplanning/>

MV-BIM. (2020). MV-BIM CONSULTORIA BIM. Obtenido de <https://mv-bim.com/servicios/>

Olgay, V. (1963). Design with climate. Princeton University Press.

Seys. (1 de marzo de 2018). Infografía: ¿Qué es BIM y cuál es la historia del Building Information Modeling? Recuperado el 20 de marzo de 2020, de Seys: <https://seystic.com/bim-la-historia-del-building-information-modelling/>

Efecto de la NMX-C-460-ONNCCE-2009 sobre el Comportamiento Térmico en Viviendas de Interés Social en Clima Templado Sub-Húmedo

Claudia Eréndira Vázquez Torres¹

Cristina Sotelo Salas²

Ruth Grajeda Rosado³

1 Universidad de Guanajuato | Facultad de Arquitectura

Correo: claudiaerendira@gmail.com

2 Universidad Autónoma de Baja California | Facultad de Arquitectura y Diseño |

Correo: cristina.sotelo@uabc.edu.mx

3 Universidad Veracruzana

Correo: ruthgrajeda10@yahoo.com.mx

Resumen

Este estudio evaluó el efecto de la implementación obligatoria de la NMX-C-460-ONNC-CE-2009 “Industria de la Construcción - Aislamiento Térmico - Valor “R” para las Envolventes de Vivienda por Zona Térmica para la República Mexicana - Especificaciones y Verificación” en viviendas de interés social para clima templado subhúmedo. Si bien, es conocido el beneficio que genera el incremento en el valor R en las envolventes de edificaciones en climas extremos sobre la demanda de enfriamiento y calentamiento, se busca generar conocimiento sobre el comportamiento térmico de la envolvente y la habitabilidad térmica de estas viviendas en un clima templado, donde el uso de la climatización artificial es menos generalizado. Además, se estudian, a través de simulación térmico-dinámica, dos sistemas constructivos empleados en la zona del Bajío, que aun en cumplimiento de la norma, presentan variaciones significativas en su desempeño, los resultados de este estudio complementan la información técnica disponible para la toma de decisiones en su implementación. En el caso base se observó una oscilación de temperatura operativa de 7°C, mientras que los dos casos con aislamiento evaluados presentaron una oscilación de hasta 2°C.

Palabras clave: Aislamiento térmico, Habitabilidad térmica, Confort térmico, Vivienda interés social

Abstract

This study evaluated the effect of the obligated implementation of the NMX-C-460-ONNC-CE-2009 “Construction Industry - Thermal Insulation -” R “Value for Housing Envelopes by Thermal Zone for the Mexican Republic - Specifications and Verification” in social housing for temperate subhumid climate. Although the benefit generated by the increase in the R value in building envelopes in extreme climates on the demand for cooling and heating is known, this research seeks to generate knowledge about the thermal behavior of the envelope and the thermal habitability of these homes in a temperate climate, where the use of artificial

air conditioning is less widespread. In addition, two construction systems used in the Bajío area are studied, through Building Energy Simulation, which, even in compliance with the standard, present significant variations in their performance, the results of this study complement the technical information available for decision-making in their implementation. A temperature oscillation of 7°C was observed in the benchmark case, while the two cases with insulation evaluated presented an oscillation of up to 2°C.

Introducción

La creciente preocupación por garantizar el bienestar y calidad de vida de los usuarios de edificaciones se puede abordar desde diferentes perspectivas y en diferentes escalas, en el caso particular de la edificación, se considera que existe compatibilidad entre el objetivo de las estrategias de adecuación bioclimática para garantizar edificaciones confortables y saludables, y la reducción en el consumo de energía para minimizar el impacto ambiental (Fuentes-Freixanet, 2004; Jannat, Hussien, Abdullah, & Cotgrave, 2020).

Dichas estrategias se alinean a cuatro directrices: salud, reducción de huella de carbono, costos efectivos y resiliencia. Es posible definir estrategias pasivas principales para evitar el sobrecalentamiento de edificaciones en climas templados (Desideri & Asdrubali, 2018): a) Control térmico con la eliminación de puentes térmicos y utilización de materiales aislantes; b) Control del aire con hermeticidad adecuada y ventilación con recuperación entálpica; c) Control de radiación, con el uso de materiales traslúcidos adecuados y medidas de iluminación y sombreado natural; d) Control de humedad con impermeabilizantes y sistema de control de vapor en base al clima y la humedad del aire interior y; e) Control de rendimiento dinámico mediante proyección de espacio habitable que genere microcargas y almacenamiento higrotérmico diseñado de acuerdo a zonas climáticas.

Particularmente, el control térmico con la eliminación de puentes térmicos y utilización de materiales aislantes, buscan la disminución de las cargas externas a través de la reducción de la transferencia de calor conductivo. Con el uso de sistemas constructivos aislantes, se permite la reducción en la demanda de enfriamiento y calentamiento, reduce la amplitud térmica y propicia condiciones de confort térmico al interior de la edificación.

De acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad (CFE), las viviendas ubicadas en zonas de clima cálido consumen en promedio cerca del doble de energía eléctrica en refrigeración de lo que consumen las viviendas ubicadas en zonas de clima templado (INEGI, 2018). Sin embargo las zonas templadas en México ubicadas principalmente en el centro del país, abarcan áreas importantes urbanizadas dentro de los estados de Puebla, Estado de México, Guanajuato, Querétaro y Michoacán, lo cual representan el 43% de la población total del país (tabla 1) y debido al cambio climático, existe una tendencia global de déficit y superávit del periodo de confort supuesto anual, por lo que estudios relativos a zonas templadas beneficia a un gran número de usuarios con potencial para generar estrategias de disminución de consumo energético a nivel nacional.

Tabla 1. Población total de México

Entidad	Población (millones)	%
Total	126.01	100
CDMX	9.2	7.3
Estado de México	16.99	13.5
Guanajuato	6.16	4.9
Querétaro	2.37	1.9
Puebla	6.5	5.2
Michoacán	4.76	3.8
Veracruz	8.06	6.4
Total zonas templadas		43.00

Fuente: Número de habitantes. Cuéntame de México (inegi.org.mx)

Según datos del INEGI, en 2020 se cuantificaron 35'219,141 viviendas particulares habitadas; en 2000 eran 21'942,535 viviendas y en 2010 eran 28 607'568. De la primera encuesta nacional sobre el consumo de energético en viviendas particulares (ENCEVI) realizado en 2018, informó que, sobre la climatización, el 45% de las viviendas particulares habitadas ubicadas en localidades urbanas, utilizan ventiladores, mientras que en las localidades rurales la proporción fue de 41%.

Se contabilizaron más de 7 millones de equipos de aire acondicionado en uso en viviendas particulares en el país y a nivel nacional 6.3% de las viviendas en el país usaron algún tipo de equipo de calefacción aproximadamente de 2.6 millones de equipos en uso. Se muestra que la penetración de Aire Acondicionado (AA) en las zonas templadas representa únicamente el 1.3% a nivel nacional, muy por debajo de las zonas norte y sur, al no presentar demandas de enfriamiento significativas, por el contrario, se observa un porcentaje mayor, 2.5%, en la necesidad de calentamiento. Al 2018, solamente el 1.5% de las viviendas en zona templada contaba con algún sistema de aislamiento térmico (figura 1).

El uso del mismo prototipo de vivienda en cualquier región del país, sin considerar las condiciones climáticas, produce problemas de consumo energético obligando a los usuarios al uso de sistemas activos para alcanzar el confort térmico (Gutiérrez, Romero, & Sotelo, 2014; Ochoa, et al., 2014; Romero-Pérez, Rodríguez-Muñoz, Alpuche-Cruz, & Martín-Domínguez, 2017; Becerra-Santacruz & Lawrence, 2016; Medrano-Gómez & Escobedo-Izquierdo, 2017).

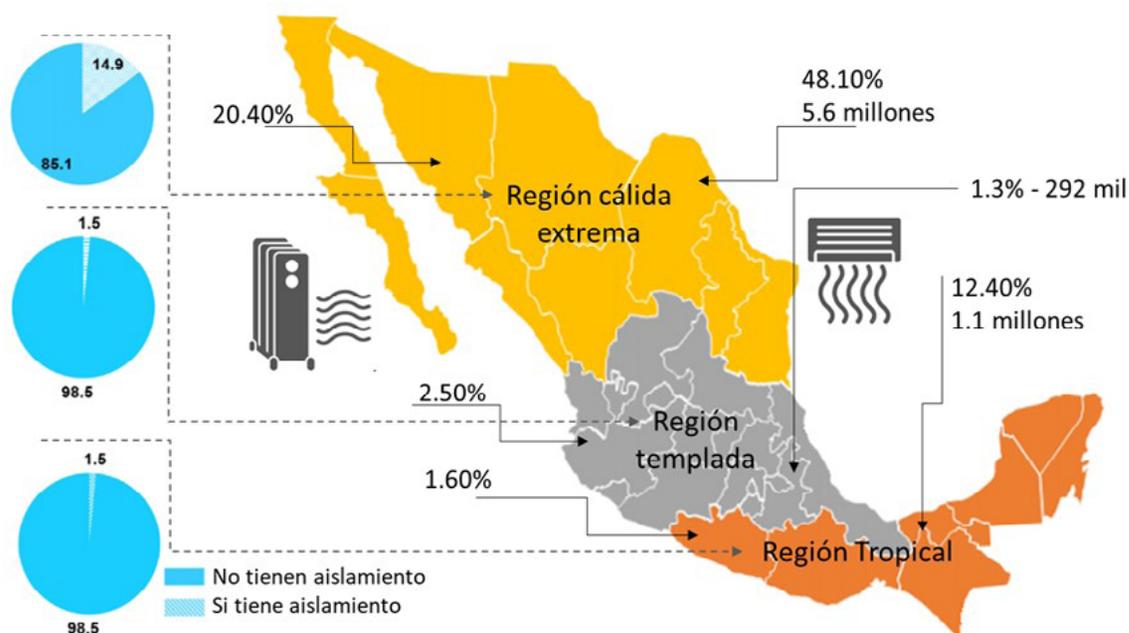


Figura 1. Necesidades de enfriamiento y calentamiento artificial a nivel nacional.

Fuente: INEGI (2018)

En el 2009 se incorporó la NMX-C-460-ONNCCE-2009 (ONNCCE, 2009) como medida de evaluación de la eficiencia energética en todo el país. Esta norma fue voluntaria hasta el 2018, cuando el Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT), la incorporó a su sistema de subsidios federales e hipoteca verde (INFONAVIT, 2020). El sistema constructivo de las viviendas ofertadas para INFONAVIT debe cumplir con la resistencia térmica total (valor R) indicada en la norma (tabla 2) como medida de mejoramiento y disminución de la demanda energética en el acondicionamiento térmico del espacio interior, de acuerdo con la zona térmica del país en que se ubique: el requisito en el techo, en todas las zonas, y en el muro de mayor asoleamiento, en las zonas cálidas (tabla 2).

Tabla 2. Resistencia térmica total (valor "R") en techos.

Zona térmica No.	Techos (m ² K / W)		
	Mínima	Habitabilidad	Ahorro de energía
1	1.4	2.1	2.65
2	1.4	2.1	2.65
3A, 3B, 3C	1.4	2.1	2.8
4A, 4B, 4C	1.4	2.65	3.2

Fuente: NMX-C-460-ONNCCE-2009 (ONNCCE, 2009).

Antecedentes

Rosas-Flores y Rosas-Flores (2020) mostraron que el 95% de los hogares de México no disponen de aislamiento térmico, que el consumo eléctrico estimado de los sistemas de climatización es 4.5 veces el consumo eléctrico de todo el sector residencial y realizaron una proyección al 2030 que supone un ahorro energético correspondiente a 44.67 MM de toneladas de CO₂ utilizando aislamiento térmico en viviendas existentes y nuevas.

Griego, Krarti, y Hernández-Guerrero (2012) analizaron las medidas de eficiencia energética en diferentes prototipos de vivienda y encontraron que el aislamiento térmico puede lograr un mayor confort térmico en climas de la región central del país, donde se encuentra el objeto de este estudio. Otro estudio realizado para la zona central del país fue el conducido por Medrano-Gómez y Escobedo-Izquierdo (2017) que encontraron una disminución de 7°C al evaluar el aislamiento térmico en dos prototipos de vivienda con clima cálido sub-húmedo.

Por otra parte, Torres-Rodríguez & Morillón-Gálvez (2007) realizaron un estudio en clima templado, sobre la implementación de un techo verde como estrategia de aislamiento térmico en Ecatepec de Morelos, Estado de México, donde obtuvieron una reducción en consumo energético de 8%. En línea con alternativas naturales de resistencia térmica, Mecott (2007) analizó una vivienda en clima templado seco, con paneles de cemento con olote (Valor R 0.2851 m²C/W) y cemento con vidrio volcánico (Valor R 0.3098 m²C/W), en muros y cubierta, comparado con el sistema convencional de muros de bloque de concreto y cubierta de vigueta y bovedilla, y mostró un ahorro de energía del 4% anual, únicamente con el cambio en materiales de la envolvente.

En el contexto internacional, Roque, Vicente, & Almeida (2021), realizaron una comparación entre dos sistemas constructivos, uno convencional de mampostería y uno de construcción ligera, ambos aislados. Presentaron problemas de sobre enfriamiento en el periodo frío, del clima templado oceánico, incrementando el desconfort en los usuarios. Presentaron diferencias en rangos de confort en período cálido de 0-40% en el sistema ligero, y de 0-45% en el sistema de mampostería, así como desconfort en el período frío de 42-100% y 51-100%, respectivamente.

Shahi et al. (2021), llevaron a cabo mediciones en una vivienda convencional, en el clima templado Nepal, donde se registraron mejoras de 74% en horas de confort, con diferencias interiores de temperatura de 1.1 a 1.8°C, al reducir la transmitancia térmica de muros y cubierta, en 0.69 m²W/K y 1.55 m²W/K respectivamente.

Mientras que Raimundo, Saraiva, & Oliveira (2020), realizaron una investigación más extensa sobre el efecto de tres aislantes de uso comercial generalizado en Portugal: poliestireno extruido, poliestireno expandido y lana mineral en diferentes posiciones en la envolvente: interior, exterior y central, además de variaciones de 0.01 m a 0.12 m en espesor. Concluyeron que, para las diferentes tipologías analizadas, el incremento en espesor de aislante reduce la temperatura interior y el consumo energético en todos los casos, excepto en los edificios comerciales, recomendando térmicamente la posición del aislante al exterior, y como opción

con mejor costo beneficio, la lana mineral. En cuanto a la recomendación en espesor, varía según las características de cada localidad analizada.

A partir de los casos analizados, se considera que la estrategia pasiva de incrementar la resistencia térmica de la envolvente permite la reducción de las cargas externas y la reducción de la temperatura interior de la vivienda, para evitar el uso del aire acondicionado como sistema de climatización activa y de esta manera evitar incurrir en el costo económico y ambiental asociado a su uso. De igual manera se visualiza la necesidad de realizar estudios comparativos locales, utilizando la información de mercado y tecnología disponible para generar datos suficientes para incidir en la selección de un material o sistema constructivo aislante determinado, con la intención de abonar a la creación de lineamientos de diseño bioclimático en beneficio del confort de los usuarios en climas templados.

El objeto de estudio de esta investigación es análisis de la habitabilidad térmica de la vivienda en clima templado sub-húmedo a partir de la obligatoriedad de la implementación de aislante en la envolvente de la edificación según la NMX-C-460-ONNCCE-2009, así como alternativas de sistemas constructivos certificados para su cumplimiento. Esto se aborda a partir de un método teórico numérico con la elaboración de un modelo virtual de la vivienda para su simulación térmico-dinámica, por el período de un año, con el programa Design Builder versión 7.

Caso de estudio

El modelo de vivienda de interés social analizada se encuentra en la región central de México, en Guanajuato. De acuerdo con la clasificación térmica establecida por INFONAVIT (2020a)



Figura 2. Zonas térmicas de la República Mexicana.

Fuente: NMX-C-460-ONNCCE-2009

y a la clasificación Köppen y Geiger (Cwb con temperatura promedio de 17.3°C y precipitaciones de 779 mm al año), pertenece a la zona 3A (figura 2).

La unidad de estudio es una casa-habitación modelo dúplex, de un nivel; sus espacios son: recamara 1 (9m²), recamara 2 (9m²), cocina (4m²), baño (3m²) y estancia-comedor (15m²), con un total de 40m². El análisis se realizó con las características higrotérmicas de materiales como bloque de concreto (0.10x0.12x0.24m), aplanado mortero cemento-arena, pintura vinílica color blanco a dos manos en muros, y concreto armado (0.10 m) con acabado impermeabilizante de resinas acrílicas de color blanco en la losa de azotea. El estudio considera la temperatura operativa en toda la vivienda (figura 3).

Los sistemas constructivos analizados, para su comparación con el caso base, fueron a) Losa de concreto con aislamiento de poliestireno extruido de 1.25" (0.03175 m) de espesor, y b) Losa de vigueta y bovedilla de 0.17 m de espesor (figura 4), que se representarán como escenarios A y B, respectivamente.

Para dar contexto sobre el costo beneficio del uso de los aislantes, en el estudio de mercado, se sabe que la losa de concreto tiene un costo por metro cuadrado de \$400 MXN, el concreto con aislamiento Foamular 1 ¼" por m² \$603.5 MXN y el sistema de vigueta y bovedilla tiene un costo por m² de \$680 MXN.

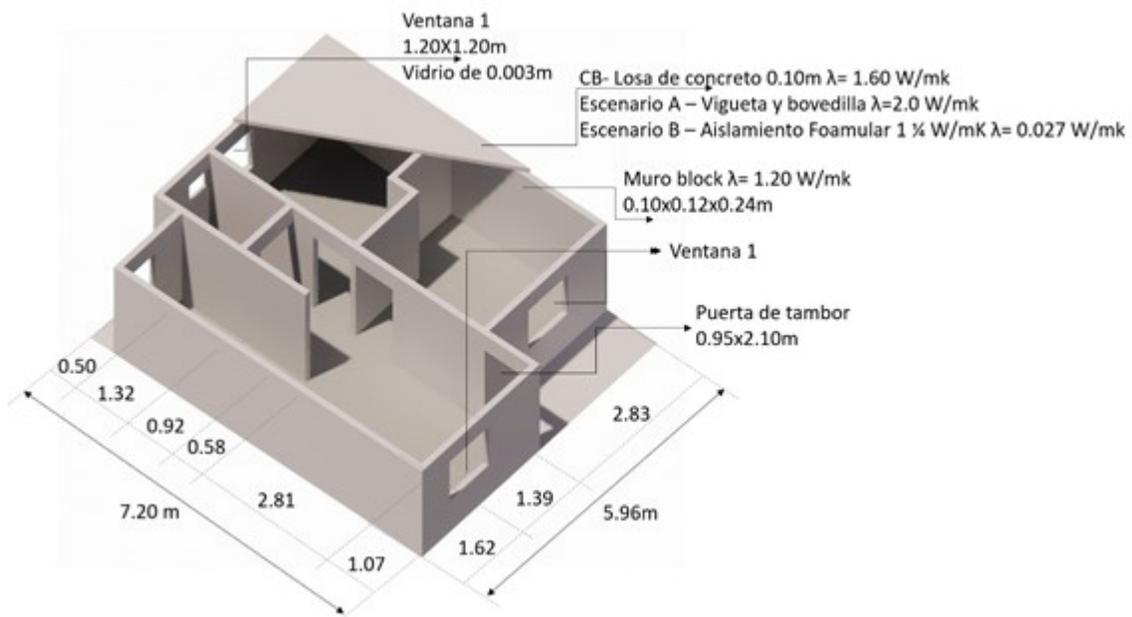


Figura 3. Caso base. (Elaboración propia).



Figura 4a. Sistema de losa de concreto con aislante.

Figura 4b. Sistema de vigueta y bovedilla.

Método

El método utilizado fue teórico numérico con la elaboración de un modelo virtual del caso base para su simulación térmico-dinámica con el programa Design Builder versión 7, y su comparación con los escenarios A y B. El escenario A corresponde a la losa de azotea de concreto reforzado con el aislante Foamular de 1 ¼”, mientras que el escenario B es el sistema de vigueta y bovedilla cuyas especificaciones se detallan en la figura 4a y 4b respectivamente.

Para definir la temperatura neutra y las consignas de calentamiento y enfriamiento se empleó el archivo meteorológico de localidad La Sandía, en León, Guanajuato, generado por el Sistema Meteorológico Nacional que cumple con 30 años de mediciones (1981 a 2010); para el proceso de simulación se generó un archivo climático obtenido con el software Meteonorm 7.3.

Modelo de confort térmico

De acuerdo con el modelo adaptativo (Auliciems & Szokolay, 1997) los límites de temperatura de la zona de confort se pueden tomar en relación con la Tn (Temperatura de neutralidad) para una aceptabilidad del 90% a partir de (Tn +/- 2.5 °C), sin embargo +/- 3.6°C todavía serán aceptable para el 80% de la población; considerando el ajuste de las preferencias estacionales.

Se ha demostrado en estudios que la mediana de los votos de las personas, es decir, Tn; cambia con la temperatura media del mes, por lo que para determinarla se utiliza la ecuación siguiente (Ec. 1):

$$T_n = 17.6 + 0.31(T_m) \quad \text{Ec. 1}$$

En la figura 5 muestra la temperatura neutra correspondiente a la localidad de estudio con el rango de confort superior e inferior con base en la ecuación (Szokolay, 2014).

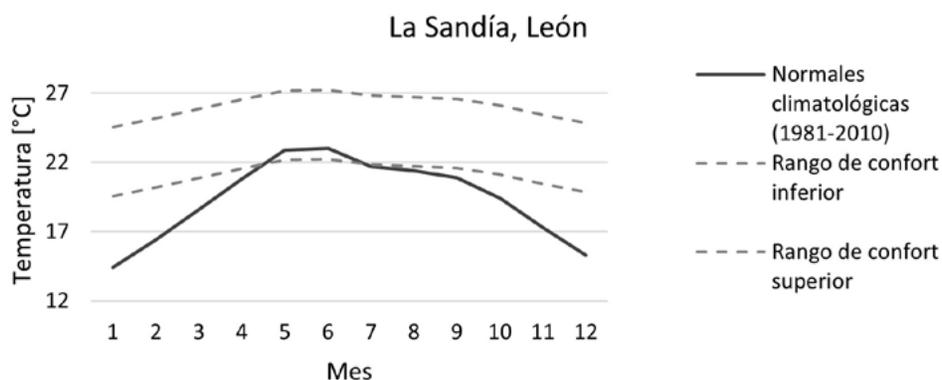


Figura 5. Gráfica de temperatura neutra con rangos de confort. (Elaboración propia).

Condiciones para la simulación

La simulación se realizó en el software Design Builder versión 7, con las medidas mostradas en la tabla 3; complementada con los datos que corresponden a las actividades antropogénicas: dos personas por m^2 , el modelo de infiltración consideró una tasa de renovación de 0.7 cambios de aire por hora y un equipo de computo en cada recámara con un valor de $600 W/m^2$. La simulación corresponde a un año con base horario. Se obtuvieron resultados con medidas pasivas (ventilación natural) sin considerar aire acondicionado (Figura 6).

Tabla 3. Medidas de la simulación (Elaboración propia).

Elemento	Medidas (metros)
Ventana 1	1.20 x 1.20
Ventana 2	0.60 x 0.60
Puerta principal	0.95 x 2.13
Puerta recámara	0.80 x 2.13
Puerta baño	0.70 x 2.13
Puerta patio	8.85 x 2.13

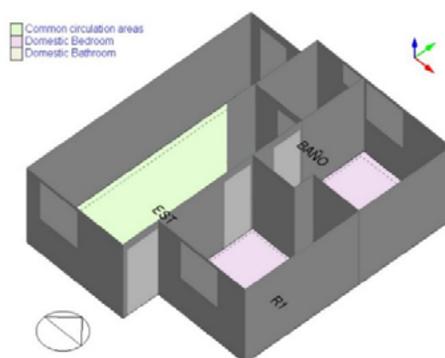


Figura 6. Caso de estudio modelado en Design Builder v7. (Elaboración propia).

Cálculo de aislamiento térmico

Para calcular el aislamiento térmico, se consideraron dos sistemas constructivos con certificación de cumplimiento de la NMX-C-460-ONNCCE-2009. El primer caso con losa de concreto con aislante (capa homogénea) obteniendo el valor de R a partir de la Ec. 2 y el segundo caso con capas homogéneas y no homogéneas (vigüeta y bovedilla) con la Ec. 3.

$$R_T = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_2} + \frac{L_1}{\lambda_2} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{L_n}{\lambda_n} \quad \text{Ec. 2}$$

$$R_T = \frac{1}{\frac{F_1}{R_{p+(\frac{g}{\lambda_1})}} + \frac{F_2}{R_{p+(\frac{g}{\lambda_2})}} + \frac{F_3}{R_{p+(\frac{g}{\lambda_3})}} + \dots + \frac{F_n}{R_{p+(\frac{g}{\lambda_n})}}} \quad \text{Ec. 3}$$

En el escenario A, el cálculo realizado para losa de concreto de 0.10 m de espesor con aislante Foamular que cumple con la norma analizada, tiene un valor de R final= 1.47 W/m²K y el escenario B con un valor R=1.68 W/m²K. Ambos sistemas constructivos se desglosaron en la Tabla 4 e incluyen la certificación de los materiales analizados.

Tabla 4. Descripción de capas para los escenarios A y B. (Elaboración propia).

Escenario A		Escenario B	
Elemento del Sistema constructivo	Conductividad térmica	Elemento del Sistema constructivo	Conductividad térmica
Convección exterior	13.000 w/mK	Impermeabilizante	0.170 w/mK
Impermeabilizante acrílico	0.2054 w/mK	Capa de compresión	1.650 w/mK
Losa de concreto	2.000 w/mK	Vigüeta y bovedilla	2.000 w/mK
Aislamiento foamular 1 ¼"	0.0270 w/mK	Yeso	0.370 w/mK
Empastado con malla de refuerzo	1.65 w/mK	Pasta acrílica	0.370 w/mK
Convección interior en losas	6.60 w/mK		
R total	1.4754 m ² K/W	R total	1.680 m ² K/W

Resultados

En la figura 7 se observan los resultados de la temperatura operativa para el caso base, escenario A y escenario B, así como el rango de confort para un clima templado sub-húmedo. Los resultados obtenidos evidenciaron para el caso base, necesidades de enfriamiento por encima de 4 °C respecto al rango de confort acentuado en los meses cálidos.

Los escenarios A y B presentaron una menor oscilación en la variación de la temperatura operativa respecto al caso base. El escenario B mostró una mayor compactación en la amplitud térmica durante todo el año en comparación al escenario A.

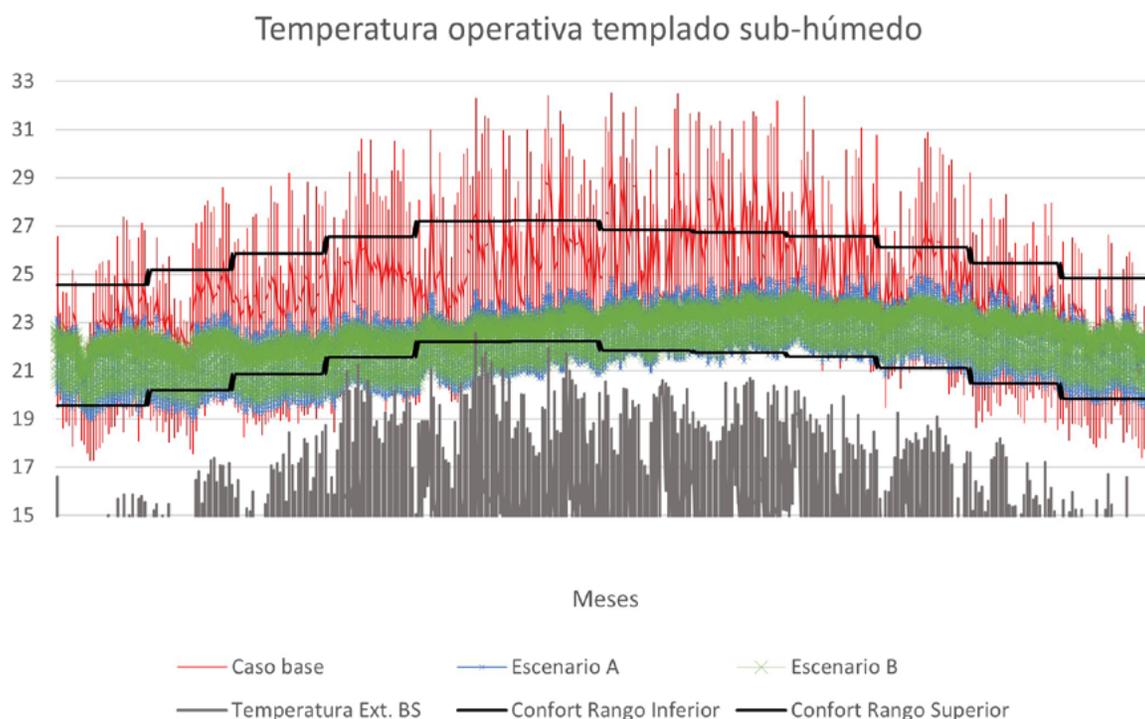


Figura 7. Resultados de temperatura operativa en el caso base y escenarios A y B. (Elaboración propia).

Tanto el escenario A como el escenario B presentaron necesidades de calentamiento (figura 7). Las figuras 8 y 9 muestran respectivamente las necesidades de enfriamiento y calentamiento para el caso base, y los escenarios A y B.

En la figura 9 se observan los escenarios A y B, donde las necesidades de enfriamiento no son representativas y las necesidades de calentamiento se presentan con una variación aproximada de 2 °C para el escenario A y 1.5 °C para el escenario B. Se observa que el escenario B, prescinde de necesidades de calentamiento durante los meses Septiembre, Octubre, Noviembre y Diciembre, además, presenta menor demanda de calentamiento que el escenario A.

Finalmente, se puede apreciar en la figura 10, que la temperatura operativa media mensual de ambos escenarios con aislamiento térmico disminuyen no solo la amplitud térmica, sino la

Desempeño Bioclimático de una Escuela de Carlos Leduc en Clima Cálido Sub-Húmedo

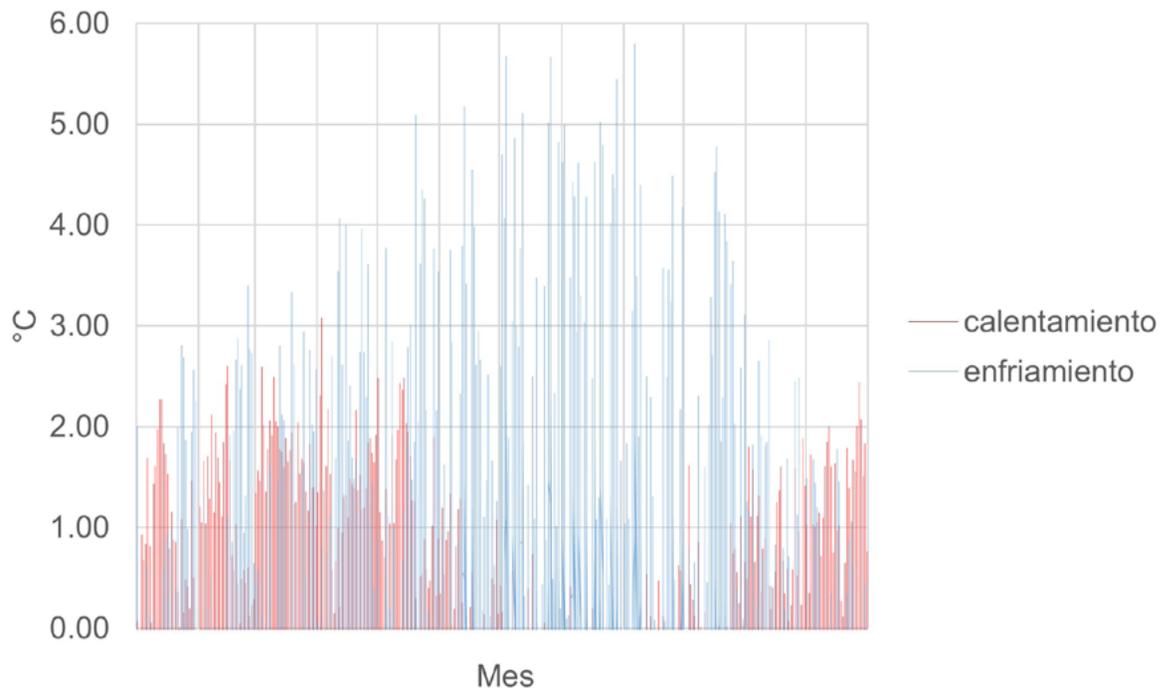


Figura 8. Necesidades de calentamiento y enfriamiento para el caso base. (Elaboración propia).

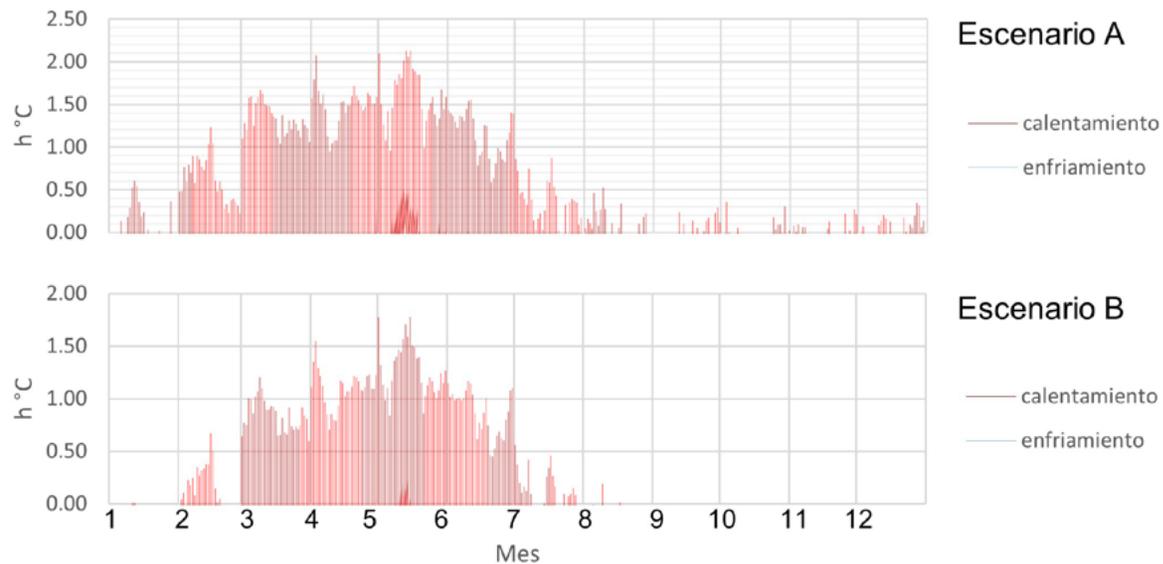


Figura 9. Necesidades de calentamiento y enfriamiento para los escenarios A y B. (Elaboración propia).

temperatura en la mayoría de los meses, excepto en el mes de diciembre, y para el escenario B, el mes de enero.

De igual manera se observa que los tres casos elevan la temperatura media mensual con respecto a la temperatura de bulbo seco exterior, esto sería indicativo de la necesidad de implementar sistemas de enfriamiento, en clima cálido, sin embargo, al presentarse en clima templado, y según el rango de confort presentado en la figura 7, los rangos de temperatura operativa interior para dichos meses, se encuentran contenidos en la zona de confort.

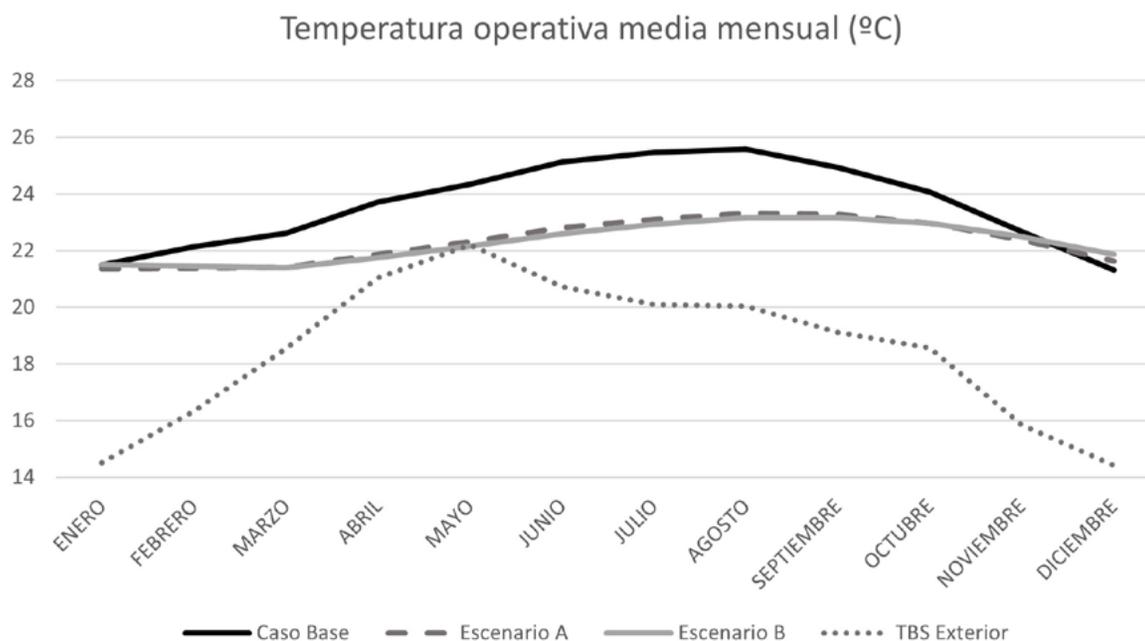


Figura 10. Temperatura media mensual de caso base y sistemas de aislamiento térmico. (Elaboración propia).

Conclusiones

En este estudio se analizó el efecto de la NMX-C-460-ONNCCE-2009 en una vivienda de interés social con clima templado sub-húmedo como caso base y dos sistemas constructivos aislantes utilizados en la región central del país. De acuerdo con los resultados obtenidos, el caso base sin estrategias de aislamiento presentó una diferencia de temperatura media mensual de 2.14 a 6.99 °C a la temperatura de bulbo seco exterior, donde en un clima templado, el desfavorable desempeño del caso base, provoca demandas de enfriamiento y calentamiento, mientras que los escenarios con sistemas aislantes también superan la TBS exterior, pero en menor medida, de 0.87 a 7.21 °C.

Se observó una reducción de la temperatura operativa media entre el caso base y los escenarios A y B, lo cual mejora el desempeño térmico de la vivienda, y por tanto sus condiciones interiores. El mejor escenario fue el sistema de losa de concreto con poliestireno extruido, con una diferencia de 0.5 a 1 °C con respecto al escenario B, y de 7°C con respecto al caso base. El escenario A es, además, el sistema de menor costo, lo cual muestra una relación favorable de costo-beneficio.

Se muestra con estos resultados que la implementación obligatoria de la NMX-C-460-ONNCCE-2009 incide positivamente en los objetivos nacionales de mitigación de cambio climático al resolver efectivamente las necesidades de enfriamiento de la vivienda de interés social, y evita la necesidad de adquirir u operar sistemas de aire acondicionado en las viviendas para alcanzar condiciones de confort térmico. De igual manera, coadyuva en las estrategias para disminuir la Isla de Calor Urbano, al reducir la temperatura de las edificaciones, de sus

respectivos elementos constructivos, y del impacto del consumo energético sobre su entorno inmediato.

Estos resultados amplían el conocimiento que hasta hoy tenemos sobre los sistemas de aislamiento certificados para viviendas de interés social relativos al clima templado sub-húmedo. Por otro lado, otorga elementos para mejorar las estrategias de diseño en beneficio de los usuarios y el confort térmico que experimentan en sus propias viviendas.

Referencias

- Auliciems, A., & Szokolay, S. (1997). Thermal comfort. PLEA notes, 68.
- Becerra-Santacruz, H., & Lawrence, R. (2016). Evaluation of the thermal performance of an industrialised housing construction system in a warm-temperate climate: Morelia, Mexico. *Building and Environment*, 29-39.
- Desideri, U., & Asdrubali, F. (2018). *Handbook of energy efficiency in buildings: a life cycle approach*. Butterworth-Heinemann.
- Fuentes-Freixanet, V. A. (2004). *Clima y Arquitectura*. Mexico: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Griego, D., Krarti, M., & Hernández-Guerrero, A. (2012). Optimization of energy efficiency and thermal comfort measures for residential buildings in Salamanca, Mexico. *Energy and Buildings*, 54, 540-549. doi:10.1016/j.enbuild.2012.02.019
- Gutiérrez, T., Romero, R., & Sotelo, C. (2014). Thermal energy impact of bioclimatic strategies applied to low-income housing in a hot dry climate. *Energy Procedia*, 1743-1752.
- INEGI. (2018). *Primera Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares*. Mexico: INEGI. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/contenidos/sala-deprensa/boletines/2018/EstSociodemo/ENCEVI2018.pdf>
- INFONAVIT. (2020). *Listado de regiones bioclimáticas*. Mexico: INFONAVIT.
- INFONAVIT. (2020). *Manual Explicativo de la Vivienda Ecológica 2020. Hipoteca verde*. Mexico: INFONAVIT.
- Jannat, N., Hussien, A., Abdullah, B., & Cotgrave, A. (2020). A comparative simulation study of the thermal performances of the building envelope wall materials in the tropics. *Sustainability*, 1-26.
- Mecott, S. (2007). *Vivienda bioclimática con paneles modulares de ferrocemento y materiales aislantes alternativos para la ciudad de Oaxaca, Oax.*. México: Instituto Politécnico Nacional (Tesis de maestría no publicada).
- Medrano-Gómez, L. E., & Escobedo-Izquierdo, A. (2017). Social housing retrofit: Improving energy efficiency and thermal comfort for the housing stock recovery in Mexico. *Energy Procedia*, 41-48.
- Ochoa, J., Alpuche, M., González, I., Barrios, G., Barajas, .. M., & Gómez, A. (2014). Thermal Comfort and Energy Performance of Social Housing in Hot Dry Climates. *Passive Low Energy Architecture Conference 2012*. 2012.

ONNCCE. (2009). *Industria de la Construcción - Aislamiento Térmico - Valor "R" para las Envolventes de Vivienda por Zona Térmica para la República Mexicana - Especificaciones y Verificación*. Mexico: ONNCCE.

Raimundo, A. M., Saraiva, N. B., & Oliveira, A. V. (2020). Thermal insulation cost optimality of opaque constructive solutions of buildings under Portuguese temperate climate. *Building and Environment*, 107107.

Romero-Pérez, C. K., Rodríguez-Muñoz, N. A., Alpuche-Cruz, M. G., & Martín-Domínguez, I. R. (2017). Preliminary study of the condition of social housing in the city of Durango, Mexico. *Procedia Engineering*, 29-39.

Roque, E., Vicente, R., & Almeida, R. M. (2021). Opportunities of Light Steel Framing towards thermal comfort in southern European climates: Long-term monitoring and comparison with the heavyweight construction. *Building and Environment*, 107937.

Rosas-Flores, J. A., & Rosas-Flores, D. (2020). Potential energy savings and mitigation emissions by insulation for residential buildings in Mexico. *Energy and Buildings*, 209, 109698. doi:10.1016/j.enbuild.2019.109698

Shahi, D. K., Rijal, H. B., Kayo, G., & Shukuya, M. (2021). Study on wintry comfort temperature and thermal improvement of houses in cold, temperate, and subtropical regions of Nepal. *Building and Environment*, 107569.

Torres-Rodríguez, A., & Morillón-Gálvez, D. (2007). Evaluación del uso de techos verdes en clima templado: Caso Ecatepec de Morelos, Estado de México, México. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 183-190.

Construcción de Índice de Habitabilidad Térmica para Espacios Públicos Exteriores

Francisco Martín del Campo Saray¹

Gonzalo Bojórquez Morales²

Carmen García Gómez³

1 Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez | Unidad Académica El Grullo | Correo: francisco.martindelcampo@elgrullo.tecmm.edu.mx

2 Universidad de Baja California | Unidad Universitaria |
Correo: gonzalobojoquez@uabc.edu.mx

3 Universidad Autónoma de Yucatán | Correo: ggomez@correo.uady.mx

Resumen

Se entiende, que la habitabilidad está inmersa en un proceso cambiante en menor o mayor escala, de ahí la importancia de integrar disciplinas que permitan estudiar a profundidad este concepto, lo cual es susceptible del comportamiento del ser humano ante tal situación descriptiva. En este sentido, como lo señala Saldarriaga (1981) la habitabilidad es un proceso dinámico de interacción, que puede llegar a permitir un nivel permanente de ajuste entre la situación humana y la estructura espacial, esto implica, una transformación permanente. El objetivo de la investigación, fue la construcción de un índice de habitabilidad térmica en espacios públicos exteriores, para ello, se aplicó una metodología no experimental, descriptiva y transversal. El caso de estudio fue en la localidad de El Grullo, Jalisco, que manifiesta un tipo de clima cálido semiseco y se obtuvieron 1,092 cédulas de información de habitante en periodo cálido y frío, donde a su vez, se registraron datos de variables meteorológicas, de habitante y contexto urbano. Los resultados conciben que la sensación térmica tuvo el porcentaje mayor en ambos periodos y que los habitantes de El Grullo, prefieren y toleran más el calor que el frío. El índice obtenido, brinda información de interés a la sociedad y organismos municipales, para planificar de manera mejor una intervención y rescate de espacios públicos o en su defecto, la creación de nuevos espacios que permitan la asistencia y permanencia de usuarios a estos lugares de convivencia.

Palabras clave: Ambiente térmico, Contexto urbano, Índice de habitabilidad.

Abstract

It is understood that habitability is immersed in a changing process on a smaller or larger scale, hence the importance of integrating disciplines that allow an in-depth study of this concept, which is susceptible to human behavior in such a descriptive situation. In this sense, as Saldarriaga (1981) points out, habitability is a dynamic process of interaction, which can allow a permanent level of adjustment between the human situation and the spatial struc-

ture, this implies a permanent transformation. The objective of the research was the construction of a thermal habitability index in outdoor public spaces, for this, a non-experimental, descriptive and cross-sectional methodology was applied. The case study was in the town of El Grullo, Jalisco, which manifests a type of warm semi-dry climate and 1,092 information cards were obtained of inhabitants in hot and cold periods, where in turn, data on meteorological variables were recorded, from inhabitant and urban context. The results conceive that the thermal sensation had the highest percentage in both periods and that the inhabitants of El Grullo prefer and tolerate heat more than cold. The index obtained provides information of interest to society and municipal organizations, to better plan an intervention and rescue of public spaces or, failing that, the creation of new spaces that allow the attendance and permanence of users in these places of coexistence.

Keywords: Thermal environment, Urban context, Habitability index.

Introducción

Se reflexiona, que la habitabilidad de espacios públicos exteriores, es importante para que el ser humano pueda desempeñar sus actividades de una manera apropiada, es decir, que su estancia en un parque público, plaza de la localidad o espacio deportivo sea placentera y le permita obtener beneficios en sentido físico y social, sin importar la edad, ni género; que contribuya con su interacción con el medio ambiente y con personas que asisten a los lugares mencionados.

Borja (2004), ofrece un panorama de la vinculación estrecha entre el espacio público, la ciudad y personas, señala teóricamente sobre los conceptos que fusionan esa interrelación y propone un modelo alternativo: el Urbanismo del lugar público. Que se entiende, como el área pública que lleva a formar redes de intercambio, interacción y negociación, en el contexto de una ciudad, de ahí la importancia de que; se establezca un equilibrio entre el Urbanismo y el espacio público, situación que apremia a sus habitantes y consolida los valores culturales.

Con base en Borja (2004), es básico comprender los componentes de un espacio público exterior, su relación con el contexto urbano y el habitante, donde se entiende, que el grado de habitabilidad térmica presente, condiciona el uso, asistencia y permanencia de personas a estos lugares y les permite obtener un cierto grado de bienestar.

De acuerdo con la literatura revisada sobre el tema en cuestión, se considera importante señalar algunos aspectos que intervienen en el bienestar de los usuarios en espacios públicos exteriores; como son áreas verdes, aceras y banquetas, superficies de rodamiento, mobiliario público y generación de sombras por edificaciones y arbolado. Por lo que a continuación, se analizan algunos estudios realizados en México y que han contribuido con aporte de conocimiento, basado en pruebas científicas.

Bojórquez et al (2017), efectuaron un estudio correlacional bajo criterios de evaluación subjetiva de ISO 10551:1995 y se desarrolló un índice de habitabilidad térmica basado en percepciones cualitativas y cuantitativas. De acuerdo a los resultados obtenidos, se observó

que en caso de la sensación térmica personal, la diferencia entre lo percibido en el momento (sensación térmica) y lo deseado a largo plazo (preferencia térmica), se demuestra con variaciones entre la temperatura neutral media, mientras que, en el caso de la satisfacción del ambiente térmico, permite entender que se acepta la condición de ambiente térmico, pero no se tolera.

Gómez y Ruíz (2006), realizaron un estudio transversal donde presentaron un reporte técnico y buscaron determinar la amplitud de rango del confort térmico para individuos que habitan en clima tropical subhúmedo de la ciudad de Colima, México. En este estudio demostraron que, de acuerdo con los resultados obtenidos, el rango de confort no es semejante a la temperatura de neutralidad, los individuos son participantes activos en el equilibrio que coexiste entre el cuerpo humano y ambiente que lo circunda, por tal situación, la temperatura de confort es un resultado de la interacción entre las personas y ambiente térmico.

Un nicho de oportunidad que se aprecia para realizar la investigación, es que los estudios sobre habitabilidad térmica en México, en términos generales, se han desarrollado en el sector de vivienda y edificaciones, por lo que específicamente la habitabilidad de espacios públicos exteriores se encuentra poco abordada, razón que motivó a realizar el estudio y tener un conocimiento profundo del tema en cuestión.

Por esa razón y con el fin de analizar la propuesta de indicadores, se propuso que el objeto de estudio fuera la localidad de El Grullo, que se ubica en la región Sierra de Amula del Estado de Jalisco, México. Este municipio tiene un clima cálido semiseco, la temperatura máxima promedio es de 35°C, la mínima promedio de 11°C y la temperatura media anual es de 22.3°C, con una precipitación media anual de 900 mm, una altitud de 876 m.s.n.m. y humedad relativa promedio del 35%.

Como dato de referencia, en el año 2016, la estación meteorológica automática de la Sierra de Manantlán II, registró en El Grullo un incremento de 15 días calurosos en el periodo de verano con relación al año 2015, donde se apreció que la temperatura elevada del aire afecta el grado de habitabilidad térmica y puede suscitar riesgos de salud en zonas urbanas. Se piensa que esto, se ha producido por los cambios en la inversión térmica debido a la concentración de aire contaminado en los últimos años, y a su vez, ha ocasionado enfermedades respiratorias y gastrointestinales según datos de la jurisdicción sanitaria del lugar; y se puede especular que estas acciones influyen significativamente al incremento de temperatura climática en los últimos cinco años, con relación al año 2017 (Región Sanitaria VII Municipio de El Grullo, 2015).

De acuerdo con datos de Vargas (2017), la localidad de El Grullo tiene un índice elevado de contaminación atmosférica por la combustión constante de caña de azúcar del ingenio Melchor Ocampo, que es uno de los principales productores en el Estado de Jalisco, donde no existe una regulación ni control de la combustión de las parcelas de caña, a ello se suman los incendios forestales de la región que se registraron en el año 2016 y 2017.

En síntesis, la habitabilidad térmica es determinada por la adecuación y relación del hombre y su entorno; y es referido como la integración que resulta de la capacidad de satisfacer expectativas de desarrollo y necesidades humanas. A continuación, se muestran los textos que se revisaron para conformar el Estado del Arte de la investigación.

Respecto al tema de habitabilidad, García (2016), realizó un estudio sobre el espacio público a través de la Arquitectura, diseño urbano y el arte en la ciudad de Alicante, España, su metodología fue un estudio descriptivo donde abordó el espacio y arte público, estética urbana y paisaje urbano. Como resultado, señaló que el espacio público constituye un área para la difusión, producción y participación artístico-estética, ya que el espacio público define la ciudadanía desde la confluencia entre Arquitectura, diseño, arte y sociedad.

Guardo (2014), investigó en Cartagena, Colombia, la dinámica de espacio público y estableció estrategias de renovación urbana, como resultado, afirmó que no es necesario que un espacio construido tenga las características que lo identifiquen como el espacio para lo cual se proyectó, sino que sea el hecho de que la población así lo considere, lo haga parte de su imaginario urbano, lo acepte como parte de su ciudad, de su entorno, se apropie de él y lo sienta suyo, para que lo use, lo disfrute y lo conserve.

Sobre la aportación de Guardo (2014), se menciona que los individuos requieren de una calidad de espacio para realizar sus actividades cotidianas, pero es necesario que dichos individuos se logren adaptar a ese sitio y logren la optimización de recursos, para que no condicione su funcionamiento y su grado de habitabilidad.

Con relación a habitabilidad urbana, Sosa (2017), analizó la interacción entre la morfología urbana y el microclima, para establecer el grado de confort térmico de áreas de densidad baja en clima árido (Mendoza-Argentina). En dicho estudio se eligieron siete canales viales urbanos (CVU), que se monitorearon micro climáticamente. Los resultados revelaron que el confort térmico en los CVU analizados varió entre un 20 y 70%, mostraron que la combinación entre forestación y huella urbana determina el grado de habitabilidad térmica.

Casals et al (2013), elaboraron un estudio en Cataluña, España, el enfoque utilizado en el trabajo fue de tipo descriptivo en habitabilidad y sociedad, para que en un contexto de sostenibilidad garantice no afectar a las generaciones futuras; como conclusión, se afirmó que la transformación del sistema productivo industrial obstruye los ciclos materiales de recursos hacia un modelo sostenible y se aborda desde las utilidades que satisfacen las necesidades básicas del ser humano.

El enfoque de Casals (2013), aprecia un modelo de desarrollo para una ciudad sustentable donde se respete el medio ambiente, se optimicen recursos energéticos y se aprovechen fuentes renovables, garantías que se brindan a usuarios en espacios de convivencia públicos exteriores donde la productividad en la ciudad resulte exitosa.

Con relación a indicadores urbanos, Páramo et al (2016), en Bogotá, Colombia, estudiaron sobre la habitabilidad en espacios públicos, en su metodología indicaron una propuesta en

ciudades de América Latina, una distribución que constituya indicadores cualitativos y cuantitativos que contribuyan a la apreciación de habitabilidad, su gestión y creación. Como resultado de su evaluación, se propusieron las categorías: movilidad, sostenibilidad ambiental, accesibilidad, dinámicas sociales, gubernamentales, culturales, economía y consumo, servicios, infraestructura, protección y seguridad.

Desde otra perspectiva, Chatzidimitriou et al (2016), presentaron un estudio sobre la influencia de la morfología urbana y los parámetros del diseño urbano como la geometría de la calle y el edificio, elementos del paisaje que incluye tipos de vegetación, superficies de agua, propiedades materiales y sus efectos sobre el confort térmico de los peatones en las ciudades. Los datos proporcionados se basaron en simulaciones que utilizan herramientas computacionales seleccionadas (ENVI-met, RadTherm y Fluent) y se formaron para dos áreas urbanas, un cuadro y un patio.

Se concibe, que el ambiente térmico participa directamente en el nivel de confort de una persona ya sea con actividad pasiva, moderada o intensa, el metabolismo también interviene en el grado de aceptación y tolerancia a una temperatura radiante, así como la influencia que produce la velocidad del viento en un espacio determinado.

Se razona, que el equilibrio que existe entre los elementos urbanos, paisajismo, superficies de rodamiento y pavimentos, genera un efecto de amortiguamiento y disipación de flujo de calor por radiación, conducción y convección que, a su vez, ocasiona un bienestar a los ocupantes de espacios públicos exteriores y participa en su percepción y sensación térmica.

Desarrollo

La idealización de la metodología que se llevó a cabo, permitió registrar, recabar y examinar los datos del fenómeno de análisis, con la comprobación de fuentes consultadas y la postura crítica de las perspectivas teóricas distintas, que auxilian para que el análisis sea objetivo y posea un soporte científico, de validez y fiabilidad.

El diseño de estudio y acorde a condiciones de variables, fue una metodología de tipo descriptiva, no experimental y transversal para la construcción de un Índice de Habitabilidad Térmica (IHT) en espacios públicos exteriores en clima cálido semiseco. Para ello, se requirió de un conjunto de parámetros con el fin de valorar indicadores que determinan el grado de habitabilidad térmica para dichos espacios.

Para fines de la investigación, se propuso utilizar y adecuar la Fórmula de Confort (COMFA) desarrollada por Brown y Gillespie (1995), por el tipo de variables que relacionan al contexto urbano y ambiente térmico; y que definen al estudio realizado.

Para la obtención de habitabilidad térmica se planteó valorar el desempeño de cada indicador en función de su relevancia, complejidad y accesibilidad de información, que corresponde a los espacios públicos exteriores sobre contexto urbano, habitante y ambiente térmico, asimismo, se sugirió una escala de cuatro puntos. Ver tabla.

Tabla 1. Variables de un Índice de Habitabilidad Térmica (IHT).

Fuente: Sosa et al, 2017.

Climáticas	
	Radiación global
	Radiación difusa
	Altitud solar
	Velocidad de viento
Micro climáticas	
	Temperatura del aire
	Humedad relativa
	Temperatura superficial vertical
	Temperatura superficial horizontal
Humana	
	Tasa metabólica
	Aislamiento de la ropa
	Permeabilidad de la ropa
	Temperatura de la piel
	Emisividad
	Albedo de la piel
	Albedo de la ropa
Forestales	
	Permeabilidad
	Rugosidad

A continuación, se muestra la tabla de indicadores propuestos para la construcción del índice de habitabilidad térmica.

Tabla 2. Propuesta de valoración de habitabilidad térmica.

Fuente: Elaboración propia con base en Duarte, 2013.

Escala de habitabilidad térmica		
< 0.25	Habitabilidad	térmica baja
0.25 < 0.50	Habitabilidad	térmica media
0.50 < 0.75	Habitabilidad	térmica moderada
0.75 < 1.0	Habitabilidad	térmica alta

Mencionado lo anterior, la investigación se realizó en la población de El Grullo, Jalisco, que se localiza en la región Sierra de Amula del Estado de Jalisco, México, con una latitud de 19°48'22.80N 104°13'09.29O, colinda al norte con el municipio de Unión de Tula, Ejutla y El Limón; al este con los municipios de El Limón y Tuxcacuesco; al sur con los municipios de Tuxcacuesco y Autlán de Navarro; al oeste con el municipio de Autlán de Navarro y Unión de Tula (Dirección de Monitoreo Ambiental y Cambio Climático, Gobierno del Estado de Jalisco, 2013).

Tabla 3. Indicadores para la construcción de un Índice de Habitabilidad Térmica (IHT).

Fuente: Elaboración propia.

No. de indicadores	Categoría		Nombre del indicador	Unidad de medida del indicador		
1	Ambiente térmico		Temperatura de Bulbo Seco (TBS) promedio de máximas periodo cálido y frío.	°C		
2			TBS promedio de mínimas periodo cálido y frío.	°C		
3			TBS promedio de máximas de SV periodo cálido y frío.	°C		
4			TBS promedio de máximas de SH periodo cálido y frío.	°C		
5			TBS promedio de máximas de SVMP periodo cálido y frío.	°C		
6			Humedad Relativa (HR) promedio de máximas periodo cálido y frío.	%		
7			Velocidad de Viento (VV) promedio periodo cálido y frío.	m/s		
8			Radiación Solar en el Plano Horizontal (RSPH) promedio periodo cálido y frío.	W/m ²		
9			Habitante		Nivel de actividad metabólica.	Met
10	Tempera Neutral (TN) periodo cálido y frío.	°C				
11	Porcentaje de Preferencia Térmica (PT) periodo cálido y frío.	%				
12	Porcentaje de Tolerancia Térmica (TT) periodo cálido y frío.	%				
13	Porcentaje de Aceptación térmica (AT) periodo cálido y frío.	%				
14	Contexto urbano	Huella urbana	Área de vialidades y rodamiento.	m ²		
15	Perfil		Área de andadores, circulación de peatones y no motorizados.	m ²		
16			Calor Antropogénico (CA) promedio generado por vehículos estacionados periodo cálido y frío.	W/m ²		
17			Albedo Urbano (AU) promedio de Áreas Horizontales (AH) periodo cálido y frío.	W/m ²		
18			Área promedio de edificación.	m ²		
19			Altura promedio de edificación.	m		
20			AU promedio de Áreas Verticales (AV) periodo cálido y frío.	W/m ²		
21			Área promedio de copa de árboles.	m ²		
22			Área promedio de sombreado de árboles periodo cálido y frío.	m ²		
23			Permeabilidad Solar (PS) promedio periodo cálido y frío.	%		
24			Mobiliario público		AU promedio de Mobiliario Público (MP) periodo cálido y frío.	W/m ²
25					AV promedio de MP.	m ²



Figura 1. Ubicación de El Grullo, Jalisco.

Fuente: Imagen obtenida de Google Earth.

El muestreo fue seleccionado de forma determinística entre los habitantes del espacio público que cumplieran con el rango de edad entre 12 y 60 años, sin características de enfermedades neurológicas, cardiovasculares, mujeres embarazadas o en periodo de lactancia. Se realizó un total de 1,092 cédulas de información de habitante, 538 en el periodo cálido y 554 en el periodo frío y un total de 196 cédulas de información de ambiente térmico y contexto urbano. Al inicio de esta etapa, primero se tuvo contacto visual con el entrevistado, se saludó de forma amable, se portaba el gafete de apoyo de la investigación y se le preguntó si deseaba colaborar con el estudio, donde se le explicó de forma breve la finalidad y la importancia de su participación, en caso de que el habitante no accediera a colaborar, se le agradecía su sinceridad de respuesta y se le despedía amablemente.

Se utilizaron cédulas de información como instrumentos de recolección de datos, para evaluar condiciones del habitante y cédulas de información para estimar condiciones del ambiente térmico y contexto urbano. Para el diseño de la cédula de información en el rubro de preferencia térmica se realizó conforme a la norma ISO 10551:1995 (Efecto del ambiente térmico con el uso de escalas de juicio subjetivo) y norma ISO 7933:2004 (Estrés térmico con el cálculo de sobrecarga estimada).

Se menciona, que se trabajó en dos sitios de muestreo (Jardín Municipal y Alameda Municipal), los equipos de personal de apoyo permanecieron en el lugar de aplicación la jornada completa (de 07:00 a 20:00 horas), las actividades principales del recurso humano fueron, aplicación de cédulas, manejo de instrumentos de medición y estimación de variables de habitante, ambiente térmico y contexto urbano.

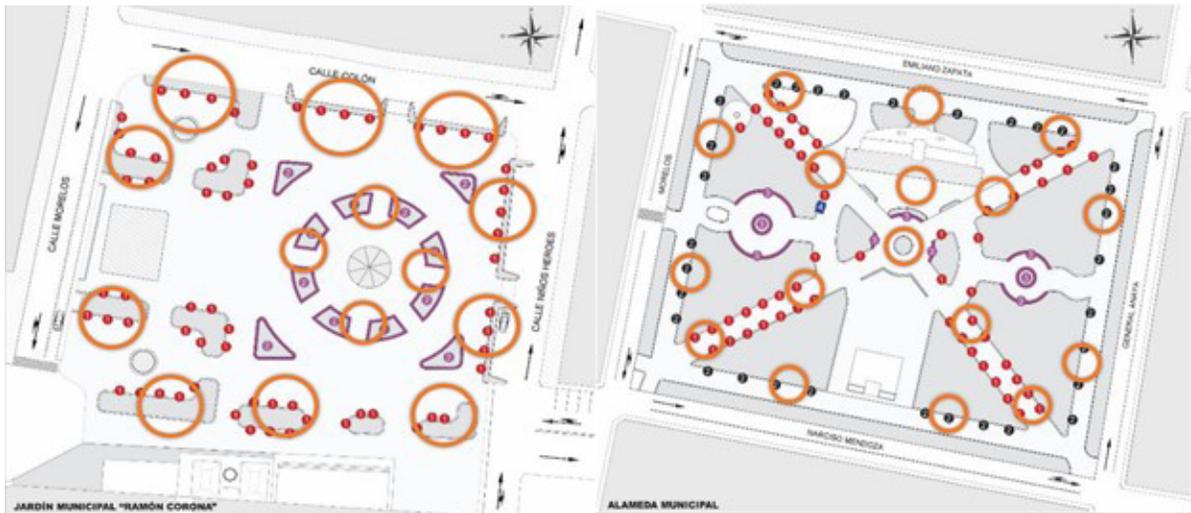


Figura 2. Zonas de muestreo en Jardín Municipal.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Zonas de muestreo en Alameda Municipal.

Fuente: Elaboración propia.

El montaje de los instrumentos de medición (medidor de estrés térmico, psicrómetro digital y anemómetro), se colocaron sobre una base con ménsula de madera a una altura de 1.30 m con respecto al nivel de suelo y el registrador de datos se ubicó en un área representativa del espacio, en horario de 08:00 a 20:00 horas a una altura de 1.30 m del nivel de suelo, según recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (2014), asimismo, se colocaron en zonas que estuvieran libres de árboles y edificios cercanos al punto de medición, no obstante, los instrumentos de medición se colocaron a 2 m de distancia del habitante al momento de la entrevista, con la finalidad de estimar de manera correcta las variables de ambiente térmico.

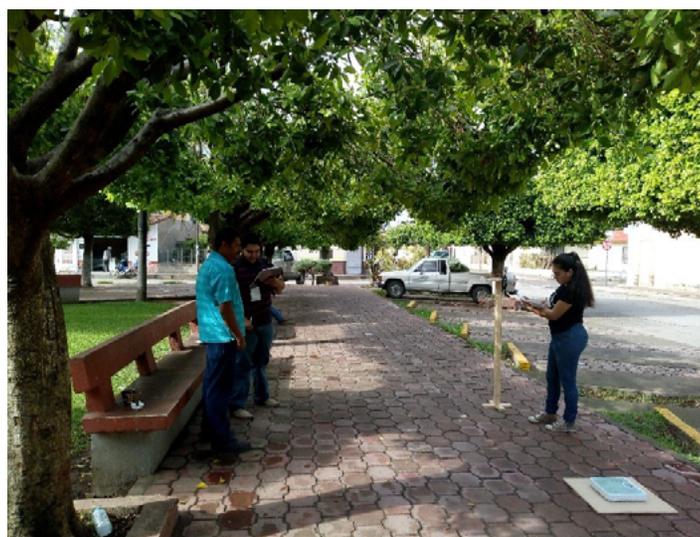


Figura 4. Aplicación de cédulas de información y medición de variables meteorológicas.

Fuente: Elaboración propia.

Los instrumentos utilizados fueron psicrómetro digital EXTECH modelo HT30 (factor de resolución: humedad 0.0 a 100.0%, temperatura del aire (-20 a 50 ° C) (-4.0 a 122.0 ° F), temperatura infrarroja (-20 a 450 ° C) (-4 a 842 ° F), factor de precisión: humedad ($\pm 3\%$ HR) (10 a 90%), temperatura del aire (± 1 ° C) (± 1.8 ° F), temperatura infrarroja ($\pm 3\%$ lecturas o ± 3 ° C / 6 ° F), medidor de estrés térmico marca EXTECH modelo RH401 (resolución de (0.1 ° F / ° C; 0.1% HR), anemómetro digital marca BENETECH modelo GM816 (resolución: 0.1ms, 0.3km / h, 19ft / min, 0.2mph, 0.2Knots) y precisión de ($\pm 5\%$), registrador de datos marca EXTECH modelo RHT10 (factor de precisión: humedad (0 a 20, 20 a 40, 40 a 60, 60 a 80 y 80 a 100%), temperatura (-40 a -10 y +40 a +70 ° C), temperatura del punto de rocío (25 ° C, 40 a 100% HR), báscula marca WEIGHT WATCHERS y flexómetro marca COOPER de la línea Metromex. Ver figura 5.

Para el vaciado de datos, se utilizó el programa de Microsoft Excel y se nombró como archivo BaseDatosÍndiceHabitabilidadTérmica, se capacitó al personal de apoyo y se buscó que los equipos que capturaran datos no fueran los mismos folios de las cédulas que habían aplicado, de esta manera, un integrante leía y cifraba la cédula y el otro escribía los datos, una vez vaciada la información, se trasladaba al programa estadístico SPSS.



Figura 5. Vista de instrumentos de medición.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis se hizo con la regresión lineal múltiple entre variables meteorológicas y ordinales, para obtener el grado de asociación e inferencia de las variables involucradas.

Con base en literatura analizada que compete al rubro, lo señalado anteriormente y la opinión de investigadores expertos, se muestra la tabla con los 25 indicadores propuestos para la construcción del Índice de Habitabilidad Térmica y se les asigna un peso específico:

Tabla 4. Peso de indicadores para la construcción de un Índice de Habitabilidad Térmica en espacios públicos exteriores.

Fuente: Elaboración propia.

Categoría	Nombre del indicador	Unidad de medida del indicador	Peso del indicador	Porcentaje del total de índice	
Ambiente térmico	Temperatura de bulbo seco promedio de máximas periodo cálido y frío	°C	5.00	40%	
	Temperatura de bulbo seco promedio de mínimas periodo cálido y frío	°C	5.00		
	Temperatura de bulbo seco promedio de máximas de superficies verticales periodo cálido y frío	°C	5.00	35%	
	Temperatura de bulbo seco promedio de máximas de superficies horizontales periodo cálido y frío	°C	5.00		
	Temperatura de bulbo seco promedio de máximas de superficies verticales de mobiliario público periodo cálido y frío	°C	5.00		
	Humedad relativa promedio de máximas periodo cálido y frío	%	5.00		
	Velocidad de viento promedio periodo cálido y frío	m/s	5.00		
	Radiación solar en el plano horizontal promedio periodo cálido y frío	m/s	5.00		
Habitante	Nivel de actividad metabólica	Met y clo	5.00	25%	
	Temperatura neutral	°C	5.00		
	Porcentaje de preferencia térmica periodo cálido y frío	%	5.00		
	Porcentaje de tolerancia térmica periodo cálido y frío	%	5.00		
	Porcentaje de aceptación térmica periodo cálido y frío	%	5.00		
Contexto urbano	Huella urbana	Área de vialidades y rodamiento	m ²	2.90	35%
		Área de andadores, circulación de peatones y vehículos no motorizados	m ²	2.90	
		Calor antropogénico promedio generado por vehículos estacionados periodo cálido y frío	W/m ²	2.90	
		Albedo urbano promedio de áreas horizontales periodo cálido y frío	W/m ²	2.90	
	Perfil	Área promedio de edificación	m ²	2.90	
		Altura promedio de edificación	m	2.90	
		Albedo urbano promedio de áreas verticales periodo cálido y frío	W/m ²	2.90	
	Vegetación	Área promedio de copa de árboles	m ²	2.90	
		Área promedio de sombreado y de árboles periodo cálido y frío	m ²	2.90	
		Permeabilidad solar promedio periodo cálido y frío	%	2.90	
	Mobiliario público	Albedo urbano promedio de mobiliario público periodo cálido y frío	W/m ²	2.90	
		Áreas verticales promedio de mobiliario público	m ²	2.90	

Resultados

Como se describió en el apartado de metodología, la aplicación del estudio se llevó a cabo en la localidad de El Grullo, Jalisco, en dos periodos cálido y frío, se analizaron las variables de ambiente térmico, de habitante y de contexto urbano; y solo se presenta parte de los resultados por medio de tablas de correlación de Spearman entre variables meteorológicas y variables ordinales, todo ello, por los fines de síntesis y reglas de la Universidad receptora para la conformación del manuscrito.

La tabla 5, refiere el grado de correlación lineal de Spearman entre la Sensación Térmica (ST) y variables de ambiente térmico, donde se apreció que la VV tuvo una correlación perfecta con la variable ordinal.

Tabla 5. Peso de indicadores para la construcción de un Índice de Habitabilidad Térmica en espacios públicos exteriores.

Fuente: Elaboración propia.

			Temperatura de bulbo seco	Humedad relativa	Velocidad de viento	Sensación térmica del habitante
Rho de Spearman	Temperatura de bulbo seco	Coefficiente de correlación	1,000	-.463**	.033	.397**
		Sig. (bilateral)	.	.000	.439	.000
		N	538	538	538	538
	Humedad relativa	Coefficiente de correlación	-.463**	1,000	-.087*	-.519**
		Sig. (bilateral)	.000	.	.044	.000
		N	538	538	538	538
	Velocidad de viento	Coefficiente de correlación	.033	-.087*	1,000	-.002
		Sig. (bilateral)	.439	.044	.	.961
		N	538	538	538	538
	Sensación térmica del habitante	Coefficiente de correlación	.397**	-.519**	-.002	1,000
		Sig. (bilateral)	.000	.000	.961	.
		N	538	538	538	538

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Con relación a la Preferencia Térmica (PT), la variable de TBS y HR no presentaron grado de asociación, en cambio la variable de VV mostró un nivel de asociación débil en esta categoría. Ver tabla 6.

Tabla 6. Correlación de Spearman entre variables de ambiente térmico y PT periodo cálido.

Fuente: Elaboración propia.

			Temperatura de bulbo seco	Humedad relativa	Velocidad de viento	Preferencia térmica del habitante
Rho de Spearman	Temperatura de bulbo seco	Coefficiente de correlación	1,000	-.463**	.033	-.294**
		Sig. (bilateral)	.	.000	.439	.000
		N	538	538	538	538
	Humedad relativa	Coefficiente de correlación	-.463**	1,000	-.087*	.353**
		Sig. (bilateral)	.000	.	.044	.000
		N	538	538	538	538
	Velocidad de viento	Coefficiente de correlación	.033	-.087*	1,000	-.038
		Sig. (bilateral)	.439	.044	.	.384
		N	538	538	538	538
	Preferencia térmica del habitante	Coefficiente de correlación	-.294**	.353**	-.038	1,000
		Sig. (bilateral)	.000	.000	.384	.
		N	538	538	538	538

En lo que concierne a la Tolerancia Térmica (TT), tanto la TBS como la HR no asociaron ningún valor determinístico con la variable ordinal, a diferencia de la VV que presentó un nivel de asociación débil. Ver tabla 7.

Tabla 7. Correlación de Spearman entre variables de ambiente térmico y TT periodo cálido.

Fuente: Elaboración propia.

			Temperatura de bulbo seco	Humedad relativa	Velocidad de viento	Tolerancia térmica del habitante
Rho de Spearman	Temperatura de bulbo seco	Coefficiente de correlación	1,000	-.463**	.033	-.262**
		Sig. (bilateral)	.	.000	.439	.000
		N	538	538	538	538
	Humedad relativa	Coefficiente de correlación	-.463**	1,000	-.087*	.267**
		Sig. (bilateral)	.000	.	.044	.000
		N	538	538	538	538
	Velocidad de viento	Coefficiente de correlación	.033	-.087*	1,000	.049
		Sig. (bilateral)	.439	.044	.	.259
		N	538	538	538	538
	Tolerancia térmica del habitante	Coefficiente de correlación	-.262**	.267**	.049	1,000
		Sig. (bilateral)	.000	.000	.259	.
		N	538	538	538	538

Sobre la Aceptación térmica (AT), no existió un grado de asociación con las variables de TBS y HR, a diferencia de la VV que mostró un nivel débil. Ver tabla 8.

Tabla 8. Correlación de Spearman entre variables de ambiente térmico y PT periodo cálido.

Fuente: Elaboración propia.

			Temperatura de bulbo seco	Humedad relativa	Velocidad de viento	Aceptación térmica del habitante
Rho de Spearman	Temperatura de bulbo seco	Coefficiente de correlación	1,000	-.463**	.033	-.294**
		Sig. (bilateral)	.	.000	.439	.000
		N	538	538	538	538
	Humedad relativa	Coefficiente de correlación	-.463**	1,000	-.087*	.264**
		Sig. (bilateral)	.000	.	.044	.000
		N	538	538	538	538
	Velocidad de viento	Coefficiente de correlación	.033	-.087*	1,000	.043
		Sig. (bilateral)	.439	.044	.	.318
		N	538	538	538	538
	Aceptación térmica del habitante	Coefficiente de correlación	-.294**	.264**	.043	1,000
		Sig. (bilateral)	.000	.000	.318	.
		N	538	538	538	538

En lo que concierne a la correlación de Spearman en el periodo frío, se presentó el grado de correlación lineal entre la ST y variables de ambiente térmico, donde se muestra que solo la VV presentó nivel de asociación muy débil. Ver tabla 9.

Tabla 9. Correlación de Spearman entre variables de ambiente térmico y PT periodo cálido.

Fuente: Elaboración propia.

			Temperatura de bulbo seco	Humedad relativa	Velocidad de viento	Sensación térmica del habitante
Rho de Spearman	Temperatura de bulbo seco	Coefficiente de correlación	1,000	-.610**	.086*	.502**
		Sig. (bilateral)	.	.000	.044	.000
		N	554	554	554	554
	Humedad relativa	Coefficiente de correlación	-.610**	1,000	-.122**	-.460**
		Sig. (bilateral)	.000	.	.004	.000
		N	554	554	554	554
	Velocidad de viento	Coefficiente de correlación	.086*	-.122**	1,000	.068
		Sig. (bilateral)	.044	.004	.	.108
		N	554	554	554	554
	Sensación térmica del habitante	Coefficiente de correlación	.502**	-.460**	.068	1,000
		Sig. (bilateral)	.000	.000	.108	.
		N	554	554	554	554

Para la PT, se muestra que solo la variable de VV presentó una asociación en nivel muy débil, con respecto a la TBS y HR, no existió ninguna asociación. Ver tabla 10.

Tabla 10. Correlación de Spearman entre variables de ambiente térmico y PT periodo frío.

Fuente: Elaboración propia.

			Temperatura de bulbo seco	Humedad relativa	Velocidad de viento	Preferencia térmica del habitante
Rho de Spearman	Temperatura de bulbo seco	Coefficiente de correlación	1,000	-.610**	.086*	-.392**
		Sig. (bilateral)	.	.000	.044	.000
		N	554	554	554	554
	Humedad relativa	Coefficiente de correlación	-.610**	1,000	-.122**	.416**
		Sig. (bilateral)	.000	.	.004	.000
		N	554	554	554	554
	Velocidad de viento	Coefficiente de correlación	.086*	-.122**	1,000	-.057
		Sig. (bilateral)	.044	.004	.	.179
		N	554	554	554	554
	Preferencia térmica del habitante	Coefficiente de correlación	-.392**	.416**	-.057	1,000
		Sig. (bilateral)	.000	.000	.179	.
		N	554	554	554	554

Con relación a la TT, ésta presentó asociación con todas las variables meteorológicas en el nivel de débil para la VV, muy débil la HR y nulo para la TBS. Ver tabla 11.

Tabla 11. Correlación de Spearman entre variables de ambiente térmico y TT periodo frío.

Fuente: Elaboración propia.

			Temperatura de bulbo seco	Humedad relativa	Velocidad de viento	Tolerancia térmica del habitante
Rho de Spearman	Temperatura de bulbo seco	Coefficiente de correlación	1,000	-.610**	.086*	.090*
		Sig. (bilateral)	.	.000	.044	.035
		N	554	554	554	554
	Humedad relativa	Coefficiente de correlación	-.610**	1,000	-.122**	-.057
		Sig. (bilateral)	.000	.	.004	.181
		N	554	554	554	554
	Velocidad de viento	Coefficiente de correlación	.086*	-.122**	1,000	.037
		Sig. (bilateral)	.044	.004	.	.391
		N	554	554	554	554
	Tolerancia térmica del habitante	Coefficiente de correlación	.090*	-.057	.037	1,000
		Sig. (bilateral)	.035	.181	.391	.
		N	554	554	554	554

Y finalmente, con respecto a la AT, se muestra el nivel de asociación con las variables meteorológicas, donde la VV tuvo el nivel de moderado, la HR presentó nivel de débil y la TBS correspondió al nivel de muy débil. Ver tabla 12.

Tabla 12. Correlación de Spearman entre variables de ambiente térmico y AT periodo frío.

Fuente: Elaboración propia.

			Temperatura de bulbo seco	Humedad relativa	Velocidad de viento	Aceptación térmica del habitante
Rho de Spearman	Temperatura de bulbo seco	Coefficiente de correlación	1,000	-.610**	.086*	.105*
		Sig. (bilateral)	.	.000	.044	.014
		N	554	554	554	554
	Humedad relativa	Coefficiente de correlación	-.610**	1,000	-.122**	-.087*
		Sig. (bilateral)	.000	.	.004	.042
		N	554	554	554	554
	Velocidad de viento	Coefficiente de correlación	.086*	-.122**	1,000	.025
		Sig. (bilateral)	.044	.004	.	.562
		N	554	554	554	554
	Aceptación térmica del habitante	Coefficiente de correlación	.105*	-.087*	.025	1,000
		Sig. (bilateral)	.014	.042	.562	.
		N	554	554	554	554

Discusión

La evaluación de datos para la construcción de un índice resulta ser necesaria, ya que permite apreciar el margen de error entre los datos teóricos obtenidos de fuentes especializadas y los registrados en campo, de esta manera la investigación posee mayor certeza y confiabilidad en los resultados que se presentan y permite al interesado asegurar la utilidad del índice de espacios públicos exteriores en cualquier lugar de aplicación, sin importar las condiciones meteorológicas y de sitio que se tengan.

Con base en los resultados obtenidos, se determina que la construcción del IHT contribuye a la relación y adaptabilidad entre el hombre y su entorno, y es referido a la integración que resulta de la capacidad de satisfacción humana y sus expectativas de desarrollo y convivencia en un espacio público exterior. Por otro lado, la sensación de confort térmico puede ser afectada por el nivel de actividad que desempeña una persona, así como su nivel de arropamiento en función del entorno ambiental, no obstante, esto deriva del interés de valorar y modificar un ambiente térmico.

En lo que respecta al análisis de datos de la investigación, se utilizó la regresión lineal múltiple con las variables meteorológicas en el periodo cálido y frío (temperatura de bulbo seco promedio de máximas, temperatura de bulbo seco promedio de mínimas, temperatura de bulbo seco promedio de máximas de superficies verticales, temperatura de bulbo seco promedio de máximas de superficies horizontales, temperatura de bulbo seco promedio de máximas de superficies verticales de mobiliario público, humedad relativa promedio de máximas, velocidad de viento promedio y las variables ordinales (porcentaje de sensación, preferencia, tolerancia y aceptación térmica).

Los indicadores de ambiente térmico y habitante se recomiendan ampliamente para la utilidad del índice de habitabilidad térmica en espacios exteriores, sin embargo, algunos indica-

dores de contexto urbano no resultaron ser trascendentes en este estudio, por no producir un efecto importante de habitabilidad térmica en el habitante, y a su vez, complican la operatividad y utilidad del índice, estos son el indicador número 14 (área de vialidades y rodamiento), el número 15 (área de andadores, circulación de peatones y no motorizados), el número 16 (calor antropogénico promedio generado por vehículos estacionados) y el número 18 (área promedio de edificación).

Conclusiones

En cuanto a la sensación térmica, se apreció que la escala (ni calor ni frío) tuvo el porcentaje mayor en ambos periodos, no obstante, se observó que la escala de (mucho calor) en el periodo cálido, presentó una diferencia de 7 puntos con relación a la escala de (mucho frío) en el periodo frío.

Con relación a la preferencia térmica, se observó que la escala (más frío) en el periodo cálido y (sin cambio) en el periodo frío, fue prácticamente el mismo porcentaje de las respuestas de los habitantes.

Los resultados de la tolerancia térmica, manifestaron que la escala (tolerable), fue la elegida por los encuestados en ambos periodos y solo tuvieron una diferencia de cinco puntos en esta referencia.

Sobre la aceptación térmica, se aprecia que la escala (aceptable), fue la de número mayor de respuestas de los habitantes para los dos periodos, sin embargo, se distinguió un porcentaje mayor en este rubro para el periodo frío.

Las variables de ambiente térmico, según valores obtenidos de la correlación de Spearman para la construcción del índice, reflejaron ser las de asociación lineal mayor e influencia, por su repercusión en la evaluación del habitante en su nivel de sensación (0.020 r²), preferencia (0.038 r²), tolerancia (0.049 r²) y aceptación térmica (0.043 r²) para el periodo cálido, y en su nivel de sensación (0.068 r²), preferencia (0.057 r²), tolerancia (0.037 r²) y aceptación térmica (0.025 r²) para el periodo frío.

Mencionado lo anterior, los registros marcan que la preferencia y sensación térmica fueron de nivel débil en el periodo cálido y de nivel moderado en el periodo frío, no obstante, la tolerancia y aceptación térmica tuvieron diferencias de 1 y 2 puntos respectivamente en ambos periodos, donde los habitantes describieron que aceptan y toleran más el calor que el frío.

Otro dato de la correlación de Spearman es que, la variable de velocidad de viento (VV), tuvo asociación significativa bilateral mayor con todas las variables ordinales en ambos periodos, la humedad relativa y la temperatura de bulbo seco asumieron asociación significativa bilateral en la aceptación y tolerancia térmica solo para el periodo frío.

Por consiguiente, la valoración de datos para la construcción de un índice resulta ser esencial, donde el margen de error que existe con los resultados de datos teóricos y los registrados

en campo deben ser mínimos, para tener la seguridad de la utilidad del índice donde resulte operativo, confiable, útil y extrapolable.

Referencia y Bibliografía

Bojórquez, G. e. (2017). Índice de habitabilidad térmica para la vivienda. Coloquio Internacional de las Culturas del Desierto, 1-19.

Borja, J., & Muxí, Z. (2004). Urbanismo en el siglo XXI: una visión crítica: Bilbao, Madrid, Valencia, Barcelona (Vol. 30). Univ. Politèc. de Catalunya.

Brown, R. D., & Gillespie, T. J. (1995). Microclimatic landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency. Wiley.

Casals, M. e. (2013). Aproximación a una habitabilidad articulada desde la sostenibilidad. Raíces teóricas y caminos por andar. Revista INVI, 28(77), 193-226.

Chatzidimitriou, A. Y. (2016). Microclimate design for open spaces: Ranking urban design effects on pedestrian thermal comfort in summer. Sustainable Cities and Society, 26, 27-47.

Dirección de Monitoreo Ambiental y Cambio Climático (2013). Gobierno del Estado de Jalisco.

Duarte, A. F. C. (2013). Contaminación difusa originada por la actividad agrícola de riego, a la escala de la cuenca hidrográfica. Contaminación difusa originada por la actividad agrícola de riego, a la escala de la cuenca hidrográfica.

García, I. C. (2016). Diseño metodológico para la habitabilidad urbana desde los espacios públicos de estancia. 2-25.

Gómez, L. e. (2006). Determinación de la amplitud del rango de confort térmico preferente para las personas que habitan en clima tropical sub-húmedo. Caso: Ciudad de Colima, México. Reporte Técnico Final., Universidad de Colima, México., Colima. México.

Guardo, G. (2014). Espacio público en Cartagena: una mirada más allá del espacio construido. Revista Méthodos, 12, 36-44.

International Organization for Standardization. (1995). ISO 10551: 1995. Ergonomics of the thermal environment–Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales.

ISO, U. (2005). 7933: 2004. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del estrés térmico mediante el cálculo de la sobrecarga térmica estimada.

Organización Meteorológica Mundial. (2014). Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos. Tiempo-Clima-Agua. OMM, Ginebra, Suiza.

Páramo, P. B. (2016). Estructura de indicadores de habitabilidad del espacio público en ciudades latinoamericanas. Revista de Arquitectura, 18(2), 1-26.

Región Sanitaria VII Municipio de El Grullo, Jalisco. (2015). Hoja diaria de consulta externa. Población proyección CONAPO.

Saldarriaga Roa, A. (1981). Habitabilidad. Bogotá: ESCALA.

Sosa, M. e. (2017). Influencia de la morfología urbana sobre la habitabilidad térmica exterior en una ciudad de clima árido. Revista Hábitat Sustentable, 7(1), 44-53.

Vargas, M. (08 de mayo de 2017). Reserva de la Biosfera reconoce trabajo de brigadistas forestales. Obtenido de Letra Fría: <http://letrafria.com/17990-2/>

Desempeño Bioclimático de una Escuela de Carlos Leduc en Clima Cálido Sub-Húmedo

Adolfo Gómez-Amador¹

Gabriel Gómez-Azpeitia²

Felipe Espinosa Chávez³

1 Universidad de Colima

2 Universidad de Colima

3 Escuela Normal Superior de Especialidades Jalisco

Resumen

Se presentan los resultados de una investigación relacionada con las condiciones de confort de un aula representativa en una escuela edificada en 1944. El diseño de esta escuela estuvo a cargo de Carlos Leduc Montaña. Leduc fue parte de una corriente de arquitectos latinoamericanos que ponderaron el desempeño ambiental como un aspecto crucial, particularmente en condiciones de clima cálido y húmedo. Se comparan los resultados del aula seleccionada con los de un aula de referencia de una extensión de la escuela construida a finales de los años 70. La investigación consistió en la toma de datos de velocidad de viento y temperatura durante un fin de semana mientras la escuela no tuvo actividad. Los datos de velocidad del viento y temperatura se combinaron para obtener la sensación de temperatura sobre la piel debido al movimiento del aire. Los resultados se procesaron para focalizar la comparación en el horario de actividad de la escuela. Hecha la consideración de que solo opera el turno matutino. Los resultados muestran una notable diferencia entre las dos aulas. Con ligeras modificaciones en el transcurso de la mañana, es cercana a 4° K.

Abstract

The results of a study related to the comfort conditions of a representative classroom, in a school built in 1944, are presented. The design of this school was carried out by Carlos Leduc Montaña. Leduc was part of a Latin American trend of architects who weighed environmental performance as a main feature of the building. This particularly in hot humid weather conditions. The results of the selected classroom are compared with those of a reference classroom. The reference classroom corresponds to an extension of the school built in the late 1970s. The research consisted of collecting data on wind speed and temperature. This was done for a weekend, while the school was not active. The data of wind speed and temperature were combined to obtain the sensation of temperature on the skin, due to the movement of the air. The results were processed to focus the comparison on the school's activity hours. Made the consideration that he only works the morning period. These results

show a significant difference between the two classrooms. With slight modifications in the course of the morning, it is close to 4° K.

Introducción

En los edificios destinados a la educación, se tiene la responsabilidad de proveer al usuario de las condiciones óptimas para que se genere el aprendizaje. En los países de economías emergentes, con climas cálidos y húmedos, las escuelas no cuentan con las mejores condiciones para el aprendizaje. La didáctica ha tenido importantes avances en la investigación, una visión muy importante a tomar en cuenta es la de Robert Marzano (1997), quien señala que una de las primeras cosas que observa el estudiante es el clima del ambiente de aprendizaje, especialmente si el salón es: seguro, cómodo y ordenado y tiene un tono afectivo relativamente agradable. De manera específica, considera que si el estudiante está incómodo se logrará poco aprendizaje.

Los pedagogos han identificado al ambiente como uno de los factores que pueden incidir en el aprendizaje dentro de la primera de cuatro dimensiones del aprendizaje, Marzano considera la comodidad, de la cual el confort termofisiológico, la distribución, el mobiliario y el vestido son esenciales. Por diversos motivos la arquitectura escolar representó un área vital de la arquitectura moderna (García García, 2013). Entre los años 30s y 50s en América Latina se produjo un importante movimiento en consonancia con la modernidad emergente para producir edificios escolares más funcionales que ponen su apuesta en la sinceridad estructural y su aprecio por el detalle constructivo en respuesta a las solicitudes medioambientales del entorno (Bosch Espelta, 2013). Antes de que se acuñara el concepto de arquitectura bioclimática, en América Latina particularmente era de interés la protección de la radiación directa en ventanas y facilitar la ventilación cruzada (Mantovani Genari, 2013)

Desempeño de los espacios educativos. Antecedentes técnicos

Después de la vivienda, los espacios educativos y de salud son los más estudiados en relación al desempeño energético y ambiental. Pensar en la sostenibilidad implica el impacto de las acciones en el tiempo y en el espacio. El diseño comprometido con el medio ambiente fundamenta la toma de decisiones en la premisa del impacto, en el entorno y en el sujeto. De los diversos géneros de edificios, los de la educación son de los que quizá tiene mayores consecuencias espaciotemporales en los ocupantes.

Los principales aspectos estudiados en los edificios escolares, son el ambiente interior y la eficiencia energética. En la primera categoría se cuentan los relacionados con el desempeño escolar 27%, el desempeño térmico 20% y los medios de control cubren 17%. En el tema de la eficiencia energética, los indicadores ocupan la mayor atención con un 17%, el confort interior y los dispositivos de control ocupan un 10% cada uno. Estos datos corresponden a un universo de 30 estudios publicados entre 2003 y 2020.

De los estudios revisados, 14 se localizan en países desarrollados y 16 en economías emergentes. Llama la atención un cierto determinismo geográfico económico. En las economías

más avanzadas de estos trabajos 4 son relativos al ambiente interior, y 10 a la eficiencia energética. De las llamadas economías emergentes, 15 trabajos son relativos al ambiente interior y sólo uno a la eficiencia energética. En países como Chile, Brasil, México, Colombia, Irán, China, Indonesia, Jordania y Nigeria predominan los edificios escolares basados en la ventilación natural. En ese sentido la principal preocupación es el sujeto y las condiciones de habitabilidad de los espacios. Hay que considerar adicionalmente que la mayor parte de los países mencionados quedan comprendidos dentro de zona intertropical. En ese sentido, cuando se habla de ventilación natural, además de ser una opción que excluye el uso del aire acondicionado, es un medio fundamental para disipar el calor. Esto considerando que el principal problema a resolver es el sobrecalentamiento de los espacios.

En cambio en países como Reino Unido, Holanda, Finlandia, Bélgica, Italia, Francia, el confort se da por descontado pues, cuando se requiere, los edificios escolares operan con aire acondicionado. Por ello la preocupación fundamental es el consumo de energía que impacta en el entorno a partir del calentamiento global. Los principales instrumentos de estas investigaciones son el estudio de alternativas a partir de modelos matemáticos (Cigler, Tomás'ko, & S'iroky', 2013), simulación de desempeño térmico y consumo de energía (Zeiler & Waard, 2012), (Wang, y otros, 2015), o de ciclo de vida de los materiales (Salvalai, Malighetti, Luchini, & Girola), (Brás & Gomes, 2015).

Las investigaciones de las economías emergentes incluyen más trabajos a los métodos cualitativos: 37% de los trabajos incluyen exclusivamente este enfoque a diferencia de las economías consolidadas que representan el 14% de los trabajos. No resulta extraña la inclusión de los enfoques cualitativos tratándose de edificios relacionados con la educación, en donde la valoración subjetiva es un aspecto importante en el desarrollo de la generación de conocimiento y sobre todo de conciencia.

Para caracterizar diversos aspectos relacionados con el caso de estudio que se propone consideramos su entorno, su naturaleza específica y el problema principal. El entorno es el de su condición de escuela rural. Su naturaleza es que se trata de estudio de caso a partir del reconocimiento de su autor. Y como parte del problema principal implica identificar la tarea de control. Respecto al medio rural se identificaron y analizaron trabajos de los que se desprende que las arquitecturas tradicionales de la localidad pueden proveer algunas soluciones factibles de reinterpretar en arquitecturas contemporáneas adecuadas al lugar y con principios bioclimáticos que tengan un mejor desempeño que las soluciones totalmente vernáculas y sobre todo adaptadas a las necesidades de la pedagogía contemporánea.

El trabajo de Trebilcock y otros (2012), compara el desempeño de dos escuelas rurales ubicadas en un área con una importante población indígena en Chile. En ese estudio se analiza el desempeño de dos escuelas, una basada en tradiciones constructivas y otra con principios bioclimáticos. Desde el punto de vista exclusivo del desempeño higro térmico resulta más adecuada la realizada con esos objetivos. Ghita y Tiberiu (2015), realizaron una investigación detallada sobre tres tipos diferentes de escuelas rurales relativamente cercanas: una antigua en su estado original, otra renovada y una reciente. El factor de comparación fue la condición

de los edificios, la eficiencia energética y la calidad ambiental en interiores. Los resultados mostraron que el alto consumo de energía no resulta necesariamente en mejores condiciones de confort. Zhu y Wang (2015), analizan cómo el enfoque de diseño bioclimático podría proporcionar a la escuela primaria, en estos entornos, un buen ambiente de aprendizaje y lograr al mismo tiempo eficiencia energética y de costos. Se cree que los edificios vernáculos se adaptan muy bien a las condiciones climáticas específicas mediante el uso de formas tradicionales. Presentan una sección bioclimática potencial para el prototipo de escuela primaria de la zona aprovechando los recursos disponibles y las técnicas de construcción, en lugar de utilizar tecnología costosa para lograr un buen entorno de aprendizaje.

Respecto a los estudios de caso, se encontraron trabajos paradigmáticos que generaron tendencia en el diseño de edificios del género escolar, particularmente en los años 40s y 50s del siglo XX, como la arquitectura escolar de Luis G. Rivadeneyra Falcó en México y de Oscar Niemeyer en Brasil. En el caso mexicano, Miranda Zacarías & Winfield Reyes (2013) analizan el trabajo realizado en el estado de Veracruz en el periodo 1944-1952 por Rivadeneyra, quien propuso un estándar nacional para los edificios escolares que a la postre, y con la colaboración de otros arquitectos, se convertiría en el modelo conocido como CAPFCE¹. En el caso brasileño, Mantovani Genari (2013) estudia específicamente la Escuela Júlia Kubitschek en Diamantina, Minas Gerais, obra de Niemeyer. El trabajo consiste en una descripción de características formales del edificio y su ponderación funcional, particularmente de los elementos de protección de la radiación directa en ventanas y los medios para facilitar la ventilación cruzada. Tanto en el caso mexicano como en el brasileño, propiciar la ventilación y evitar la radiación fueron requerimientos prioritarios. Es importante señalar que, además de que las obras analizadas corresponden a la época de nuestro caso de estudio, tanto la latitud donde se ubica el estado de Veracruz (entre 22° 28' y 17° 09' Norte), como la de la ciudad de Diamantina (18° 14' Sur), son semejantes a la latitud del estado de Colima (entre 19° 31' y 18° 41' Norte), lo que sugiere similitud en el clima y por lo tanto la aplicabilidad de las estrategias de climatización empleadas por Rivadeneyra y Niemeyer.

Para caracterizar del problema de los espacios educativos debemos primero identificar el requerimiento principal. Independientemente del lugar en que se encuentren los edificios educativos, se enfrentan, aparte de la radiación, al calor producido por el metabolismo humano de los ocupantes, por lo regular muchos. La mejor forma, según algunos estudios, de disipar el calor metabólico, es por medio de la ventilación cruzada. El trabajo Confort térmico en el aula: limitaciones y problemas expone algunos aspectos del debate en el campo del confort térmico en edificios con ventilación natural ubicados en climas cálidos y húmedos (Puteh, y otros, 2012). Queda claro que en una escuela rural, en un contexto latinoamericano y clima cálido húmedo, el papel de la ventilación es relevante. Sin embargo, la pregunta crucial es ¿cuál es el mecanismo apropiado para proveerla? Algunos estudios proponen sistemas automáticos de apertura y cierre de ventanas. Stazi y otros (2017), analizan la posibilidad de mejorar el desempeño de un espacio a partir de la ventilación relevando al usuario de la ope-

1 Siglas del Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas, donde se gestó el prototipo con que se construyeron las aulas en México desde 1960 hasta 2008.

ración de las ventanas con un sistema automatizado de control. Los principales resultados muestran que el sistema mecanizado asegura una buena calidad en términos de calidad del aire y confort térmico.

Los estudios comparativos de distintos mecanismos aportan suficiente información de algunas respuestas y posibles mejoras para el desarrollo de estrategias de ventilación adecuadas para escuelas. Se probaron cuatro modos de ventilación natural y mixta en las aulas de la Universidad de La Rochelle. En este estudio se concluye que el sistema de ventilación natural por ventanas de apertura automatizada, controlado por la detección de presencia y parámetros térmicos, tiene el mejor desempeño (Dhalluin). Aunque los sistemas mecanizados son una mejor solución para propiciar la ventilación Sur-Oeste es una solución pertinente en nuestro contexto.

En el estudio Evaluación de las condiciones de confort térmico en un aula con tres métodos de ventilación (Fong, Lin, Fong, Chow, & Yao, 2011), se comparó ventilación mixta, ventilación cruzada y ventilación forzada. Los resultados indican que la ventilación cruzada podría proporcionar un nivel de confort térmico satisfactorio a espacios interiores con temperatura de hasta 27°C. El ahorro de energía atribuible a una menor carga de ventilación en comparación con la ventilación mixta y la ventilación forzada.

Antecedentes del caso de estudio

A pesar de tener en México, una amplia diversidad de climas, el diseño y la construcción de edificios públicos ha sido estandarizada en todo el país. Los edificios destinados a la educación no cuentan con aire acondicionado pero tampoco están diseñadas para las condiciones climáticas específicas de cada localidad. Aunque los edificios públicos hospitalarios y escolares son los que mayor atención reciben por parte del estado, y que cuentan con normatividad específica, pero aun en esta situación la normatividad se orienta a aspectos orientados en primer lugar a la seguridad estructural.

En 1944 se creó el Comité de Administración del Programa Federal de Construcción de Escuelas (CAPFCE). Éste condujo, entre 1953 y 1996, a un gran avance en la provisión de infraestructura (Velasco, 2011), pero de acuerdo a algunas posiciones teóricas de la docencia, se sacrificó la funcionalidad de los edificios y en última instancia el aprendizaje de los estudiantes resultó afectado. A partir de 2008 el organismo original fue substituido por otro denominado Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED), el cual a su vez quedó liquidado en 2019. Con el INIFED la construcción de escuelas se descentralizó, pero el diseño no logró avanzar en la adecuación a las condiciones de las localidades y de las regiones climáticas. Actualmente, las tareas de construcción, reparación y remodelación de escuelas han sido delegadas a las comunidades directamente beneficiarias, sin que al momento se tenga un análisis de sus resultados. Por tal motivo, se hace necesario estudiar el desempeño de algunos casos exitosos de edificaciones escolares previas a la estandarización nacional para lograr un mejor y más adecuado diseño desde el punto de vista del confort y la eficiencia energética.

La arquitectura del movimiento moderno mexicano se caracterizó por su apego a los principios de la revolución mexicana de 1910-1920: el nacionalismo y la justicia social. A su vez la educación fue uno de los ejes de los gobiernos surgidos de ese movimiento social para alcanzar las metas de la revolución. De tal modo, en los años cuarenta, en consonancia con los ideales del movimiento moderno, los principios de la revolución y los avances en el campo se experimentó con diseños que respondían directamente a su entorno natural y cultural. Para responder adecuadamente al entorno natural, la arquitectura había desarrollado algunas estrategias y dispositivos que con el tiempo se fueron perdiendo. En la arquitectura escolar del periodo estudiado abundaron las buenas soluciones de adecuación al entorno natural, y destacan las de los climas extremos como es el caso del estado de Colima.

En el estado de Colima existe un clima casi constante en cuanto a humedad y temperatura, esto hace que los espacios arquitectónicos se deban diseñar de acuerdo al soleamiento y ventilación cruzada, y por lo tanto crear espacios confortables para los usuarios. En las condiciones de clima cálido sub-húmedo, como las de Colima, la mejor estrategia posible antes de recurrir al aire acondicionado es la ventilación, para mejorar el confort térmico de los espacios arquitectónicos. Especialmente en escuelas se requieren dispositivos de bajo costo económico y de bajo consumo energético, por lo cual es importante un diseño adecuado para los usuarios de espacios educativos.

Carlos Leduc Montañó

A través de la arquitectura reflejó su ideología al diseñar y construir proyectos que respaldaban los principios revolucionarios de educación, salud y vivienda dignas. Leduc participó en la fundación del Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas (CAPFCE), a través del cual levantó una serie de planteles que han sido considerados dignos representantes del movimiento moderno mexicano (Quesería, Cuyutlán, Tecomán y Manzanillo), pensados para funcionar en climas extremos. Con rompe-vientos y parte-soles, sin cristales, logrando ser frescas y adecuadas para los niños.

El método de trabajo seguido implicó en primer lugar un diagnóstico de la situación del estado en materia escolar (García, 1946). También la realización de estudios climatológicos dedicando especial atención al estudio del sol, lluvias y vientos, pues el clima de Colima es particularmente caluroso, además de que en la zona hay vientos ciclónicos de máxima velocidad. Con estos datos, proyectó cuatro edificios: la escuela primaria "tipo" República de Argentina, que se construía en la capital del estado y las primarias de Quesería, Cuyutlán y Tecomán. Adicionalmente Leduc diseñó la escuela primaria Vicente Guerrero en Manzanillo y sobrevive, con algunas transformaciones, la escuela Primaria Basilio Badillo en la ciudad de Colima (Arañó, 2011).

Merecen una mención especial los parteluces, persianas y celosías que Leduc creó para estas escuelas. Puesto que en la zona llueve mucho y hay gran insolación. El arquitecto estudió nuevamente con gran detenimiento las crujías para impedir el paso del sol, no de la luz y, hacer lo propio con las lluvias y con los fuertes vientos ciclónicos, pero no con el suave aire

que ventila y refresca. En el corte de las aulas (figura 1) puede apreciarse el perfil de dichos elementos: especies de cejas y aletas, que a la vez contribuyen a dotar a la volumetría de la escuela de un carácter moderno. (Guzmán Urbiola, 2004).

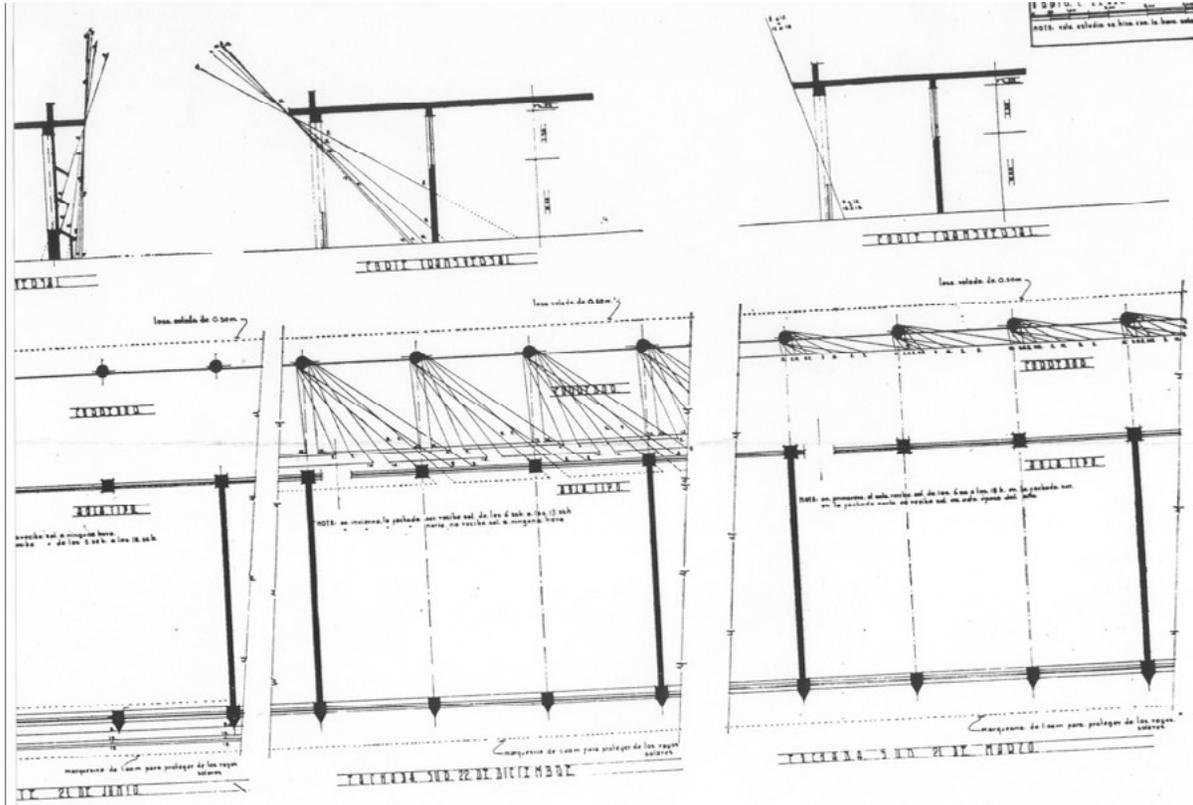


Figura 1. Estudios de soleamiento en pórticos y partesoles realizado por Leduc como base de sus diseños de aula.

Fuente: Memoria de la primera planeación, proyección y construcciones escolares de la Republica Mexicana. 1944-1945-1946. Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas.

Caso de estudio

Se analizaron dos aulas diferentes de la escuela primaria pública “Rafaela Suárez”, ubicada en Cuytlán, municipio de Armería, Col. (figura 2). Armería está limitando con el Océano Pacífico a lo largo de 15.3 kilómetros de costa. Se localiza entre las coordenadas geográficas de los 103° 53' a 104° 7' longitud oeste; y los 18° 1' a los 19° 7' latitud norte del Meridiano de Greenwich. El tipo de clima predominante en el estado de Colima y que también corresponde a nuestra zona de estudio en Armería, es el cálido sub-húmedo con lluvias en verano. Con la finalidad de ayudar a la interpretación del área de estudio y los factores que intervienen en él, en las figuras 2 y 3 se muestran los datos de temperatura y humedad relativa de la región.

Desempeño Bioclimático de una Escuela de Carlos Leduc en Clima Cálido Sub-Húmedo

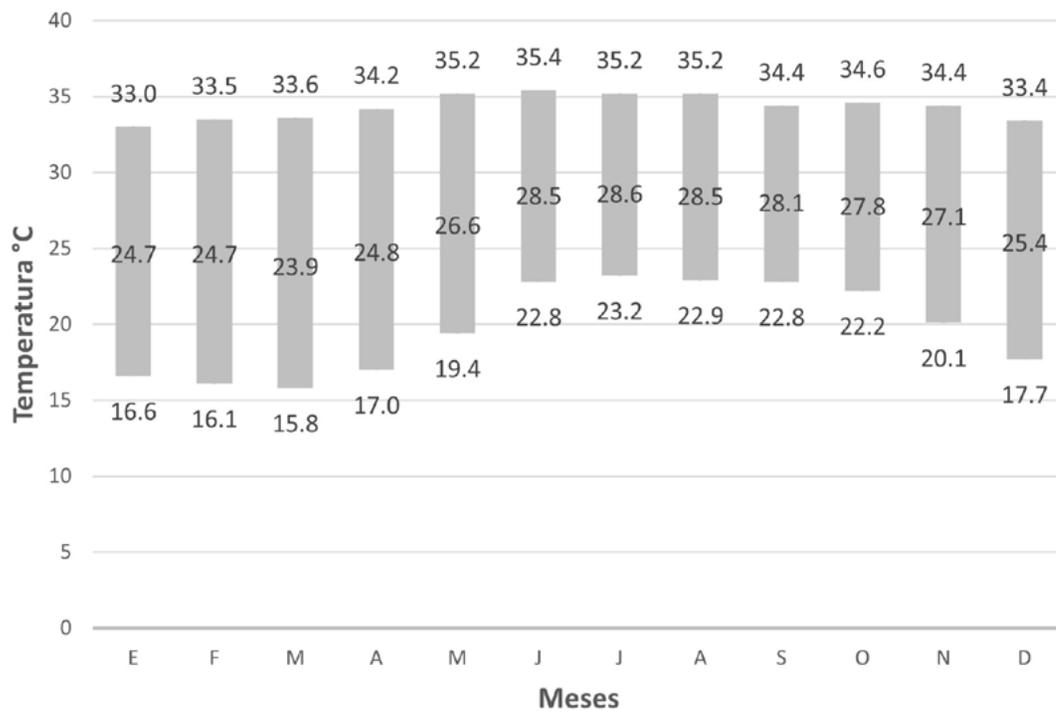


Figura 2. Temperatura mensual en la región de Armería, Colima (Lat. 18.9° N; Long. 103.9° W; Alt. 37 msnm.). Datos normales (1981-2010).

Fuente: SMN (2021).

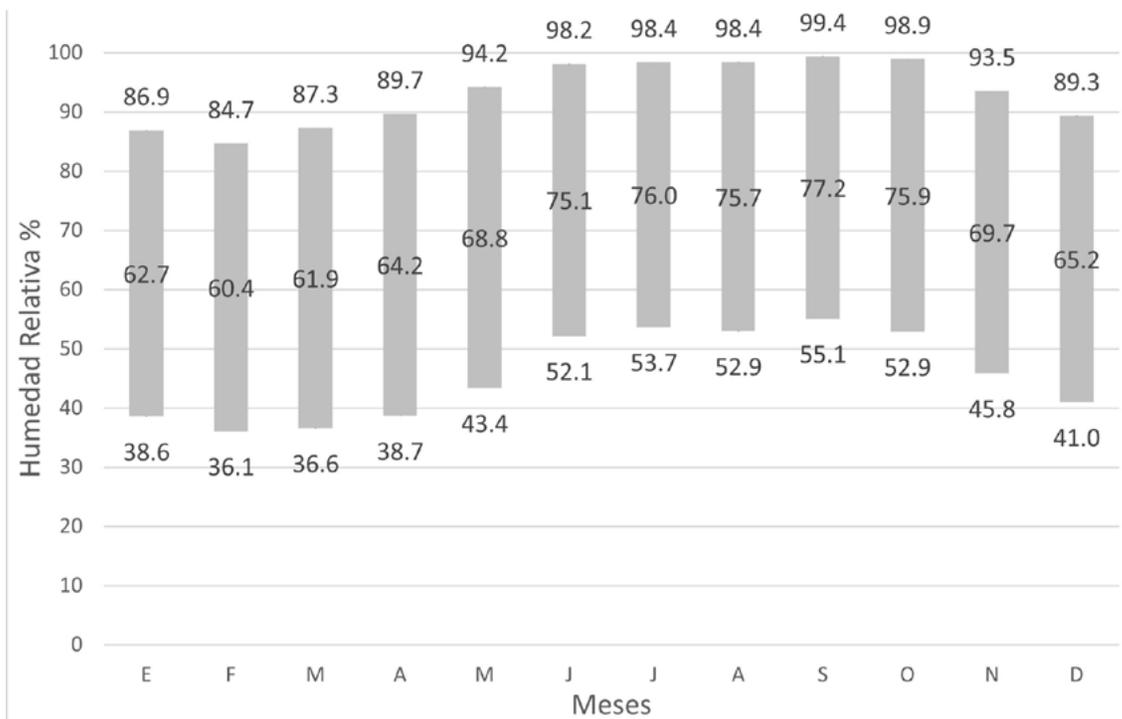


Figura 3. Humedad relativa mensual en la región de Armería, Colima (Lat. 18.9° N; Long. 103.9° W; Alt. 37 msnm.).

Fuente: Datos calculados a partir de información climatológica (SMN, 2021), mediante la fórmula de Tejeda (1994) en la hoja de cálculo Bioclimarq (Gómez-Azpeitia, 2020).



Figura 4. Foto satelital de la Escuela Primaria Rafaela Suárez. En la parte superior de la foto (norte) la parte del edificio original de Leduc, Construida en los años 40, en la parte sur, aulas contemporaneas edificadas en los años 80 con el modelo unitario CAPFCE.

Fuente: Google Maps. Fecha de consulta: mayo 2021.



Figura 5. Escuela Primaria Rafaela Suárez., Las transformaciones del edificio diseñado por Leduc han sido menores y poco afectan el desempeño bioclimático.

Fuente: Foto Adolfo Gómez.

El diseño original de la escuela primaria “Rafaela Suárez”, estaba considerado en dos niveles (Figura 4), pero finalmente se construyó de una sola planta. La escuela cuenta con los siguientes espacios: dirección, sala de espera, bodegas, cancha multiusos, dos patios de juegos divididos por un módulo central donde se encuentran los baños, bebederos, bodega y unas escaleras que fueron planteadas para el segundo piso pero por falta de recursos económicos éste no se realizó, además tiene 6 aulas de las cuales 4 fueron diseñadas por Carlos Leduc y las otras 2 fueron construidas recientemente en un módulo separado.

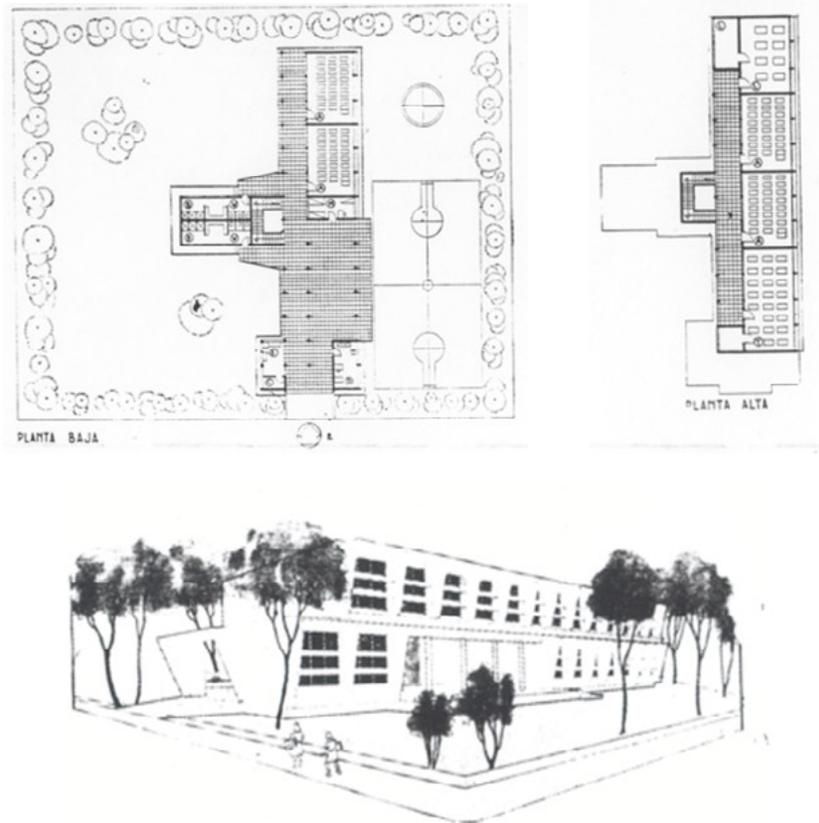


Figura 6. Plantas y perspectiva, Escuela Rafaela Suárez en el diseño original de Carlos Leduc.

Fuente. Memoria de la primera planeación, proyección y construcciones escolares de la República Mexicana. 1944-1945-1946. Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas.

Para el estudio de desempeño se eligieron dos aulas, una construida en los años 40's por Carlos Leduc, que en este caso consideramos como “aula caso de estudio” y otra edificada a finales de los años 70's, que constituye el “aula de referencia”, en las que se tomaron registros de velocidad de viento y temperatura, con la intención de comprobar que el diseño de las aulas propuestas por Carlos Leduc muestra un mejor desempeño que las aulas convencionales, debido al efecto combinado de una temperatura más baja y mayor velocidad de viento. La escuela donde se localizan las dos aulas, opera exclusivamente en el turno matutino de

8:00 AM a 1:00 PM. Se eligieron éstas ya que tienen la misma orientación y, por su ubicación, la radiación solar en el horario de operación es similar en las ambas.

Materiales y métodos

El método empleado en este trabajo fue; observacional comparativo, la estrategia de acopio de datos fue mediante el monitoreo, en donde se tomó el registro de la velocidad del viento y la temperatura. Para el monitoreo de datos de velocidad del viento y temperatura al interior de cada una de las aulas, se utilizó un Anemómetro-Termómetro, Data Logger DELTA OHM, mod. HD2103.2, conectado a una Sonda Telescópica omnidireccional DELTA OHM, mod. AP471S2, cuyas especificaciones se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la sonda telescópica omnidireccional DELTA OHM, mod. AP471S2.

Fuente: PCE (2021)

Tipo de sensor	Termistor NTC omnidireccional
Rango de medida	0.1 a 5.0 m/s (metros por segundo)
Velocidad de viento	
Temperatura	-25 a +80° C
Resolución	0.01 m/s
Velocidad de viento	0.1° C
Temperatura	
Precisión	±0.05m/s (velocidades entre 0 y 0.99 m/s)
Velocidad de viento	
Temperatura	±0.15m/s (velocidades entre 1.0 y 5.0 m/s)
	±0.8°C (temperaturas entre -10 y +80°C)
Condiciones de trabajo	Aire limpio
	Humedad Relativa <80 %

Previa calibración, el equipo de colecta de datos se instaló a una altura de 1m. sobre una de las sillas utilizadas por los alumnos, aproximadamente al centro del aula, al que se fijó la sonda telescópica Termistor para que el sensor quedara direccionado al flujo del aire. La colecta de datos se programó para registrar lecturas de velocidad del viento y temperatura cada 5 minutos. El monitoreo duró 24 horas y se realizó en la temporada cálida húmeda, en el mes de junio. El registro de datos se realizó de forma simultánea en ambas aulas¹.

Cabe señalar que originalmente los salones diseñados en los años 40 no estaban provistos con ventanas de vidrio, de modo que las ventanas se mantuvieron plenamente abiertas en los dos espacios estudiados. También conviene mencionar que el monitoreo se llevó a cabo en un periodo sin actividad ni alumnos dentro de ellas, para evitar la interferencia recíproca entre el equipo y la actividad cotidiana.

Se obtuvieron 289 registros de cada aula correspondientes a 24 horas de medición. De la información obtenida se seleccionaron 61 registros de temperatura y velocidad del viento por cada una de las aulas monitoreadas, correspondientes a las 5 horas del horario de clases en turno matutino, Para el análisis del enfriamiento aparente sobre la piel producido por el movimiento del aire, se determinó la velocidad del viento promedio y la temperatura máxima registradas en cada aula. Para el análisis del confort térmico o de neutralidad térmica se obtuvieron las temperaturas promedio de cada hora por aula.

Para el procesamiento de la información se tomó la temperatura media exterior (normal climatológica de Armería, Colima), del mes de junio, 28.5°C. Con este valor se estimó la temperatura neutra de la localidad de acuerdo a la fórmula de la norma ASHRAE 55 (2017), producto del meta-análisis hecho por Richard de Dear y Gail Braguer (1998):

$$T_n = 0.31 \bar{T}_{out} + 17.8 \quad \text{Ec. 1}$$

donde:

T_n = Temperatura operativa neutra, en °C

T_{out} = Temperatura promedio mensual exterior, en °C

Fuente: (Nicol, Humphreys, & Roaf, 2012, pág. 55)

Para la determinación del enfriamiento aparente sobre la piel producido por el movimiento del aire, se siguió el criterio de Szokolay (2008, págs. 42-43), cuya fórmula es:

$$dT = 6V_e + 1.6V_e^2 \quad \text{Ec. 2}$$

donde:

dT = Diferencia de temperatura aparente por efecto del movimiento del aire, en °C

¹ La instalación del equipo de monitoreo y toma de datos fue realizada por estudiantes de la licenciatura en arquitectura de la Universidad de Colima. Nuestro agradecimiento por este trabajo a Gilberto Castillo Arias y Leopoldo Escoto y al Dr. Marcos González Travizo por su trabajo en la calibración del equipo.

$$V_e = V - 0.2 \quad \text{Ec. 3}$$

donde:

V_e = Velocidad efectiva del aire, en m/s,

V = Velocidad del aire en contacto con la superficie de la piel, en m/s

Estimación válida hasta una $V = 2.0$ m/s

Fuente: Zsokolay (2008, págs. 42-43)

Resultados

A continuación, se muestra la estimación del rango de confort estimado para la región de Armería. Finalmente, se muestra la sensación de enfriamiento aparente por efecto de la velocidad de aire para el momento más crítico del día.

De acuerdo a la ecuación 1, se estimó una temperatura neutra para el mes de junio de 26.43° C, por lo que considerando un rango de confort de ± 2.5 K respecto de esa temperatura, se tiene 28.93° C como límite superior de confort y 23.83° C, como límite inferior. El rango de ± 2.5 K se tomó de acuerdo a lo establecido en la norma ANSI/ASHRAE 55 para espacios acondicionados con medios pasivos (ANSI/ASHRAE, 2017, págs. 12-14) para un 90% de aceptación.

En la tabla 2 se observa que el aula caso de estudio es mejor por 3.8 °C, en comparación con el aula nueva, con respecto al enfriamiento aparente producto de la velocidad del aire que corre sobre la piel.

Tabla 2. Resultados del diferencial de temperatura estimado por efecto del enfriamiento aparente producido por la velocidad del aire sobre la piel.

Aula	Temperatura máxima (°C)	Velocidad del aire promedio (m/s)	Diferencial de temperatura por efecto del enfriamiento aparente (K)	Sensación de temperatura sobre la piel (°C)
Caso de estudio	30.5	0.51	3.32	27.17
Referencia	31.9	0.17	0.94	30.96

En la figura 7 se muestra como en el momento más crítico de la jornada escolar, la temperatura aparente sobre la piel, en el aula correspondiente al caso de estudio permanece dentro del rango de confort térmico, en tanto que en el aula de referencia sale de dicho rango, requiriendo la intervención de algún medio mecánico (ventiladores o aire acondicionado) para compensar la diferencia de 2 K, por encima del límite aceptable de confort térmico. Discusión y conclusiones

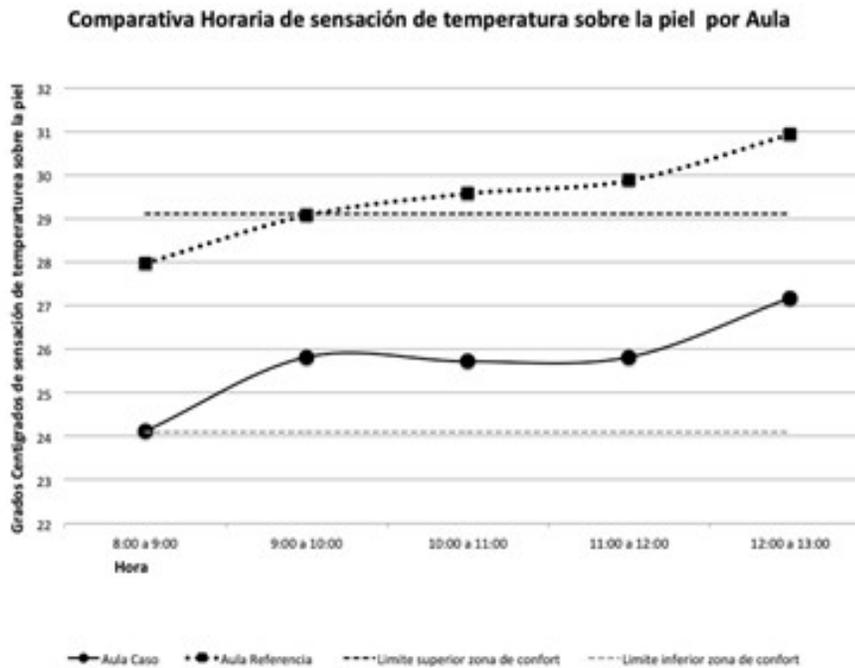


Figura 7. Comparativa horaria entre sensación de temperaturas sobre la piel, al interior de las aulas analizadas y el rango de confort térmico para la región de Armería.

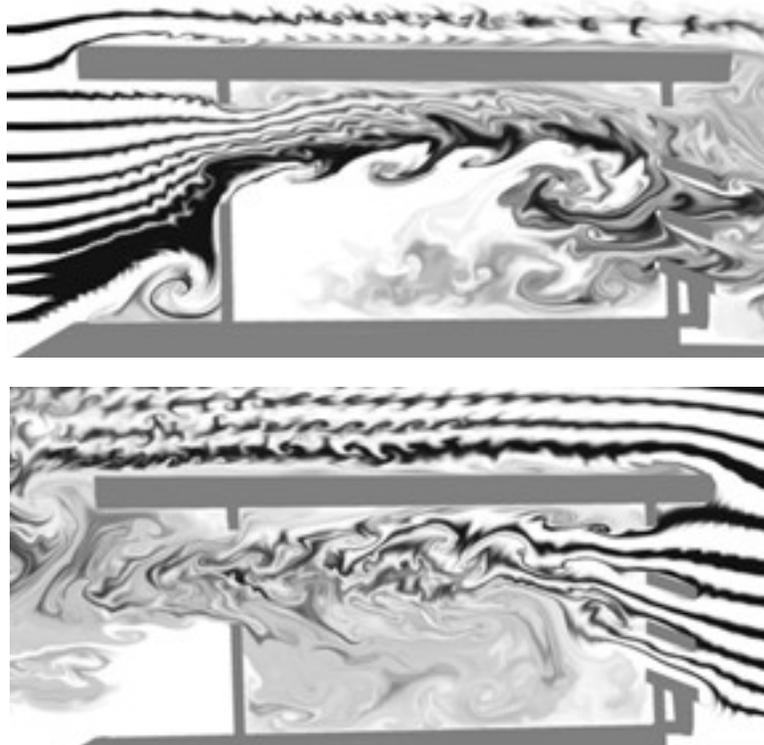


Figura 8. Esquema de ventilación de las aulas diseñadas por Carlos Leduc. Parte superior ventilación (desde SW) durante el horario de operación de la escuela. Parte inferior ventilación (desde NE) durante tarde y noche. Ventilación que permite enfriar la estructura para mejorar las condiciones termicas de las primeras horas de operación de la escuela. Modelo realizado con la aplicación Wind Tunnel CFD.

Discusión y conclusiones

En primer lugar, resalta la diferencia encontrada tanto en las temperaturas como en la velocidad de viento del aula caso de estudio frente al aula de referencia, siempre a favor de la primera diseñada por Carlos Leduc. Se comprueba que la ventilación cruzada es la estrategia apropiada para dotar de confort por medios pasivos a los espacios en los climas húmedos, tanto por el efecto en la envolvente como en la sensación térmica de los ocupantes. Un aspecto importante del desempeño respecto a la ventilación cruzada es la conducción del viento en el interior del espacio. Ya que ambas aulas cuentan con ventilación cruzada, la limitante radica en el tipo de vanos y la forma en las ventanas optimiza las ráfagas de viento provenientes del exterior.

Leduc integra celosías de persiana en sus diseños que cumplen varias funciones una de las cuales es re direccionar las ráfagas de viento hacia la parte superior del aula, permitiendo expulsar el aire caliente. La ventilación en el aula construida recientemente se ve afectada por el tipo de vanos; la disposición de una ventana simple permite que el cruce del viento sea en línea recta, lo que no favorece el flujo del aire caliente hacia el exterior, acumulado en la parte superior dentro del aula. Estos resultados demuestran que el tipo de ventana es un factor importante en el aprovechamiento del viento, que resulta ser de mayor eficiencia en las aulas construidas por Leduc en los 40's en comparación a un aula contemporánea.

Aunque se comparan dos tipos de diseño para una localidad debemos tomar en cuenta que el diseño del aula de referencia es un diseño estandarizado para todo el país y al obtener un desempeño desfavorable pone en entredicho la idea de contar con diseños unificados para todo el país y sin considerar requerimientos específicos por localidad. Aunque la normatividad y el diseño estandarizado plantean una adecuada solución de orientación y protecciones solares, existen otras condiciones locales que se deben atender. Con la actual política de descentralización de los procesos de diseño y construcción de espacios educativos se deben aprovechar las experiencias exitosas de los diseños construidos en los años 40 y capitalizar los nuevos conocimientos derivados de investigaciones en diseño bioclimático y edificación sostenible, acumulados en los últimos años, que no se han incorporado hasta el momento a los lineamientos del sistema educativo.

Bibliografía

Ali, H. H., & Al-Hashlamun, R. (2019). Assessment of indoor thermal environment in different prototypical school buildings in Jordan. *Alexandria Engineering Journal*(58).

Anguiano Palomera, G. (2005). Evolución arquitectónica de las escuelas primarias en la ciudad de Colima, 1930-1970 . Tesis de Maestría, Universidad de Colima, Facultad de Arquitectura y Diseño, Colima.

ANSI/ASHRAE. (2017). ASHRAE:55 Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Arambula Lara, R., Pernigotto, G., Cappelletti, F., Romagnoni, P., & Gasparella, A. (2015). Energy audit of schools by means of cluster analysis. *Energy and Buildings*(95), 160–171.

Arañó, A. (Ed.). (2011). *Arquitectura escolar, SEP 90 años*. Ciudad de Mexico: Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.

Bernardi, N., & Kowaltowski, D. (march de 2006). Environmental Comfort In School Buidings. *Environment and Behavior*, 38(2), 155-172.

Bernardi, N., & Kowaltowski, D. C. (March de 2006). Environmental comfort in School buildings. A case study of awarness and participation users. *Environment and Behavior*, 38(2).

Bosch Espelta, J. (2013). Introducción. En J. Bosch Espelta (Ed.), *Documentos de Control Ambiental en la arquitectura docente. Brasil, Chile y México* (págs. 9-14). Barcelona: Universitat Politècnica de de Catalunya.

Brás, A., & Gomes, V. (2015). LCA implementation in the selection of thermal enhanced mortars for energetic rehabilitation of school buildings. *Energy and Buildings*(92), 1–9.

Cigler, J., Tomáš'ko, P., & Š'iroky', J. (2013). BuildingLAB: A tool to analyze performance of model predictive controllers for buildings. *Energy and Buildings*(57), 34–41.

de Dear, R., & Brager, G. (1998). Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. *ASHRAE Transactions*(104), 145-167.

Dhalluin, A. (s.f.). These pour l'obtention du grade de : Docteu, Université de La Rochelle , École Doctorale Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Énergétique et Aéronautique.

Fong, M. L., Lin, Z., Fong, K. F., Chow, T. T., & Yao, T. (2011). Evaluation of thermal comfort conditions in a classroom with three ventilation methods. *Indoor Air*(21).

García García, E. (2013). El detalle de los componentes medioambientales. En J. Bosch Espelta (Ed.), *Documentos de Control Ambiental en la arquitectura docente. Brasil, Chile y México* (págs. 62-69). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

García, J. V. (Ed.). (1946). *Memoria de la primera planeación pyoyección y construcciones escolares 1944-1945-1946*. Mexico: Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas.

Ghita, S. A., & Tiberiu, C. (2015). Energy efficiency versus indoor environmental quality in different Romanian countryside schools. *Energy and Buildings*(92), 140–154.

Giraldo Vásquez, N., & Ruttkay Pereira, F. O. (2012). Influence of the Height of the Line Of Sight in the Evaluation of Glare Sensation in Pre-School Classrooms. En J. Reiser, S. Biondi, & C. Jiménez (Ed.), 28th Conference PLEA, Opportunities, Limits & Needs. Towards an environmentally responsible architecture. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Gómez-Azpeitia, G. (2020). *Bioclimarq*. Colima, México.

Guzmán Urbiola, X. (2004). *Carlos Leduc. Vida y Obra*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Haddad, S., King, S., Osmond, P., & Heidari, S. (2012). Questionnaire Design to Determine Children's Thermal Sensation, Preference and Acceptability in the Classroom. En J. Reiser, S. Biondi, & C. Jiménez (Ed.), PLEA 2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Hernández Barreda, E. G., & Gómez Amador, A. (2008). La temperatura ambiental y su vinculación con el aprovechamiento escolar. *Palapa*, 2(2).

Hernandez Barreda, G., & Gomez Amador, A. (July-December de 2007). La temperatura ambiental y su vinculación con el aprovechamiento escolar. *Palapa*, II(2), 21-30.

Leite Frandoloso, M. A., Londero Brandli, L., & Pedroso Dias, F. (2012). How to Improve Eco-Efficiency and Indoor Comfort at University of Passo Fundo - Brazil. En J. Reiser, S. Biondi, & C. Jiménez (Ed.), PLEA 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Mantovani Genari, E. (2013). Escuela Júlia Kubitschek: forma moderna y medio ambiente. En J. Bosch Espelta, *Elementos de control ambiental en la arquitectura docente*. Brasil, Chile y México. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Marzano, R. (1997). *Dimensiones del aprendizaje*. Guadalajara: ITESO.

Mceachron, G., Baker, C., & Bracken, B. A. (Nov de 2003). What Classroom Environments Tell About the Pedagogical Aspects of Subject Matter. A Cross-Cultural Comparison. *School Psychology International* , 24(4), 462–476.

Miranda Zacarías , I., & Winfield Reyes, F. N. (2013). Componentes medioambientales en la arquitectura escolar de Luis G. Rivadeneyra Falcó. En Grupo de Investigación FORM, *Documentos de arquitectura moderna en América Latina 1950-1965. Elementos de control ambiental en la arquitectura docente*. Brasil, Chile y México. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.

Nicol, F., Humphreys, M., & Roaf, S. (2012). *Adaptive Thermal Comfort. Principles and Practice*. Kent: Earthscan from Routledge.

Olalekan Simeon, O., & Zafer Alibaba, H. (2017). Volume 8, Issue 12, December-2017 Bioclimatic Approach for Low Operational Energy in Educational Buildings In Nigeria. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8(12).

Orce Schwarz, S., Flores Larsen, S., & Filippín, C. (2012). Energy Thermal Redesign of a Bioclimatic School through Monitoring and Simulation. En S. B. J. Reiser (Ed.), 28th Conference PLEA, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Ossio, F., Veas, L., & De Herde, A. (2012). Constructive Standards for Adapted Thermal Performance of Educational Buildings in Chile. En J. Reiser, S. Biondi, & C. Jiménez (Ed.), 28th Conference PLEA, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

PCE. (18 de 06 de 2021). PCE Iberica S.L. Instrumentación. Obtenido de Sonda de hilo caliente omnidireccional AP471S2: https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-calidad-aire-interior-delta-ohm-s.r.l.-sonda-de-hilo-caliente-omnidireccional-ap471s2-det_2199646.htm

Piderit, B., & Bodart, M. (2012). Design Strategies Applied to Classroom's Daylight Design. Optimization of classrooms design. En J. Reiser, S. Biondi, & C. Jiménez (Ed.), 28th Conference PLEA, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Puteh, M., Hairy Ibrahim, M., Adnan, M., Nidzam, C., Ahmad, C., & Mohamed Noh, N. (2012). Thermal comfort in classroom: constraints and issues. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*(46).

Romero-Odero, J. A., Galán-Marín, C., & Rivera-Gómez, C. (17 de enero de 2020). Atrium Impact on a School-Building: Thermal Performance in a Hot Climate. *Proceedings*, 38(1).

Salvalai, G., Malighetti, L. E., Luchini, L., & Girola, S. (s.f.). Analysis of different energy conservation strategies on existing school buildings in the a Pre-Alpine Region. *Energy and Buildings*<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.058>.

Sekki, T., Airaksinen, M., & Saari, A. (2015). Impact of building usage and occupancy on energy consumption in Finnish daycare and school buildings. *Energy and Buildings*(105), 247–257 .

Sekki, T., Airaksinen, M., & Saari, A. (2017). Effect of energy measures on the values of energy efficiency indicators in Finnish daycare and school buildings. *Energy and Buildings*(139), 124–132.

SMN. (18 de 06 de 2021). Servicio Meteorológico Nacional. Obtenido de Normales Climatológicas por Estado: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=col>

Stazi, F., Naspi, F., Ulpiani, G., & Di Perna, C. (January de 2017). Indoor air quality and thermal comfort optimization in classrooms developing an automatic system for windows opening and closing. *Energy and Buildings*(139).

Stazi, F., Naspi, F., Ulpiani, G., & Di Perna, C. (2017). Indoor air quality and thermal comfort optimization in classrooms developing an automatic system for windows opening and closing. *Energy and Buildings* 139, (2017) 732-746 (139), 732-746.

Szokolay, S. (2008). *Introduction to Architecture Science. The basis of sustainable design.* Oxford, UK: Elsevier LTD.

Tejeda Martínez, A. (1994). On the evaluation of the wet bulb temperatures a function of dry bulb temperature and relative humidity. *Atmósfera*, 1994(7), 179-184.

Trebilcock, M., Bobadilla, A., Piderit, B., Guzmán, F., Figueroa, R., Muñoz, C., . . . Aguilera, C. (2012). Environmental Performance of Schools in Areas of Cultural Sensitivity. En J. Reiser, S. Biondi, & C. Jiménez (Ed.), *PLEA 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs. Towards an environmentally responsible architecture.* Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Velasco, E. (2011). Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas (CAPFCE) 1944-2008. En A. Arañó (Ed.), *Arquitectura Escolar. SEP 90 años* (págs. 218-239). Mexico: Consejo Nacional para la Cultura y las Artes-Fragonard 70.

Wang, Y., Kuckelkorn, J., Zhao, F.-Y., Liu, D., Kirschbaum, A., & Zhang, J.-L. (2015). Evaluation on classroom thermal comfort and energy performance of passive school building by optimizing HVAC control systems. *Building and Environment*(89), 86-106.

Wauman, B., Saelens, D., & Breesch, H. (2015). The definition of representative boundary conditions for Flemish schools for use in energy assessment methods. *Energy and Buildings*(87), 1-13.

Zeiler, W., & Waard, M. D. (2012). Some Dutch Examples of Sustainable School Concepts Towards Plus Energy Schools. En J. Reiser, S. Biondi, & C. Jiménez (Ed.), *28th Conference PLEA, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture.* Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Zhu, W., & Wang, Z. (2015). Bioclimatic design approach applied to the primary schools in rural areas of Turpan, Xinjiang, China. *Architecture in (R)Evolution.* Bologna: PLEA.

Arquitectura Bioclimática para la salud ante el COVID-19 Clínica Materno Infantil Ricardo Flores Magón

Dra. Gloria María Castorena Espinosa¹

¹ UAM, CyAD, Departamento de Medio Ambiente | Área de Arquitectura Bioclimática | Laboratorio de Arquitectura Bioclimática | Correo: gmce@azc.uam.mx

Resumen

El crecimiento de la población mundial, la concentración de los habitantes en grandes urbes, la contaminación ambiental y la poca planeación de la medicina preventiva desde la arquitectura son factores de riesgo ante las enfermedades pandémicas del siglo XXI, priorizando la atención del COVID-19. En este sentido, la arquitectura que cubre las necesidades del sector salud demanda del diseño bioclimático tanto en obra nueva como en la adecuación de los edificios existentes, en el manejo de la ventilación, la incidencia y el control gradual de la radiación solar en su componente térmico-lumínico, en el manejo de la vegetación exterior y el correcto aislamiento de las áreas de atención de enfermedades respiratorias de alto contagio, por la salud del usuario a través de una arquitectura saludable.

La intervención en la Clínica Ricardo Flores Magón localizada en Tepotzotlán, municipio conurbado en el extremo norte a la Ciudad de México, ejemplifica un caso de aplicación de los conceptos y estrategias de diseño bioclimático como respuesta a la necesidad de ofrecer atención inmediata en el diagnóstico, estabilización y traslado de pacientes con SARS-CoV-2.

Palabras clave: Salud, diseño bioclimático, ventilación, iluminación y radiación natural.

Abstract

The growth of the world population, the concentration of people living in urban areas and their surroundings, the environmental pollution and the poor planning of preventive medicine in architecture are risk factors for pandemic diseases of the 21st century, prioritizing the care for COVID-19. In this sense, the architecture that meets the needs of the health sector demands bioclimatic design, both in new constructions and in the adaptation of existing buildings, in the management of ventilation, incidence and control of the solar radiation, in the external use of vegetation and in the correct insulation of the areas of attention of highly contagious respiratory diseases, for the wellbeing of the users derived from a healthy architecture.

The intervention took place in the Clínica Ricardo Flores Magón, located in Tepotzotlán, a conurbation municipality in the extreme north of Mexico City. It exemplifies a case of study of the concepts and strategies of bioclimatic design as a response to the need to offer immediate attentions in the diagnosis, stabilization and transfer of patients with SARS-CoV-2.

Keywords: Health, bioclimatic design, ventilation, lighting and natural radiation.

Introducción

La arquitectura para la salud del sector público ha evolucionado paralelamente con el bienestar y las enfermedades pandémicas del hombre; ha tenido transformaciones tecnológicas, basadas en las ciencias médicas y sus necesidades, para encontrar soluciones ante las crisis emergentes. Las pandemias que han estado presentes en la historia de la humanidad han aportado en la arquitectura y el urbanismo soluciones de diseño que recuerdan los principios de la arquitectura de Vitrubio hasta el bioclimatismo por el confort humano de Olgyay, Givoni, Szokolay y Evans.

Antecedentes históricos de las enfermedades pandémicas.

Las enfermedades contagiosas han atribuido su origen en parte al aire contaminado, los denominados miasmas que se producen al vivir en zonas insalubres y con alta concentración de contaminantes y población.

Algunas enfermedades cuyo medio de transmisión ha sido a través de descargas respiratorias en el aire, datan de la India y de Egipto, tales como la Viruela, que se extendió al continente europeo y americano, reduciendo en un 30% la población mundial.

La Peste de Justiniano I en Constantinopla fue una enfermedad pandémica que se propagó en la ciudad cuando ésta albergaba a casi 800,000 habitantes, de los cuales el 40% contrajo la enfermedad¹.

La Gripe, una enfermedad infecciosa viral aún presente en nuestros tiempos, se ha manifestado a través de múltiples variantes como la denominada Gripe Española, la cual nace en Estados Unidos y se expande a Europa para alcanzar el contagio a nivel global en una tasa de población de entre el 10 y el 20%, lo que produjo una pérdida de entre 20 y 50 millones de seres humanos.

Otra variante de enfermedades respiratorias cuyo medio de transmisión principal es el aire fue la Gripe Asiática, ocasionando casi 1 millón de muertes a nivel mundial.

Una más, la Gripe de Hong Kong con 1 millón de víctimas y de ahí a la Influenza descrita por Hipócrates como una pandemia que afectó a Roma y se extendió hasta la Edad Media, presente aún en pleno siglo XXI.

1 Revista Chilena de Infectología v.21 n.2 Santiago de Chile, junio 2004.

Los científicos han encontrado que virus, bacterias y hongos tienen un medio de reproducción favorable en espacios interiores sin radiación solar, con poca o nula luz y con un alto contenido de humedad. Espacios idóneos para la propagación de la Gran Plaga Blanca o de la tuberculosis -que duró como pandemia casi 200 años hasta que el médico microbiólogo alemán, Robert Koch, recibe el nobel al descubrir el bacilo que la producía. “A partir de Koch fue entendido que la bacteria infecciosa sobrevivía en lugares oscuros y polvorientos y que el aire libre mejoraba a los pacientes. Este entendimiento bastó para influir significativamente en la arquitectura y llevó a la construcción de edificios con grandes ventanales y soleadas terrazas. Las escuelas, con salones de clase ampliamente iluminados y con grandes ventanales, fueron consideradas escuelas anti-tuberculosis. La arquitectura cambió de aspecto presentando fachadas limpias y grandes ventanales”².

Resiliencia arquitectónica en el tiempo

Los grandes problemas pandémicos están directamente vinculados a la vida en agrupamientos urbanos y a la concentración de la población; porque a mayor cantidad de individuos, mayor cantidad de desechos, mayor demanda de oxígeno, alimento y mayores requerimientos de recursos para su operación: agua, energía eléctrica, gas en el mismo espacio, pero con mayor densificación.

Ha sido particularmente la arquitectura hospitalaria la que se ha transformado bajo el concepto de espacio saludables.

“[...] En 1859 surgió el primer sanatorio en la región montañosa de Silesia (Alemania) y posteriormente surgieron muchos otros alrededor del mundo. H. Brehmer y P. Dettweilwer fueron los promotores, en el año 1877, de la proliferación de asilos para tísicos, inicialmente en Alemania, pero pronto extendidos a toda Europa. E. L. Trudeau, en 1884 fundó el sanatorio Saranac Lake, en Estados Unidos. P. Dettweilwer fundó en 1876 otro famoso sanatorio en Falkenstein, Alemania.”³

El estilo de mayor aporte en el sector salud surge a principios del siglo XX con el denominado movimiento Moderno, representado por los trabajos de Le Corbusier, Alvar Aalto y Mies van der Rohe, en la búsqueda de una arquitectura sana, blanca, de formas limpias y con grandes ventanales para la entrada del sol y de la luz natural. La tipología formal se distinguía por su elevación a través de pilotes para evitar que el espacio habitable interactuara con el suelo. La unión entre el interior y el exterior se da a través de terrazas y balcones para el asoleamiento y la ventilación natural con amplias áreas verdes ornamentadas con árboles y flores.

Edificios diseñados especialmente para recuperar la salud, una arquitectura para la prevención y control del contagio. El modelo del hospital moderno de Villa Savoye, cerca de París, del arquitecto Le Corbusier ejemplifica la aplicación de lo que el autor denomina los cinco puntos para una arquitectura sana:

2 Tamayo, Jesús. Pandemias, Arquitectura y Urbanismo. Revistas UNAM.

3 Huguet Pané, Guiomar. Grandes Pandemias de la Historia. National Geographic. 2020.

1. La elevación a través de columnas para aislar de la humedad del suelo el espacio habitable y así obligar al usuario a mantener la higiene desde el acceso en donde se encuentra un lavatorio.
2. Un esquema de planta libre que da flexibilidad en el uso y la función por tener una distribución uniforme de la luz, la ventilación, la temperatura y la humedad, así como de la radiación.
3. La fachada libre de obstrucciones y restricciones estructurales, lo que permite la abertura total de vanos para recibir al máximo el aire proveniente de las zonas arboladas.
4. Los grandes ventanales y el paisajismo como parte de la salud física y emocional para la recuperación.
5. Los techos planos se transforman en terrazas y jardines, dando espacio a una superficie utilitaria para el asoleamiento y el descanso al exterior.

Otro significativo ejemplo es el sanatorio Paimio en Finlandia, del arquitecto Alvar Aalto, quién en búsqueda de la salud de los usuarios y del personal médico, diseña y construye bajo los principios de luz, radiación y ventilación de la arquitectura moderna, hasta el detalle del mobiliario y de cada uno de los interiores.

“La Microbiología del aire comienza en el siglo XIX, con Pasteur y Miquel que diseñaron métodos para estudiar los microorganismos en el aire y descubrir la causa de algunas enfermedades. Desde entonces numerosos investiga-



Figura 1. Sanatorio Paimio por Alvar Aalto, 1933, Finlandia.

Fuente: Fotografía de Arnout Fonck/Flickr.

dores han trabajado en este campo tanto en el aire exterior como en recintos cerrados.

Las enfermedades transmitidas por el aire, producidas por bacterias, virus y hongos, son las respiratorias (neumonía, tosferina, tuberculosis, legionelosis, resfriado, gripe), sistémicas (meningitis, sarampión, varicela, micosis) y alérgicas.”⁴

Si las enfermedades respiratorias se transmiten por el aire, un principio elemental es mejorar la calidad del aire como premisa de diseño, creando áreas abiertas que alberguen a las especies vegetales para la producción de oxígeno. Que la selección de especies incluya su capacidad filtrante de partículas, el control de la humedad, de los colores, los olores y la regulación térmica del microclima colindante con las aberturas de los edificios. Regular a través de la vegetación exterior los intercambios térmicos ante el cambio climático ya que, al incrementarse la temperatura ambiente, se genera un medio propicio para la reproducción de las bacterias.

¿Cómo diseñar la arquitectura de hoy para la salud?

La arquitectura hospitalaria busca ofrecer los servicios para que se recupere o conserve la salud de una población; bajo este principio, la arquitectura debe ser obligadamente saludable, confortable e higiénica, en contacto y comunicación con un medio natural salubre.

La arquitectura de hoy para la salud debe sanear su entorno inmediato para poder aprovechar las condiciones exteriores.

Diseñar las áreas relacionando el interior con el exterior, reverdecer los espacios para la generación natural de oxígeno y como sistema biótico de regulación microclimática, aprovechar las propiedades de la vegetación por su color, textura, luz y sombra, aromas -asimismo como filtros de polvo y partículas suspendidas en el aire con el objetivo de ofrecer un entorno de bienestar para el paciente, como estímulo en el proceso de recuperación de la salud.

El concepto actual de arquitectura engloba el término de salud no únicamente por la ausencia de enfermedades, sino por el estado físico, mental y social de los usuarios con un medio circundante lo más saludable posible.

El diseño de interiores para la salud debe utilizar materiales libres de contaminantes, que se conserven en excelentes condiciones durante el mayor periodo de vida útil posible, fáciles de mantener y con la posibilidad de resistir ante los productos desinfectantes utilizados constantemente para el aseo; mobiliario sencillo de formas continuas para facilitar el aseo. Hoy en día, la implementación de la tecnología y la nanotecnología debe facilitar la selección de materiales con propiedades antimicrobianas, asépticas y autolimpiables.

Unidades médicas de fácil accesibilidad, con consultas presenciales para el diagnóstico, tratamiento y seguimiento -tanto presencial como a través de la medicina digital.

⁴ De la Rosa, M.C., Mosso, M.A., Ullán, C. El aire: hábitat y medio de transmisión de microorganismos, 2020.

Espacios eficientes energéticamente que aprovechen el uso de la iluminación natural, la radiación solar como germicida interior y la climatización pasiva, sistemas de generación de energía como el calentamiento de agua por medio del sol; así como la ventilación natural en los locales donde no hay exigencia normativa de un interior séptico, de control artificial.

Los requerimientos arquitectónicos para la salud también deben considerar la reutilización y el reciclaje de los espacios existentes, el costo de vida de los edificios y su posible revitalización en una arquitectura bioclimática saludable.

Bajo estos conceptos se desarrolló un proyecto bioclimático y sustentable para la Clínica Ricardo Flores Magón en la municipalidad de Tepetzotlán, en el Estado de México; localizada en la colonia que concentra la mayor población de la cabecera municipal en lo que originalmente eran terrenos ejidales, cuyos servicios y equipamiento han crecido paralelamente al desarrollo de la localidad para cubrir las necesidades básicas de salud.

Proyecto de Vinculación

El gobierno municipal de Tepetzotlán consideró desde su inicio a la salud de la población como una prioridad, por lo que en un trabajo colaborativo con la UAM Azcapotzalco se realizó la adecuación y ampliación de la Clínica Materno Infantil Ricardo Flores Magón.

Se inició con el análisis de la información clínica del área geográfica estadística, lo cual arrojó la necesidad de atención clínica a las enfermedades y accidentes de mayor frecuencia, al mismo tiempo que la pandemia por COVID-19 y sus futuras variantes daban la pausa para considerar espacios para el diagnóstico, estabilización y canalización de pacientes infectados.

Descripción metodológica

Análisis del Sitio

Levantamiento topográfico

Levantamiento arquitectónico y de exteriores

Instalaciones existentes

Análisis climatológico a través de la estación meteorológica Represa el Alemán

Análisis microclimático de ventilación, temperatura y humedad relativa.

Análisis clínico de enfermedades

Información del Sector Salud a nivel estatal

Información del Sector Salud a nivel municipal

El usuario

Análisis de necesidades del personal médico y trabajadores de la Clínica RFM

Demandas sociales

Compromisos de gobierno

Análisis del marco normativo

Marco normativo para Clínicas

Lineamientos de Implementación de Centros de Atención

Temporal COVID-19

Anteproyecto arquitectónico

Revisión del diseño con el usuario (personal médico, trabajadores, Obras Públicas,

Gobierno Municipal y personal del DIF.

Proyecto Arquitectónico

Evaluación Bioclimática

Proyecto Ejecutivo

Planos

Memoria de cálculo

Costos

Caracterización del problema de investigación

Caso de estudio: Clínica Materno Infantil Ricardo Flores Magón

Al norte del municipio de Tepetzotlán se localiza la Clínica Materno Infantil Ricardo Flores Magón, situada en la Calle Josefa Ortiz de Domínguez, en una de las colonias de mayor población en la localidad.



Figura 2. Fotografía satelital.

Fuente: <https://www.google.com/maps>

El conjunto se emplaza en un terreno ascendente delimitado por dos vialidades en la cara corta del polígono. En el lado norte una calle local limita el predio; en este extremo se localiza el edificio existente en el que se encuentra urgencias, quirófanos, consulta externa, administración y hospitalización. Hacia el sur el terreno colinda con una vialidad secundaria que da acceso a dos anexos que se construyeron en diferentes periodos: uno de ellos operó como comedor comunitario y el otro sigue funcionando para vacunación.

El crecimiento de los espacios es producto de la necesidad de ampliar el servicio de atención médica con una limitada disponibilidad de recursos económicos.

En una segunda etapa se realizó el levantamiento topográfico del predio y el levantamiento de las edificaciones existentes, plazas y andadores.

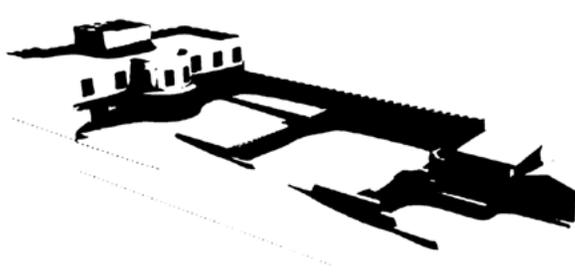


Figura 3. Vista aérea del estado actual

Fuente: Google Earth con manipulación digital

Figura 4. Vista poniente de la Clínica Ricardo Flores Magón.

Fuente: Google Earth con manipulación digital

Análisis del Clima y definición de Estrategias de Diseño Bioclimático

Bajo la premisa de diseñar el proyecto en integración al medio natural, se procedió a realizar el análisis climatológico de la estación meteorológica Represa el Alemán y a analizar los valores a través de la hoja de cálculo Bioclimatic Architectural Tools, obteniendo los siguientes valores horarios de temperatura y humedad para Tepetzotlán con un bioclima Semifrío.

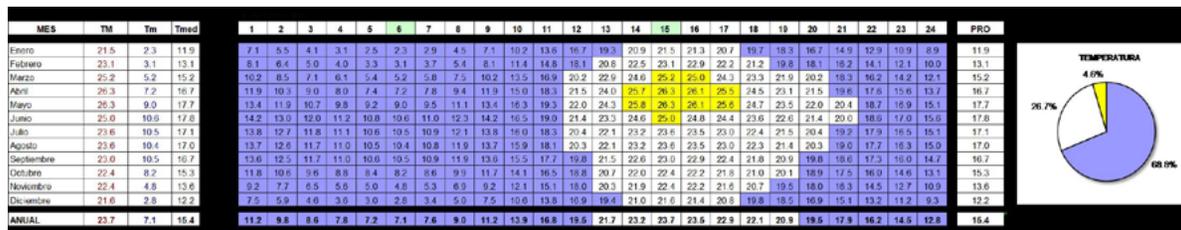


Figura 5. Datos Horarios de Temperatura en °C Bioclimatic Architectural Tools.

Fuente: Fuentes-Freixanet, V. UAM.

Con base en los datos horarios de temperatura y en el rango de confort térmico local, considerando la adecuación climática de los habitantes, el 68,8% de las horas generan una percepción de frío, desde las 20 horas hasta las doce del día; el 26.7% están en confort de las 13 a las 19 horas en promedio y solo el 4.6% genera una sensación térmica de sobrecalentamiento en la primavera de las 14 a las 17 horas.



Figura 6. Datos Horarios de humedad relativa expresada en % Bioclimatic Architectural Tools.

Fuente: Fuentes-Freixanet, V. UAM.

Como se observa en la tabla la humedad relativa, se mantiene predominantemente el confort con un porcentaje anual del 64.9%, en promedio a partir de las 9 horas hasta la 1 de la madrugada. El alto contenido de humedad, superior al 70% se presenta de las 2 a las 8 horas y un bajo porcentaje de humedad inferior al 30% está presente en febrero, marzo y abril, de las 14 a las 16 horas en promedio.

Desempeño Bioclimático de una Escuela de Carlos Leduc en Clima Cálido Sub-Húmedo

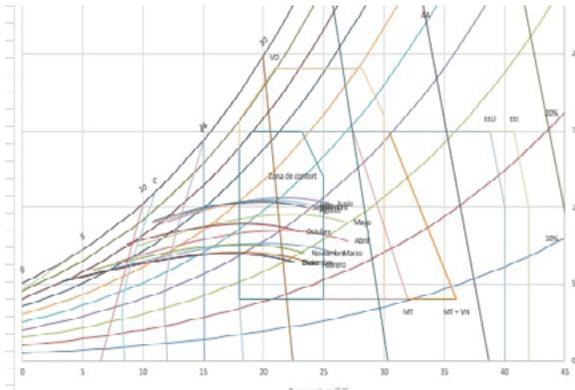


Figura 7. Diagrama Psicrométrico de Zokolay bioclimarq Gómez-Azpeitia, G. UNICOL

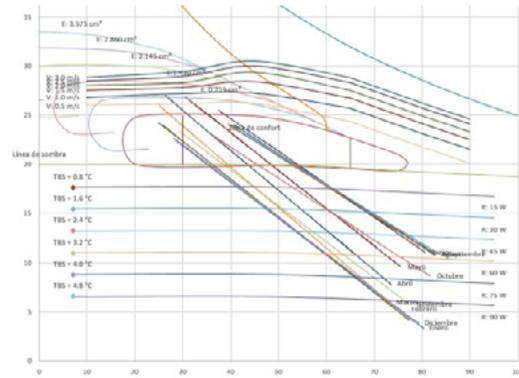


Figura 8. Carta Bioclimática de Olgay bioclimarq Gómez-Azpeitia, G. UNICOL

Se definieron las estrategias de diseño bioclimático de los resultados del análisis de los datos horarios, complementando las decisiones de diseño con las de la Carta Bioclimática y el Diagrama Psicrométrico, presentando las siguientes conclusiones.

La principal estrategia de diseño bioclimático es el calentamiento solar pasivo como se observa en el Diagrama Psicrométrico, con un requerimiento máximo de 110 W/m² día a través de la incidencia de la radiación solar para el mes de enero y un requerimiento mínimo de 47 W/m² día de radiación en promedio para los meses de junio, julio, agosto y septiembre, como lo indica la Carta Bioclimática.

La estrategia de masividad permite reducir las oscilaciones térmicas y estabilizar las temperaturas interiores, siendo la estrategia de ventilación con velocidad de 1 m/s, como se observa en la Carta Bioclimática, únicamente para renovación del aire interior; mientras que la humidificación exterior, a través de vegetación o una fuente permite agregar humedad al aire y disminuir el sobrecalentamiento en el periodo seco de primavera.

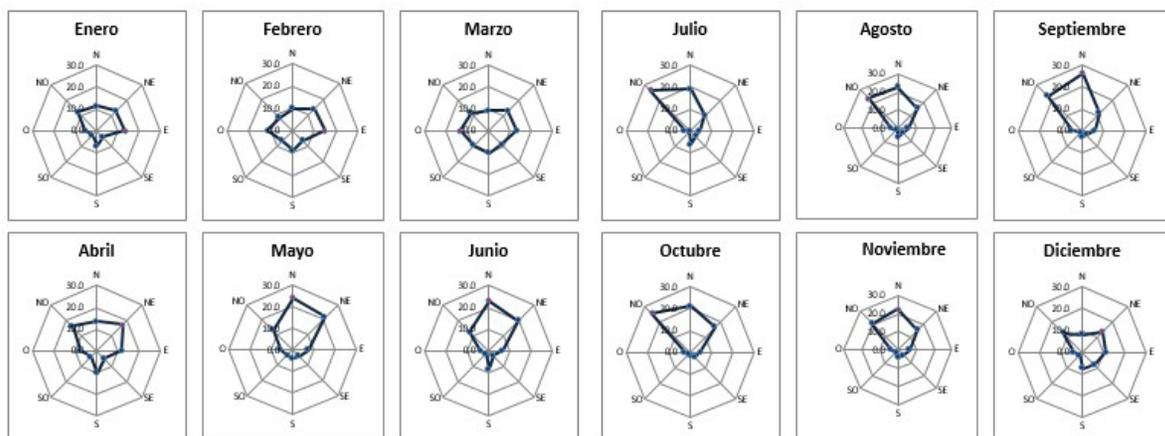


Figura 9. Rosa de los vientos en su valor mensual. Bioclimatic Architectural Tools.

Fuente: Fuentes-Freixanet, V. UAM

El viento dominante se localiza en el rango de orientación NO, N y NE, lo que determina la necesidad de proteger los espacios exteriores y la propia edificación a las pérdidas térmicas por convección, por efecto del viento sobre las superficies.

Las orientaciones restantes permiten cubrir los requerimientos de renovación del aire con un aporte de 1 m/s para la ventilación natural al interior de los locales.

Proyecto Arquitectónico

A partir de la operación del edificio existente se desarrolló un programa de necesidades y requerimientos arquitectónicos desde el punto de vista normativo y de diseño bioclimático, enriquecido constantemente por la experiencia del personal médico y los trabajadores del sector así como por el gobierno municipal a través de la Dirección de Obra Pública, la Dirección del Sistema Nacional para el Desarrollo Integral de la Familia y la Presidencia Municipal, lo cual permitió generar con claridad el programa de necesidades, locales, interrelaciones y diagramas esquemáticos de Diseño.

El resultado del partido arquitectónico se definió por la utilización de patios laterales y la integración de los edificios a través de un cuerpo longitudinal que permitiera reutilizar el existente incorporando los niveles del terreno en las circulaciones interiores.

Con la definición de conceptos y estrategias de Diseño Bioclimático se procedió a monitorear en sitio algunas variaciones climáticas por modificaciones al entorno y a obtener los cálculos y simulaciones necesarias para la evaluación de las decisiones de diseño que permitieron realizar el proyecto ejecutivo.

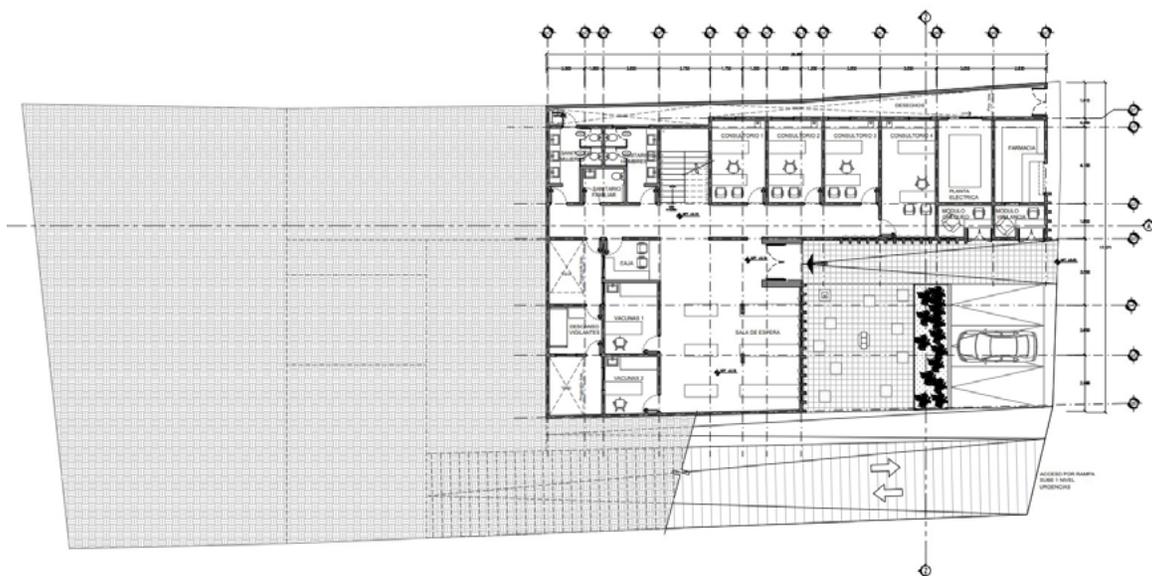


Figura 10. Plano Arquitectónico. Planta Baja

Autoría: Castorena, G., Pérez, J.

La planta baja corresponde al acceso de la Consulta Externa con cuatro consultorios y núcleos sanitarios, dos consultorios para vacunas y zona de refrigeración, caja y área de espera interior que se complementa con una plaza que funciona como área de espera al exterior con su correspondiente área verde, lavatorios, un cubículo para el personal de control de temperatura y el local destinado a la seguridad y vigilancia.

El proyecto abraza la plaza de acceso para, a través de ella, aportar radiación controlada con dispositivos de control solar, iluminación y ventilación natural en todos y cada uno de los locales. Un patio de servicio en el lado oriente permite la incidencia solar por la mañana, la ventilación y la luz natural, al mismo tiempo que aloja las instalaciones y permite el retiro controlado de los desechos.

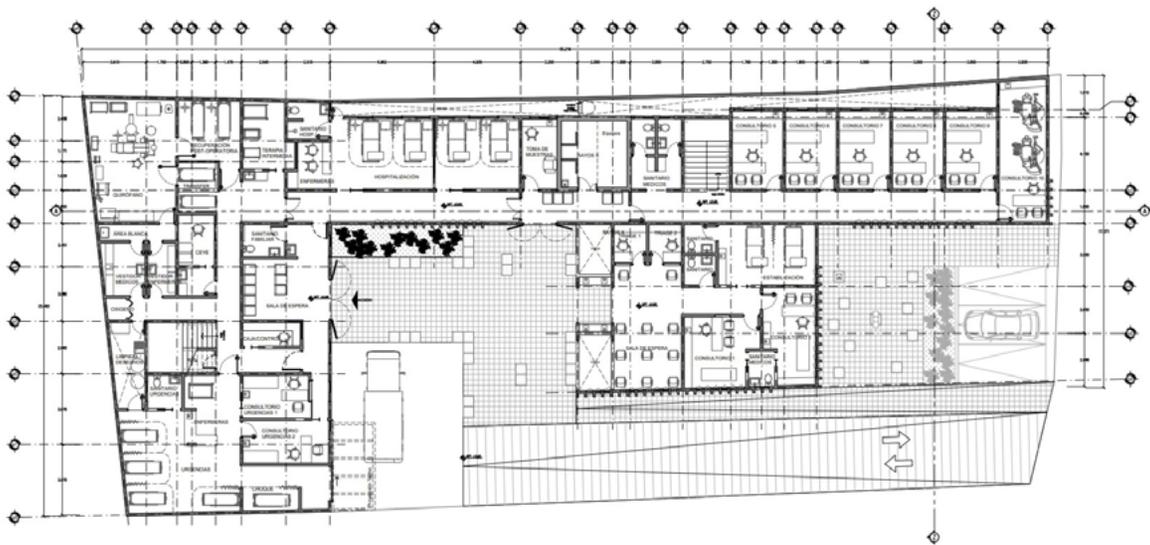


Figura 11. Plano Arquitectónico. Planta Baja.

Autoría: Castorena, G., Pérez, J.

La planta alta se adapta al nivel del edificio existente dando continuidad al edificio antiguo con el nuevo. Una sección del edificio corresponde a Consulta Externa en planta alta, con seis consultorios, con lo que se suma un total de diez en ambas plantas.

Con el cuerpo longitudinal se genera una segunda plaza que permite el acceso independiente a través de la rampa peatonal a Enfermedades Respiratorias. Lo primero que se encuentra son los lavatorios que conducen al área de control con dos módulos. Posteriormente se encuentra el área de espera con el mobiliario integrado al piso para tener la separación de 1.5 m entre cada banca individual de concreto y en un extremo concentrando las instalaciones hidrosanitarias se encuentra el medio baño. Dos consultorios médicos con baño independiente y un área para estabilización de pacientes con dos camas, sanitario y zona de enfermeras.

Todos los espacios cuentan con dispositivos para la ventilación natural para la renovación del aire interior con una tasa de ventilación de 60 litros/segundo/paciente⁵ sin disminuir la temperatura de 21 a 24°C para enfermos de contagio según ASHRAE Fundamental Handbook (2021)⁶; para ello, se permite la ganancia directa de radiación controlada a través de la fachada sur y poniente con la finalidad de incrementar los aportes de temperatura que compensen las pérdidas por convección por el requerimiento de la tasa de ventilación, tal como lo establece el Instituto Mexicano del Seguro Social.

El espacio de Enfermedades Respiratorias presenta una fachada ventilada con dispositivos de control solar en orientación poniente en colindancia con el área de espera y los consultorios.

Para incrementar el efecto Venturi, se colocaron dos patios que funcionan para la ventilación de los tres consultorios de vacunas, con muros a doble altura. Estos patios tienen como acabado un piso de piedra negra que, al calentarse con la radiación, incrementan la aspiración del aire por diferencia de presión para crear un efecto de ventilación ascendente y disipar la concentración de partículas, ya que al toser una persona puede emitir hasta 15,000 partículas según reveló Makoto Tsubokura en un estudio de dinámica de fluidos realizado en el estudio del Instituto japonés Riken Kobe⁷.

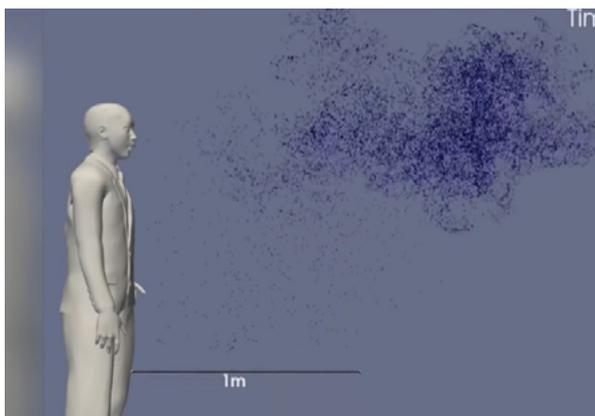


Figura 12. Dispersión de particular al estornudar

Fuente: Video Dispersión de partículas, Tsubokura, M RIKEN

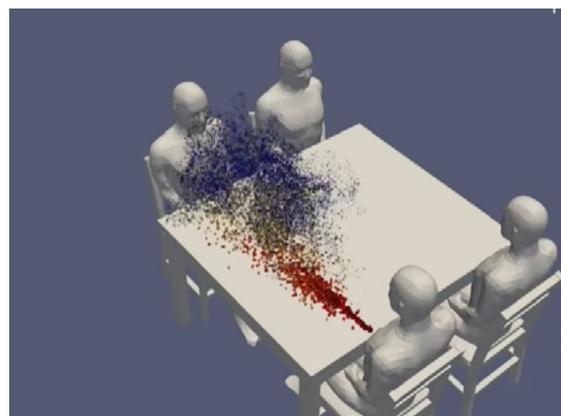


Figura 13. Dispersión de partículas a 1.20m

Fuente: Video Dispersión de partículas, Tsubokura, M RIKEN

El edificio antiguo en planta baja alberga urgencias, dos consultorios médicos y un módulo de enfermeras. En este nivel se localizan los vestidores de médicos, la central de equipo de esterilización, la zona blanca y un amplio quirófano con el área de recuperación y el transfer de pacientes.

5 Gobierno de México. Lineamientos de Implementación de Centros de Atención Temporal COVID-19 y Hospitales Móviles. 2022.

6 ASHRAE. Handbook Editor. 1791

7 FRANCE 24 Español. Así se expanden las partículas de Covid-19 en el aire, según un estudio japonés. 2020.

Colindante a quirófanos y sala de recuperación, se localiza terapia intensiva para menores, el núcleo de enfermeras y el área de hospitalización, con su correspondiente baño.

En la zona pública se localizan las salas de espera: una interior con sanitario para discapacitados y otra al exterior con el mobiliario integrado al pavimento para conservar la distancia de 1.5 m y una zona verde que es el paisaje y privacidad a los pacientes hospitalizados.

En la planta alta se conserva el área administrativa, la sala de juntas, los baños del personal, una cocineta, un comedor al interior y otro al exterior, así como un área para el descanso del personal médico. Colindante con las escaleras se localiza la lavandería con sus patios de servicio y la zona de montacargas.

Simulación del comportamiento bioclimático del edificio en modelos a escala

Las propuestas de diseño bioclimático del proyecto se evaluaron a través de simulaciones virtuales en modelos a escala para observar el recorrido solar en verano e invierno, lo que permitió determinar los sistemas de protección en fachadas sur y poniente.

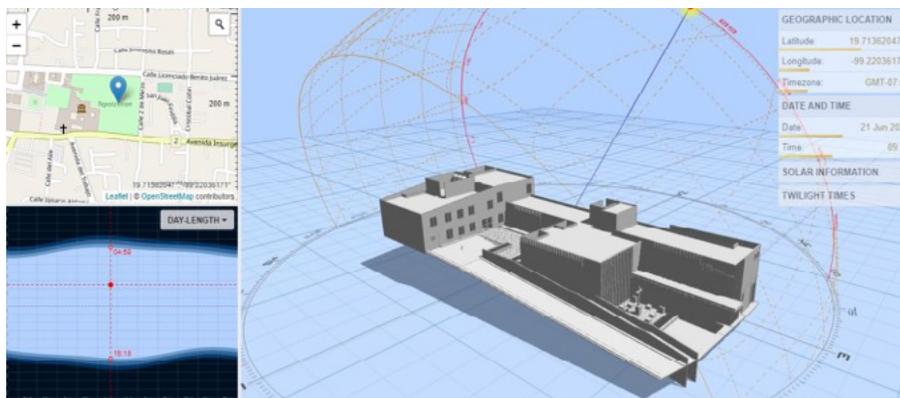


Figura 14. Recorrido Solar en verano

Fuente: Sunpath 3D Marsh, A

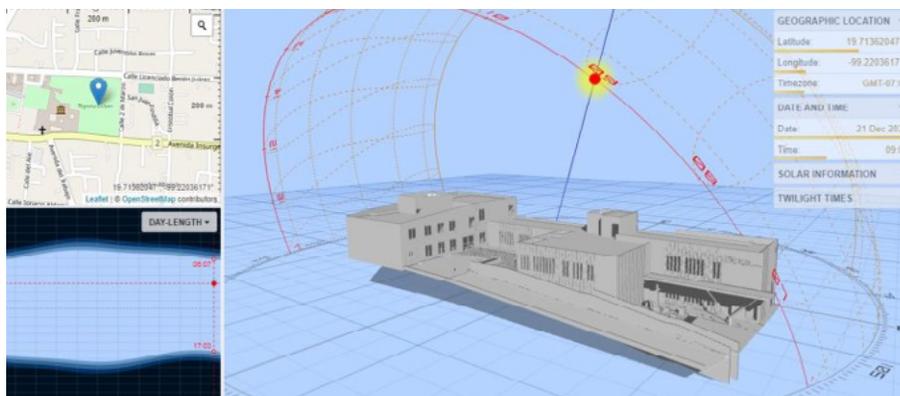


Figura 15. Recorrido Solar en invierno

Fuente: Sunpath 3D Marsh, A

La simulación del comportamiento del viento en las áreas de consulta externa (consultorios médicos) y de enfermedades respiratorias se sumó el recorrido del sol, obteniendo las siguientes estrategias de diseño bioclimático y requerimientos normativos para la ventilación de áreas de espera en espacios del sector salud.

Las estrategias propuestas para la ventilación se modelaron con simuladores de dirección de viento y magnitud de la velocidad del fluido en escala de color.

Las imágenes 10 y 11 muestran en corte la planta baja y alta de los consultorios médicos para consulta externa simulando el flujo del viento proveniente de la orientación este, atravesando en su comportamiento regular el local e indicando el trayecto hasta la salida en orientación oeste.

La representación del comportamiento del viento es a través del túnel de viento y la imagen siguiente muestra las diferentes velocidades -siendo bajas en la escala de color púrpura, medias en color rojo y de mayor magnitud en color amarillo primario.

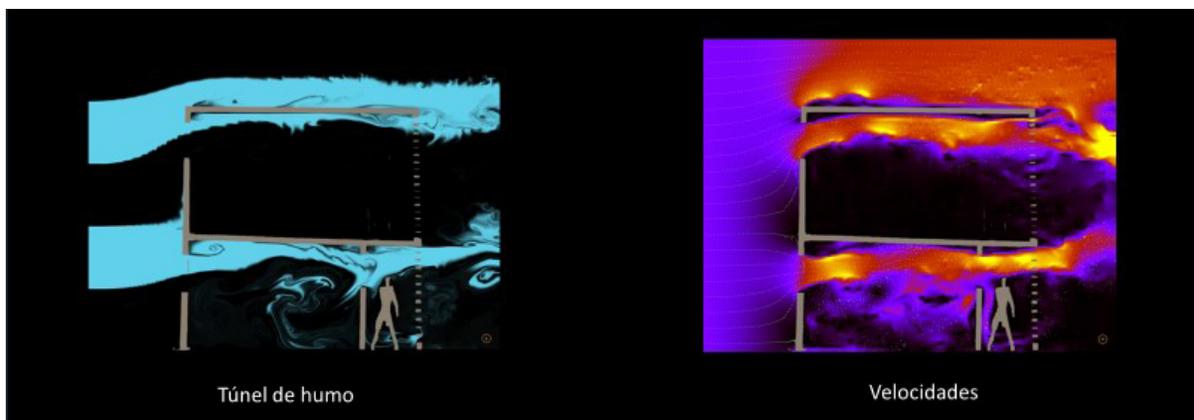


Figura 16. Recorrido del viento en área de consulta externa.

Fuente: Wind Tunnel Free

Figura 17. Velocidad del viento en consultorios.

Fuente: Wind Tunnel Free

La imagen 16 y 17 corresponden al área de enfermedades respiratorias, en ellas se simula las velocidades en el trayecto del viento en planta cuando el viento es canalizado en orientación norte a través de la sala de espera y por el poniente a través de la fachada ventilada; La primera simulación (imagen 16) es con la puerta de consultorios cerrada, mientras que la segunda simulación (imagen 17) se realizó con las puertas abiertas.

El viento proveniente de norte fluye libremente hacia el sur, permitiendo la renovación del viento al interior de los espacios destinados a enfermedades respiratorias.

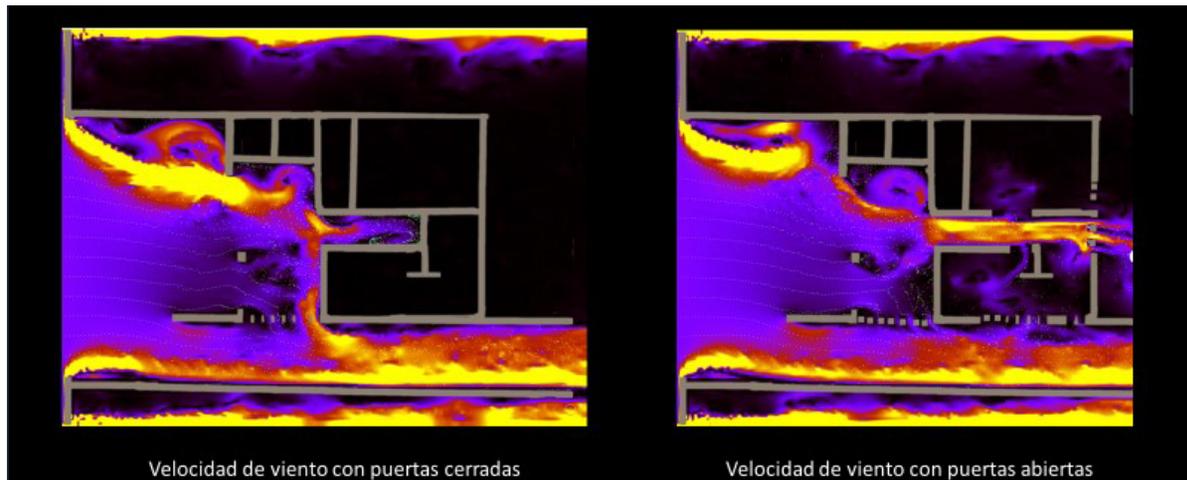


Figura 18. Velocidad del viento en área de enfermedades Respiratorias.

Fuente: Wind Tunnel Free

Figura 19. Velocidad del viento en área de enfermedades Respiratorias.

Fuente: Wind Tunnel Free



Figura 20. Secuencia del recorrido del viento en área de enfermedades respiratorias.

Fuente: Wind Tunnel Free

Conclusiones

El diseño arquitectónico de la ampliación y la construcción de los nuevos edificios se diseñaron bajo el marco normativo, priorizando el pensamiento de diseño en las necesidades y la salud de los usuarios. El proyecto vincula los espacios interiores con los aportes favorables de los elementos del clima a través del esquema de patios, lo que permite la climatización pasiva, el ahorro de energía para la iluminación, la ventilación natural; la separación de las áreas de circulación negras, grises y blancas.

El proyecto incluye un patio de servicio en el lado oriente del predio destinado para las instalaciones y la disposición temporal de desechos hospitalarios.

La premisa consta de un diseño bioclimático y paisajístico que aporte bienestar para la recuperación a los pacientes y potencialice el espacio de trabajo para el personal médico y administrativo que labora en la clínica.

La reutilización del edificio existente es un factor económico importante en un municipio con escasos recursos. La adecuación bioclimática y la suma de tecnologías ambientales –tales como los colectores solares para el calentamiento de agua y la iluminación natural- generan un ahorro energético y participativo en el uso de energía limpia que reduce los gastos de operación y evita la contaminación de emisiones de CO₂ al ambiente.

Un diseño para la eficiencia energética con sistemas de iluminación natural, con dispositivos de control térmico y fachadas ventiladas funge como sistema de prevención de contagio y mejora la calidad interior del aire.

Particularmente se ha enfatizado el uso de la ventilación natural para la renovación del aire al interior de los espacios, la prevención de contagio en zonas de espera al exterior y la utilización estratégica de la ventilación en el área de enfermedades respiratorias, con la evaluación numérica y las simulaciones digitales de dinámica de fluidos que han sido presentadas en este documento.

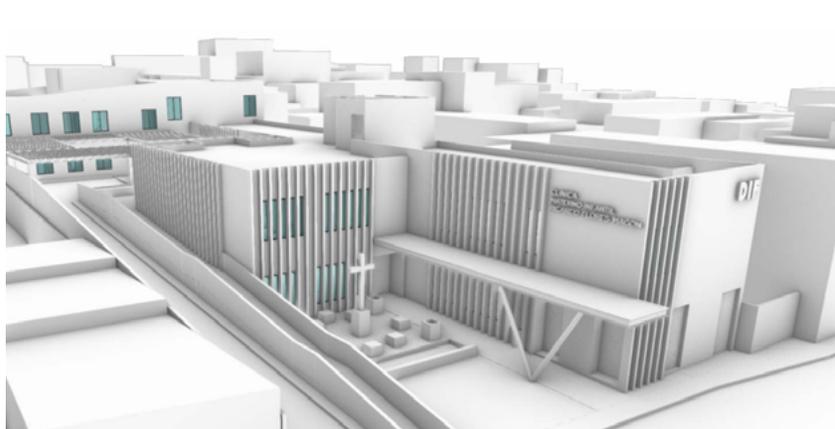


Figura 21. Perspectiva de la Planta de Conjunto del Proyecto de la Clínica Ricardo Flores Magón

Autoría: Castorena, G., Pérez, J. 2020

En síntesis, las conclusiones se enlistan a continuación como:

Optimización de la capacidad máxima de atención con base en los recursos técnicos, económicos y humanos de soporte.

Asegurar la atención separada de pacientes para consulta externa, enfermedades respiratorias, servicio materno infantil y urgencias.

Detección oportuna de enfermos contagiados por COVID-19 para su identificación, aislamiento, estabilización y traslado a unidades especializadas.

Diseñar un edificio bioclimático y sustentable que sea eficiente en el uso de la energía a través de la iluminación natural como sistema priorizado y del consumo económico en iluminación artificial, sistemas de calentamiento solar de agua, climatización pasiva, arquitectura del paisaje para áreas de recuperación en hospitalización y en el manejo de área de espera abiertas. Ventilación a través fachadas ventiladas y ductos de efecto Venturi.

Construir un edificio saludable por el bienestar y la salud de la población más vulnerable.

Bibliografía

ASHRAE. Handbook Editor (1791). Tullie Circle. Atlanta: Robert A. Parsons. Recuperado de: <https://www.ashrae.org>.

De la Rosa, M.C., Mosso, M.A., Ullán, C. El aire: hábitat y medio de transmisión de microorganismos. Observatorio Medioambiental ISSN: 1139-1987 Vol. 5 (2002): 375-402

FRANCE 24 Español. Así se expanden las partículas de Covid-19 en el aire, según un estudio japonés. 2 de noviembre de 2020. 7 de marzo de 2022. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=s5qMzkrDKpM>

Gobierno de México. Lineamientos de Implementación de Centros de Atención Temporal COVID-19 y Hospitales Móviles. S.D., 7 de marzo del 2022. Recuperado de: https://coronavirus.gob.mx/wp-content/uploads/2020/04/Lineamientos_Centros_Atencion_Temporal.pdf

Huguet Pané, Guiomar. Grandes Pandemias de la Historia. National Geographic. 25 de marzo de 2020, 7 de marzo de 2022. Recuperado de: https://historia.nationalgeographic.com.es/a/grandes-pandemias-historia_15178

Revista Chilena de Infectología v.21 n.2 Santiago de Chile, junio 2004. ISSN 0716-1018

Tamayo, Jesús. Pandemias, Arquitectura y Urbanismo. Revistas UNAM. S.D., 7 de marzo de 2022. 57-60. Recuperado de: <http://revistas.unam.mx/index.php/archipielago/article/view/80034/70484>

Intercambiador de Calor Tierra-Aire en Clima Mediterráneo. Periodo Térmico de Transición Frío-Calor

Elizabeth Martínez-Bermúdez¹
Victor Armando Fuentes Freixanet²
Julio César Rincón-Martínez³

1 Universidad Autónoma de Baja California | Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño | Correo: elizabeth.martinez.bermudez@uabc.edu.mx

2 Universidad Autónoma Metropolitana | Área de Arquitectura Bioclimática, Departamento del Medio Ambiente | Correo: ffva@azc.uam.mx

3 Universidad Autónoma de Baja California | Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño | Correo: julio.rincon@uabc.edu.mx

Resumen

La humedad en espacios interiores genera impactos negativos en toda edificación y estos pueden producir efectos negativos en la salud de los usuarios. La OMS estima que esta afecta del 10-50% de los ambientes interiores en Europa, América del Norte, Australia, India y Japón. Mediante la gestión de los niveles de humedad interior y la condensación a través de un control adecuado de la temperatura y la ventilación, es posible controlar la humedad, garantizar una larga vida útil del edificio y una buena calidad del aire interior. El intercambiador de calor tierra-aire (ICTA) es el dispositivo propuesto, junto con la chimenea solar, para conformar un sistema pasivo que regule las condiciones higrotérmicas que permitan reducir los problemas de humedad en espacios interiores de la vivienda de interés social en clima mediterráneo.

Con el análisis psicrométrico del ICTA durante el mes de marzo, se observa que en momentos fríos es cuando se presenta mayor diferencia entre las condiciones higrotérmicas del ambiente exterior con respecto a la salida del ICTA, de 8 °C en temperatura y 30 % de humedad relativa. Respecto al desempeño higrotérmico, el ICTA presenta una estabilidad térmica en las tres profundidades, entre 17 °C y 20 °C, y una ligera diferencia con respecto a la salida del mismo; en los momentos fríos se observa una diferencia de casi 10 °C entre el intercambiador en sus tres profundidades y la temperatura ambiente. Los días con mayores temperaturas, la temperatura en la salida del ICTA se encuentra dentro de la zona de confort (entre 17,7 °C y 22,7 °C para el periodo de transición de frío a cálido), mientras que en días fríos las temperaturas se encuentran cercanas al límite inferior. Por su parte, la humedad relativa se mantiene cercano al 60 % durante todo el mes.

Palabras clave: Intercambiador de calor tierra-aire, Sistema pasivo, Vivienda de interés social, Desempeño higrotérmico.

Abstract

Humidity in interior spaces generates negative impacts on all buildings and these can have negative effects on the user's health. WHO estimates that it affects 10-50% of indoor environments in Europe, North America, Australia, India and Japan. By managing indoor humidity levels and condensation through proper temperature and ventilation control, it is possible to control humidity, ensure a long building life and good indoor air quality. The Earth-to-Air Heat Exchanger (EAHE) is the proposed device, together with the solar chimney, to form a passive system that regulates the hygrothermal conditions that allow reducing the humidity problems in interior spaces of social interest housing in a Mediterranean climate.

With the psychrometric analysis of the EAHE during the month of March, it is observed that in cold moments is when there is a greater difference between the hygrothermal conditions of the outside environment with respect to that of the EAHE outlet, of 8 °C in temperature and 30% of RH. Regarding the hygrothermal performance, the EAHE presents a thermal stability in the three depths, between 17 °C and 20 °C, and a slight difference with respect to output; in cold moments, a difference of almost 10 °C is observed between the exchanger in three depths and the ambient temperature. On days with higher temperatures, the temperature at the exit is in the comfort zone (between 17.7 °C and 22.7 °C for the transition period from cold to warm), while on cold days the temperatures are close to the lower limit. The relative humidity remains close to 60% throughout the month.

Introducción

La humedad en los espacios interiores genera impactos negativos en toda edificación y estos pueden producir efectos negativos en la salud de los usuarios, ya que existe un fuerte vínculo entre la humedad en los edificios y el crecimiento de moho y las enfermedades respiratorias asociadas en relación con la calidad del aire interior en los hogares (Singh, Yu, and Kim 2010). La combinación de hongos y poblaciones de esporas con diversos factores ambientales como la humedad, la temperatura y la luz, generan en la edificación lo que se denomina biodeterioro (Restrepo et al. 2007). De igual manera, diversos tipos de hongos generan micotoxinas, las cuales constituyen un problema severo para la salud humana. Las condiciones climáticas de cada ciudad, pueden propiciar el aumento en los problemas de humedad en los espacios interiores por ello es necesario identificar y considerar cuáles son los factores climáticos que pueden afectar las condiciones internas.

La OMS (2009) estima que la presencia de humedad en interiores afecta del 10-50% de los ambientes interiores en Europa, América del Norte, Australia, India y Japón; indica, además, que hay ciertos entornos, como valles o zonas costeras, en los que las condiciones de humedad son más severas que los promedios nacionales. Tanto la humedad como el crecimiento del moho pueden ser particularmente frecuentes en viviendas mal mantenidas, que se caracterizan por ser las de bajos recursos, por lo que se debe dar prioridad a remediar "las condiciones que conducen a la exposición adversa para evitar una contribución adicional a la mala salud en las poblaciones que ya viven con una mayor carga de enfermedad" (World

Health Organization, 2009). Al cumplir con los siguientes tres objetivos es posible controlar la humedad, garantizar una larga vida útil del edificio y una buena calidad del aire interior: 1) controlar el agua líquida, 2) gestionar los niveles de humedad interior y la condensación mediante un control adecuado de la temperatura y la ventilación, y 3) seleccionar materiales y diseños de ensamblaje higrotérmicos que minimicen el crecimiento de moho y otros problemas de humedad (World Health Organization 2009).

Considerando lo anterior, la investigación propone un sistema pasivo para clima mediterráneo que permita regular las condiciones higrotérmicas al interior de los espacios y que a su vez favorezca la ventilación, de manera que se reduzcan los problemas de humedad en las viviendas, principalmente de interés social. El hecho de que sea un sistema pasivo, se debe a la preocupación global por disminuir el consumo de energías convencionales y a la búsqueda de soluciones al alto consumo de estas por parte de los equipos de climatización, así como a la contaminación en general que genera la industria de la construcción, la cual representa del 30 al 45% de la demanda global de energía (Santamouris and Kolokotsa 2013). Utilizar sistemas pasivos juega un papel importante en la reducción de la demanda de energía de las edificaciones, representan una reducción de costos ya que requieren un mantenimiento mínimo, y reducen el impacto al entorno (Duraković, 2020).

Como parte de las estrategias específicas de diseño pasivo, se consideró el intercambiador de calor tierra-aire (ICTA) como uno de los dispositivos principales del sistema propuesto, junto con la chimenea solar, sin embargo, este último no se analiza en el presente documento.

Los intercambiadores de calor tierra-aire— EAHE o EAHX por su nombre en inglés: earth-to-air heat exchanger (Bordoloi et al, 2018; Khabbaz et al, 2016) — se pueden encontrar en la literatura también como intercambiador de calor aire-suelo, túnel tierra-aire, sistema de tubería enterrada o túnel de aire subterráneo (Khabbaz et al. 2016), y de manera coloquial también se les conoce como pozos canadienses. Estos se han utilizado a lo largo de la historia remontándose hasta el año 3 000 a.C. donde los arquitectos iraníes utilizaban túneles de aire subterráneos para la climatización de las edificaciones (Bordoloi et al. 2018). Un concepto similar se empleó por los persas y griegos en la era precristiana, y en el siglo XVI se reportaron construcciones que utilizaban cavidades naturales (Santamouris and Asimakopolus 1996).

El funcionamiento del intercambiador se basa en los mecanismos de transferencia de calor que se presentan en el suelo, siendo la conductividad térmica y la capacidad calorífica los parámetros principales que influyen en el comportamiento térmico del suelo (Santamouris and Asimakopolus 1996). El principio de funcionamiento del ICTA consiste en utilizar la tierra como disipador de calor, y se utiliza comúnmente en lugares cálidos como sistema de enfriamiento pasivo; sin embargo, el uso propuesto del sistema al que se refiere la investigación, consiste en utilizar el intercambiador como dispositivo de pérdida de humedad del aire, de manera que el que ingrese al espacio sea aire seco, al promover la temperatura de rocío al interior de los ductos, debido a la diferencia de temperatura entre el aire y la temperatura del suelo, a efecto de condensar cierto porcentaje de humedad relativa del aire entrante.

El presente documento tiene como objetivo mostrar los primeros avances de la investigación denominada Sistema pasivo para reducir los efectos de humedad en viviendas de interés social en clima mediterráneo, que se desarrolla dentro del Programa de Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma de Baja California; se centra en el comportamiento higrotérmico del ICTA durante el periodo de transición térmico de frío a calor, específicamente en el mes de marzo 2021.

Desarrollo de la investigación

Descripción del ICTA

El ICTA analizado consiste en un sistema de circuito abierto conectado a una habitación en planta alta en una vivienda de interés social ubicada en el sector Noreste de la ciudad de Ensenada, Baja California, la cual tiene un clima mediterráneo y, de acuerdo con la clasificación García (2004), se considera del tipo BSKs, que se describe como seco templado con lluvias en invierno, con verano seco y cálido e invierno húmedo, lluvioso y frío (IMIP 2009). La superficie de terreno total destinada para el intercambiador fue de 7,00 m², ya que al ser una vivienda de interés social es importante destinar la mayor cantidad de superficie para las diferentes necesidades de los usuarios, por lo que se procuró que el sistema propuesto fuera lo menos invasivo y ocupara el menor espacio posible. El ICTA está conformado por tubería de PVC de 0,10 m de diámetro con un diseño en serpentín horizontal colocado en tres niveles, que inicia a 1,50 m de profundidad y tiene una separación de 0,50 m entre cada uno; cuenta con una longitud total de 50,00 m aprox. A la tubería se le dio la pendiente mínima de 2% para dirigir el agua generada por condensación mediante un sistema de dren que consiste en puntos de desagüe en el lecho bajo del tubo en la parte más baja de la pendiente en cada una de las profundidades, tal como lo recomiendan Santamouris & Asimakopoulus, (1996). La inyección del aire al interior se logró por medio de ventilación por diferencia de temperaturas a través de una chimenea solar ubicada sobre la cubierta del espacio experimental, las características de dicha chimenea no se consideran para el presente avance de investigación, sin embargo, forma parte fundamental de la investigación. La entrada del intercambiador se ubicó a 1,40 m sobre el nivel de banqueta, y se le colocó protección contra la lluvia; además, se le colocó tela mosquitera tanto en la entrada como en la salida del ICTA, como protección contra insectos. El trayecto vertical de la tubería entre la salida del sistema al nivel de suelo y la entrada en la recámara, fue aislado térmicamente por medio de un cajillo de tres caras con hoja de poliestireno extruido, espuma de poliuretano expandido y triplay marino de 3/4" con el fin de mantener, en la medida de lo posible, las características higrotérmicas logradas en el nivel -2,50 m del ICTA.

Descripción del monitoreo

Se utilizó el sensor marca Onset modelo U12-012/U12-013 para medir y/o registrar las variables de humedad relativa y temperatura del aire; también se utilizaron sensores TMCx-HD para medir la temperatura de suelo, sondas marca Onset modelo S-THB-M002/008 para medir temperatura y humedad relativa en ductos y la micro-estación marca Onset modelo H21-USB para registrar la información de las sondas. La recolección de los datos medidos se llevó a cabo mediante el software HOBOWare (Onset Computer Corporation 2019) versión 3.7.18, desarrollado para dispositivos y data loggers de la misma marca.

Los sensores de temperatura y humedad del aire dentro del intercambiador, se colocaron en cinco puntos estratégicos: 1) En la entrada del sistema, a 1,00 m sobre el nivel de banqueta; 2) al terminar el primer nivel del intercambiador, para observar si hay pérdida de humedad en dicho nivel; 3) al terminar el segundo nivel, para observar si hay aumento de temperatura en el primer recorrido; 4) en el tercer nivel, antes de empezar a subir a la recámara y 5) a la salida del intercambiador. En todos los casos, los sensores se ubicaron al centro geométrico de la sección transversal del tubo de 4". Los sensores de temperatura de suelo se colocaron próximos a los sensores higrotérmicos del ducto con excepción del correspondiente a la profundidad de 1,5 m, el cual, por criterios de longitud del cable, se colocó en el mismo eje que los otros dos sensores. Además, se colocaron sensores en el exterior de la vivienda y en el centro geométrico de la habitación. Debido a que en la investigación la velocidad del aire es la variable que presenta mayor intermitencia el intervalo de medición se estableció en 5 minutos, siendo en el caso de las variables higrotérmicas valores puntuales y promedio en el caso de la velocidad del aire. Para efecto del presente documento, solo se analizaron las variables de temperatura y humedad relativa del ambiente exterior, del suelo, del intercambiador de calor y del espacio interior en el cual se instaló el prototipo. En la figura 1 se muestra el esquema general del ICTA y su posición con respecto a la vivienda, así como la ubicación de los instrumentos de medición.

Análisis de proceso psicrométrico

Como primera etapa del procesamiento de información, los datos obtenidos de temperatura de suelo, condiciones higrotérmicas del ambiente exterior y del ICTA se graficaron en la carta psicrométrica obtenida con base en la presión barométrica de la ciudad de Ensenada (1013,2 hPa), para observar y comprender el comportamiento físico del intercambiador durante el día, en momentos específicos. Para ello se seleccionaron diversos días del mes de marzo, que presentaron condiciones extremas o especiales, como lluvia, nublado, momentos fríos o cálidos; en tres horarios: 6:00 h, 12:00 h y 15:00 h (figura 2).

Tanto en momentos fríos y cálidos de los días del periodo de análisis, la temperatura del suelo se mantuvo en un rango entre 17 °C y 20 °C. En los momentos fríos, la temperatura dentro del intercambiador a la profundidad de 1,5 m se mantuvo entre 3 °C y 10 °C por encima de la temperatura ambiente mientras que, en los momentos cálidos se mantuvo entre 2 °C y 5 °C por debajo de la misma. En los momentos fríos es cuando se presenta mayor diferencia entre las condiciones higrotérmicas del ambiente exterior con respecto a la salida del ICTA, de 8 °C en temperatura y 30 % de humedad relativa. Dentro del comportamiento regular, a

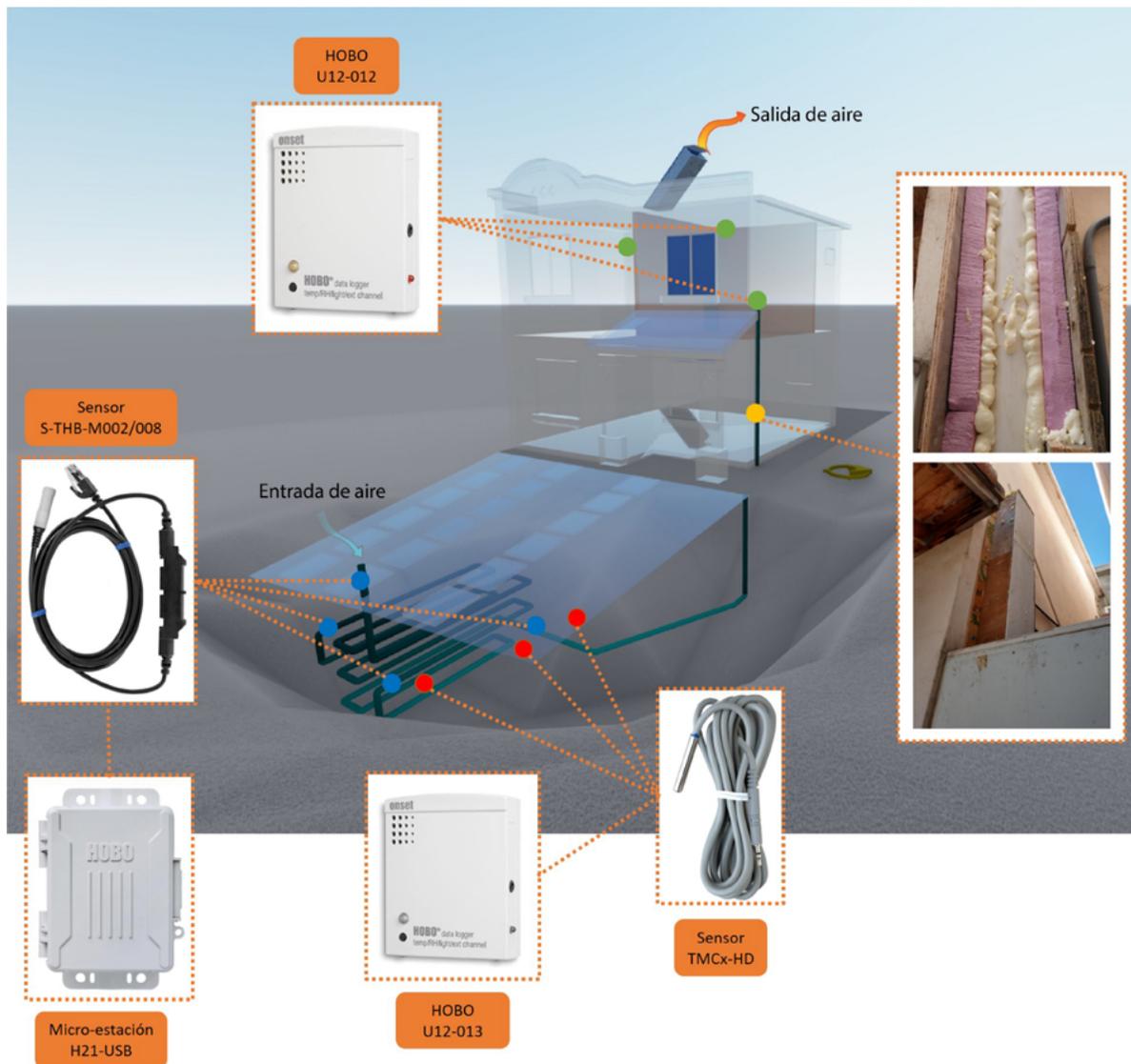


Figura 1. Esquema general del ICTA y ubicación de instrumentos de medición.

las profundidades de 2,0 y 2,5 m se presentó un ligero aumento de temperatura, de aproximadamente 0,5 °C por cada profundidad, con respecto a la profundidad 1,5 m. En la salida del intercambiador, se presentó una pérdida de las condiciones logradas en la profundidad 2,5 m esto debido al proceso de ascensión del ducto, disminuyendo temperatura conforme se reduce la profundidad; sin embargo, se mantuvo mayor con respecto a la temperatura ambiente en los momentos fríos y menor con respecto a los momentos cálidos, es decir, sí se logró una corrección de las condiciones térmicas que ingresaban al sistema.

Con respecto al porcentaje de humedad relativa, en los momentos fríos se presentó una disminución del porcentaje entre la del ambiente y la de la salida del intercambiador, manteniéndose en un rango del 60 %; durante los momentos cálidos analizados, se presentó un ligero aumento en el porcentaje de humedad relativa entre la del ambiente y la de la salida, sin embargo, en esta última se mantuvo de igual manera en un rango dentro del 60%.

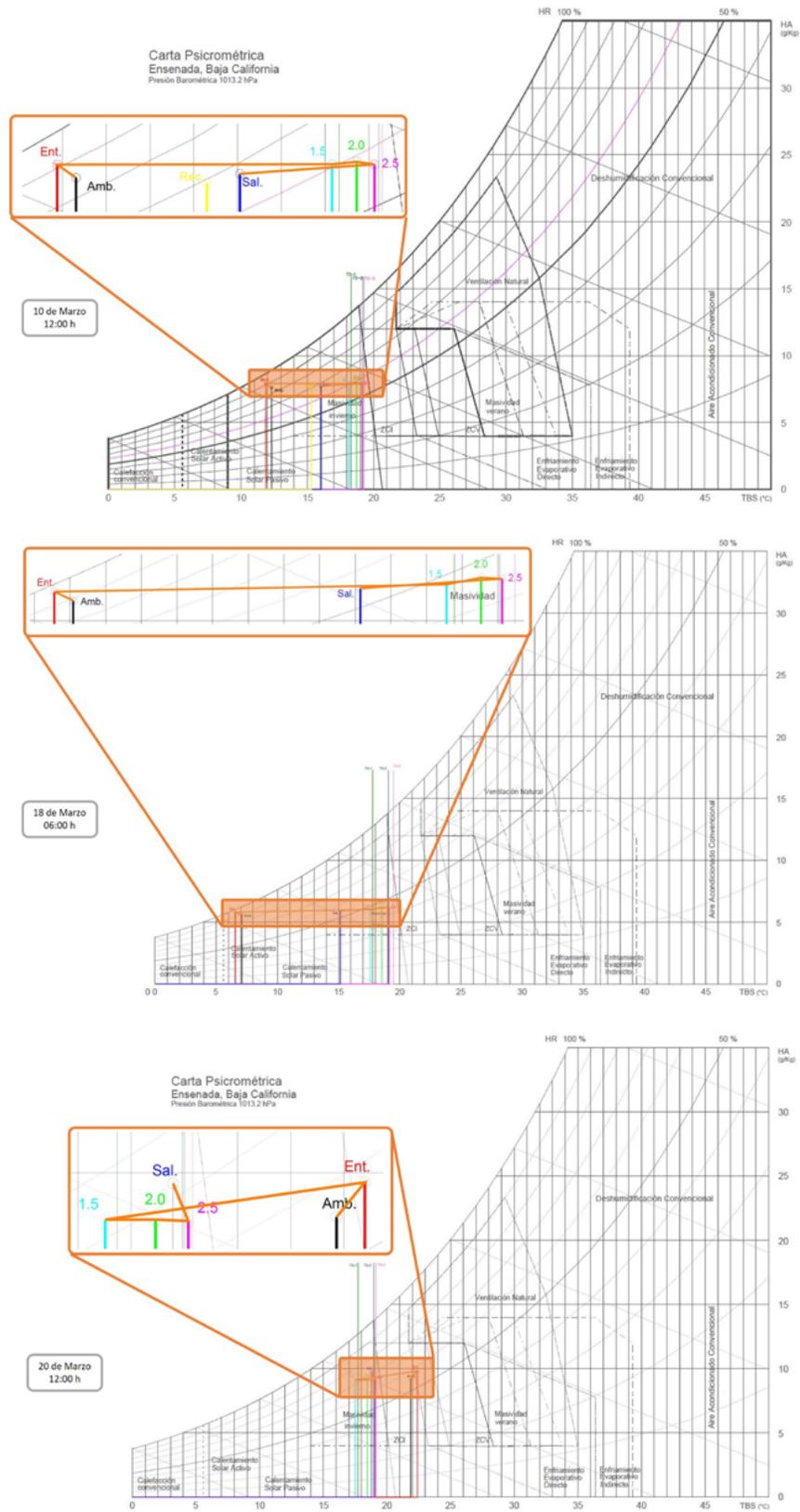


Figura 2. Comportamiento psicrométrico del ICTA.
Arriba: 10 de marzo 12:00 h; Centro: 18 de marzo 06:00 h; Abajo: 20 de marzo 12:00 h.

Como siguiente etapa del procesamiento de datos, se realizó la comparación de las variables de temperatura ambiente, temperaturas del suelo y temperaturas dentro del intercambiador en sus tres profundidades, así como de la entrada y salida del mismo; la comparación se hizo por periodo diario, en escala de 24 horas, y mensual, en escala de 31 días. A la par, se llevaron a cabo las gráficas de comparación de humedad relativa (ambiente, entrada, salida y tres profundidades del intercambiador).

Resultados y discusión

Al analizar las gráficas de temperaturas de diferentes días (figura 3), se observa que la temperatura dentro del intercambiador en las tres diferentes profundidades son similares a las temperaturas del suelo manteniendo un rango entre los 18 °C y 20 °C, por lo tanto, se puede considerar como un comportamiento estable. Se observan condiciones similares entre el ambiente exterior y la entrada del intercambiador durante todo el día, mientras que en los momentos fríos se observa una diferencia de casi 10 °C entre el intercambiador, en sus tres profundidades y la temperatura ambiente, presentó una menor diferencia en días con temperaturas más cálidas (20 de marzo).

A la salida del intercambiador, se observa una variación con respecto a la profundidad 2,5 m, sin embargo, en los diferentes días, se puede considerar un comportamiento estable con respecto a la temperatura del ambiente exterior.

Posterior al análisis diario, se analizó el desempeño del intercambiador en un periodo mensual, mediante la graficación de los datos en un lapso de 31 días, correspondientes al mes de marzo.

A pesar de que las temperaturas a la salida del intercambiador se encuentran por debajo de la zona de confort anual, la cual se encuentra entre los 20,5 °C y 25,5 °C (Huerta 2018), esta se encuentra cercana al límite inferior de la misma, en los días con bajas temperaturas, y en días con temperaturas mayores, la temperatura de salida alcanza el rango de la zona de confort durante un periodo de tiempo. Sin embargo, al analizarla con respecto a la zona de confort para el periodo de transición de frío a cálido (figura 4), establecida por Rincón-Martínez et al. (2020) entre 17,7 °C y 22,7 °C, la temperatura en la salida del intercambiador se encuentra dentro del rango, principalmente en los días con mayores temperaturas, incluso en los días fríos a pesar de que no se alcanza el rango, las temperaturas se encuentran cercanas al límite inferior.

En ella se observa la estabilidad térmica del suelo y del intercambiador de calor en sus tres profundidades. En la temperatura de salida, se observa una diferencia con respecto a la profundidad de 2,5 m.

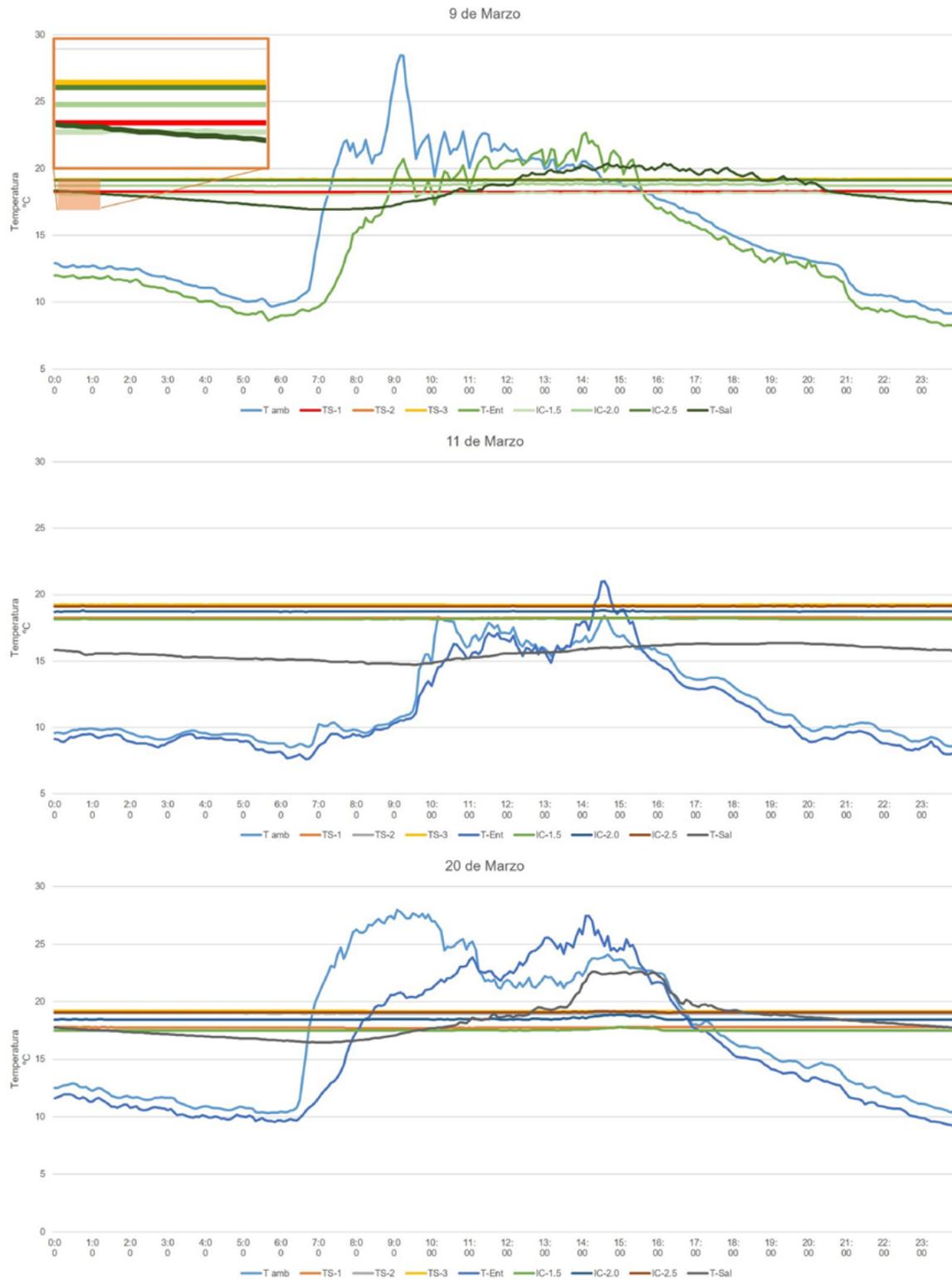


Figura 3. Gráficas diarias de comparación de temperatura. Arriba: 9 de marzo. Centro: 11 de marzo. Abajo: 20 de marzo.

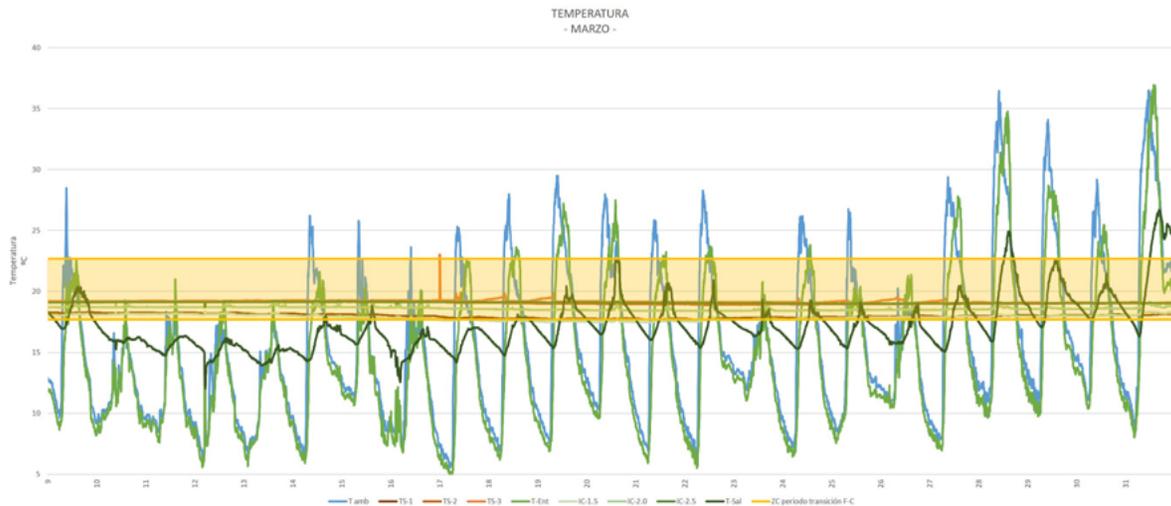


Figura 4. Gráfica mensual del comportamiento térmico del ICTA.

Con respecto al análisis de la humedad relativa (figura 5), en el análisis diario se observa un comportamiento general similar al comportamiento de la temperatura; la humedad relativa del ambiente exterior y la entrada del intercambiador es similar, mientras que en las tres profundidades del intercambiador el comportamiento es relativamente estable durante todo el día. Y de igual manera, se observa una variación entre la profundidad 2,5 m y la humedad relativa a la salida, sin embargo, mantiene un rango cercano al 65 % en los diferentes días, siendo una diferencia significativa con respecto a la humedad relativa del ambiente exterior, principalmente durante el periodo nocturno de hasta 30 %.

En el análisis mensual del desempeño higríco (figura 6), se observa que a pesar de presentar porcentajes de humedad relativa ambiente por encima del 95 %, en el ICTA se mantiene en un rango entre 45 y 70 %, manteniendo este rango a la salida del mismo.

Al ser un periodo breve de monitoreo no se puede señalar si el funcionamiento es el óptimo para el objetivo de la investigación, sin embargo, con los datos obtenidos se observan condiciones higrotérmicas adecuadas debido a que se encuentran dentro o cercanas a la zona de confort, y en rangos que cumplen con las recomendaciones generales para el control de humedad.

Conclusiones

En este avance de investigación, se presentan las condiciones de operación y los resultados del análisis del desempeño higrotérmico, correspondientes al mes de marzo, del ICTA. Tal desempeño es conforme a lo esperado, por la revisión bibliográfica y el entendimiento de

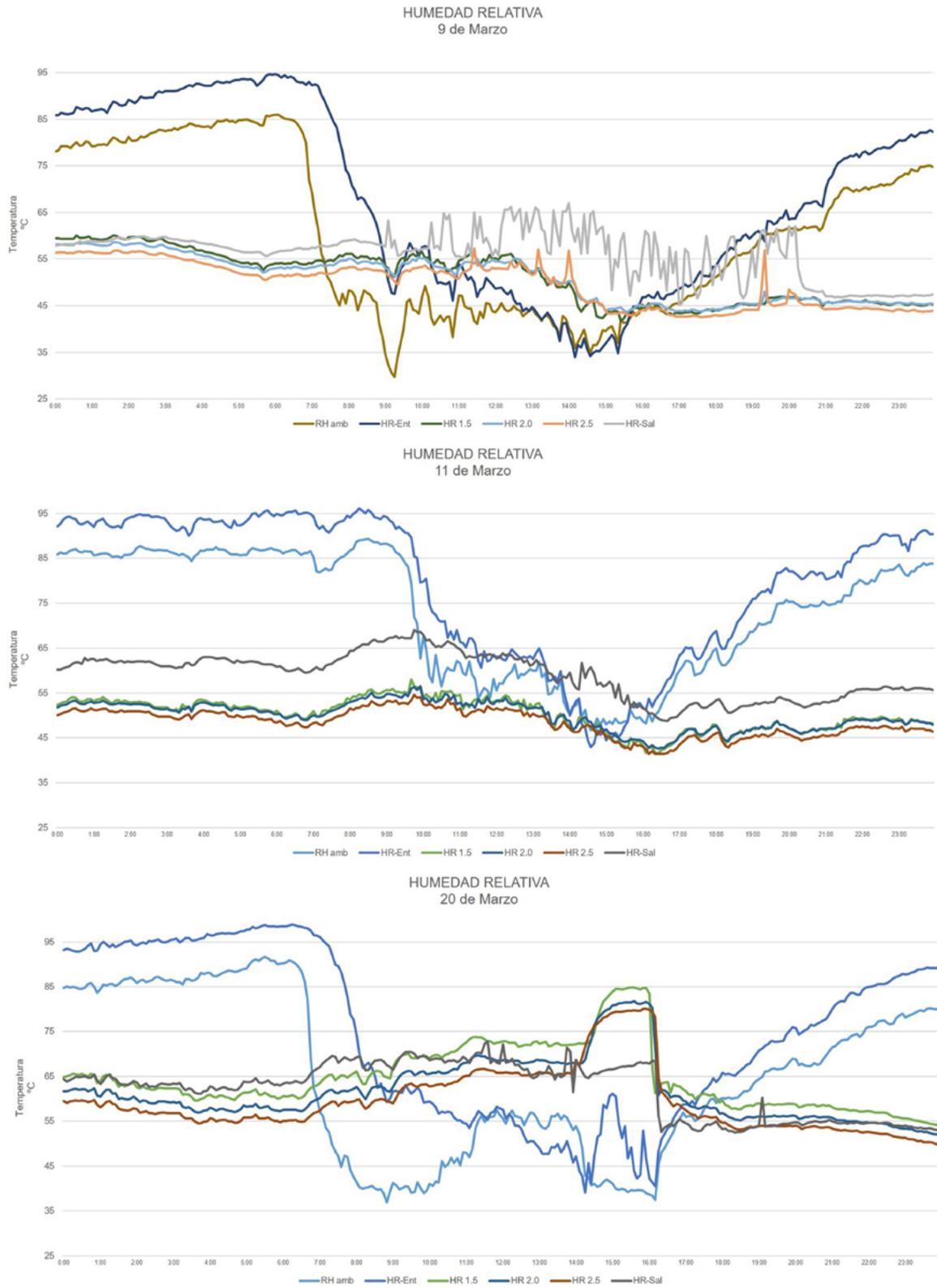


Figura 5. Gráficas diarias de comparación de humedad.
Arriba: 9 de marzo, centro: 11 de marzo, abajo: 20 de marzo.

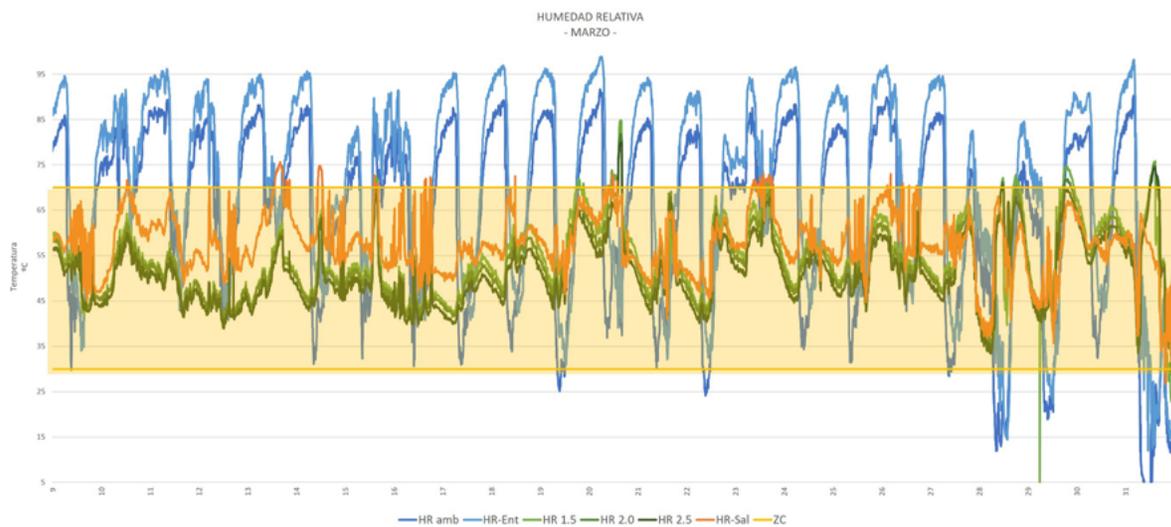


Figura 6. Gráfica mensual del comportamiento higrómico del ICTA.

los procesos psicrométricos que intervienen en su funcionamiento. La temperatura del suelo es adecuada para propiciar el punto de rocío dentro del ducto y por ende la condensación, a la profundidad de 1,50 m; mientras que en las dos profundidades restantes se logra una regulación térmica. Sin embargo, es necesario considerar que es la primera etapa de funcionamiento, siendo el periodo frío el de mayor interés, debido a que las condiciones climáticas (bajas temperaturas y la presencia de lluvias) propician la proliferación de humedad y hongos en los espacios interiores.

Es importante destacar que el avance se enfoca en un periodo de un mes, ya que el monitoreo del sistema pasivo se llevará a cabo de marzo de 2021 a febrero de 2022, periodo en el que también se analizará el desempeño del ICTA con respecto al flujo de aire, así como el desempeño de la chimenea solar como dispositivo para propiciar la inyección de aire.

Referencias bibliográficas

Bordoloi, Namrata, Aashish Sharma, Himanshu Nautiyal, and Varun Goel. 2018. "An Intense Review on the Latest Advancements of Earth Air Heat Exchangers." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89(March):261–80.

García, E. 2004. *Modificaciones Al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. 5ta ed. Instituto de Geografía-UNAM.

Huerta, Yuriria. 2018. "Manual de Diseño Pasivo Para El Arquitecto: Un Reflejo Del Análisis Climático y Bioclimático de Ensenada, Baja California." Universidad Autónoma de Baja California.

IMIP. 2009. "Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Ensenada 2008-2030."

Khabbaz, Mohamed, Brahim Benhamou, Karim Limam, Pierre Hollmuller, Hassan Hamdi, and Amin Bennouna. 2016. "Experimental and Numerical Study of an Earth-to-Air

Heat Exchanger for Air Cooling in a Residential Building in Hot Semi-Arid Climate.” *Energy and Buildings* 125:109–21.

Onset Computer Corporation. 2019. “HOBOWare.”

Restrepo, Avendaño, Carlos Alberto, Londoño Echeverri, Carlos Andres, Vela Rosero, and Miguel Angel. 2007. “Pathologies by Humidity in the Materials for Construction.” *Scientia Et Technica Scientia et Technica Año XIII* 36(36):343–47.

Rincón-Martínez, J. C., K. E. Martínez-Torres, M. E. González-Trevizo, and F. Fernández-Melchor. 2020. “Modelos Matemáticos Para Estimar El Confort Térmico Adaptativo En Espacios Interiores: Un Estudio En La Transición Térmica de Ensenada, B.C.” *Ingeniería Revista Académica de La Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán* 24(1):1–17.

Santamouris, M., and D. Asimakopolus. 1996. “Passive Cooling of Buildings.” James & James.

Santamouris, M., and D. Kolokotsa. 2013. “Passive Cooling Dissipation Techniques for Buildings and Other Structures: The State of the Art.” *Energy and Buildings* 57:74–94.

Shaw, B. D. 2017. *Uncertainty Analysis of Experimental Data* with R. Taylor & Francis.

Singh, Jagjit, Chuck Wah Francis Yu, and Jeong Tai Kim. 2010. “Building Pathology, Investigation of Sick Buildings - Toxic Moulds.” *Indoor and Built Environment* 19(1):40–47.

Ürge-Vorsatz, Diana, Luisa F. Cabeza, Susana Serrano, Camila Barreneche, and Ksenia Petrichenko. 2015. “Heating and Cooling Energy Trends and Drivers in Buildings.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41:85–98.

World Health Organization. 2009. *Who Guidelines for Indoor Air Quality: Dampness and Mould*. edited by E. Heseltine and J. Rosen. Germany: WHO Regional Office for Europe.

Nota: Todas la imágenes son de elaboración propia.

Bahareque de Bambú. Propuesta Modular en Base al Desempeño Térmico y Mecánico

Carlos Javier Esparza López¹

Alfonso Cabrera Macedo²

José Saúl Torres Moreno²

Edwin Israel Tovar Jiménez³

Miguel Fernando Elizondo Mata²

1 Universidad de Colima | Facultad de Arquitectura y Diseño
Correo: cesparza@ucol.mx

2 Universidad de Colima | Facultad de Arquitectura y Diseño

3 Universidad Iberoamericana León | Departamento de Arquitectura y Diseño

Resumen

El uso de sistemas tradicionales en la arquitectura moderna regularmente es asociado a las clases menos favorecidas ya que se consideran sistemas constructivos efímeros, endebles, inseguros y sin ventajas tangibles. Sin embargo, en últimas fechas, la edificación ha buscado la reinterpretación de estos sistemas en función de ciertas ventajas climáticas y de adecuación al entorno donde se implantan. En esta investigación, el bahareque, como sistema tradicional, es estudiado a partir de su mejora utilizando al bambú como un material resistente y duradero. Se presenta una propuesta de sistema modular de panel con un bastidor de bambú y un revestimiento de esterilla de bambú y revoque de mortero a base de tierra-paja. Se realizó un análisis comparativo del desempeño térmico del panel contra un sistema tradicional de tabicón, así como un análisis físico-mecánico del bambú utilizado. Los resultados térmicos indican que las temperaturas superficiales interiores máximas del panel fueron similares a la del tabicón, empero en las temperaturas superficiales mínimas del panel presentó un desempeño de hasta 3° C menor que el tabicón. En un balance global, la temperatura de bulbo seco interior del panel presentó una reducción de 2° C en promedio contra el tabicón. Respecto al módulo de elasticidad del bambú, se realizaron 11 probetas de las cuáles en 8 se tuvieron resultados dando en promedio un módulo de 110,000 kg/cm².

Palabras clave: Bahareque, Guadua Angustifolia, Sistema modular.

Abstract

In modern architecture, vernacular systems are regularly associated with the less favored classes since they are considered ephemeral, weak, insecure construction systems and without tangible advantages. However, recently, the building has sought to reinterpret these systems based on certain climatic advantages and adaptation to the environment where they are installed. In this research, bahareque, as a traditional system, is studied from its improvement using bamboo as a resistant and durable material. A proposal for a modular panel

system with a bamboo frame and a covering of bamboo mat and straw-based mortar plaster is presented. A comparative analysis of the thermal performance of the panel against a traditional wall system was carried out, as well as a physical-mechanical analysis of the bamboo used. The thermal results indicate that the maximum interior surface temperatures of the panel were similarly performed to the wall, however, is the minimum surface temperatures of the panel presented a performance of up to 3° C lower than the wall. In a global balance, the interior dry bulb temperature of the panel presented a reduction of 2° C on average against the partition. Regarding the modulus of elasticity of the bamboo, 11 test tubes were made, of which 8 results were obtained, giving an average modulus of 110,000 kg / cm².

Keywords: Bahareque, Guardia Angustifolia, modular system

Antecedentes

Actualmente el mundo de la construcción de la vivienda se ha volcado a la revalorización de técnicas y materiales constructivos tradicionales; en los países desarrollados utilizan las virtudes de estos elementos con fines bioclimáticos y su uso se ve reinterpretado bajo el estudio de dos conceptos fundamentales: el que abarca el factor bioclimático, sostenibilidad, y por otra parte, aquel que promociona los valores de la conservación del patrimonio construido; para los países en vías de desarrollo, la utilización de estas tradiciones propias de la arquitectura vernácula, deriva en la necesidad de obtener hogares que les resulten accesibles por medio de la autoconstrucción.

Para cada punto geográfico del globo, los materiales y técnicas constructivas tradicionales resultan de lo más heterogéneas, muchas de ellas utilizan la tierra y las fibras naturales como los principales componentes de las estructuras que conforman sus edificaciones. La ponderación de sus cualidades se refleja en numerosos estudios donde se destacan las virtudes de estos materiales atrayendo cada vez más a constructores, dependencias gubernamentales y diversos sectores del gremio a implementarlos como dispositivos o mecanismos de la construcción contemporánea.

Existen numerosas estructuras realizadas con tierra que van desde plataformas piramidales de uso ceremonial en todas las escalas, hasta columnas de diversas secciones; específicamente hablando de muros, algunos de los más reconocidos en el ramo constructivo por su permanencia y presencia, son el adobe y el tapial; sus diferencias radican principalmente en que, el primero se constituye de piezas prismáticas rectangulares unidas por una junta de argamasa elaborada del mismo material y el otro es monolítico, su sistema consiste en el colado de la mezcla que toma la forma del encofrado, ambos con una composición basada en tierra cruda y fibras naturales que favorecen la aglutinación y evitan fracturas en el muro.

Las fibras naturales en algunos casos se hacen presentes en los muros de tierra como protagonistas estructurales, formando tejidos verticales cuyo entramado se asemeja el de las canastas, delimitados por bastidores rectangulares que se recubren por una capa de mezcla fabricada con tierra, esta penetra en cada coyuntura de la trama logrando una correcta su-

jección en módulos de muros que logran una esbeltez significativa frente a los sistemas del adobe y el tapial, logrando de esta forma un menor inversión de material.

Para una visión más específica, Yuste, (2016), señala que, aquellos muros conformados por una estructura o membrana fabricadas de cañas, troncos delgados o fibras entrelazadas que se enmarcan por un marco de madera sobre los cuales, se despliega un revoque de barro crudo, se le llama bahareque (Ver figura 1). Este sistema constructivo se extiende por todo Iberoamérica. Para la comunidad dedicada al estudio de este método, el origen de su tecnología y desarrollo es atribuido a estos países, aunque actualmente, se han documentado técnicas similares en muchas otras latitudes.

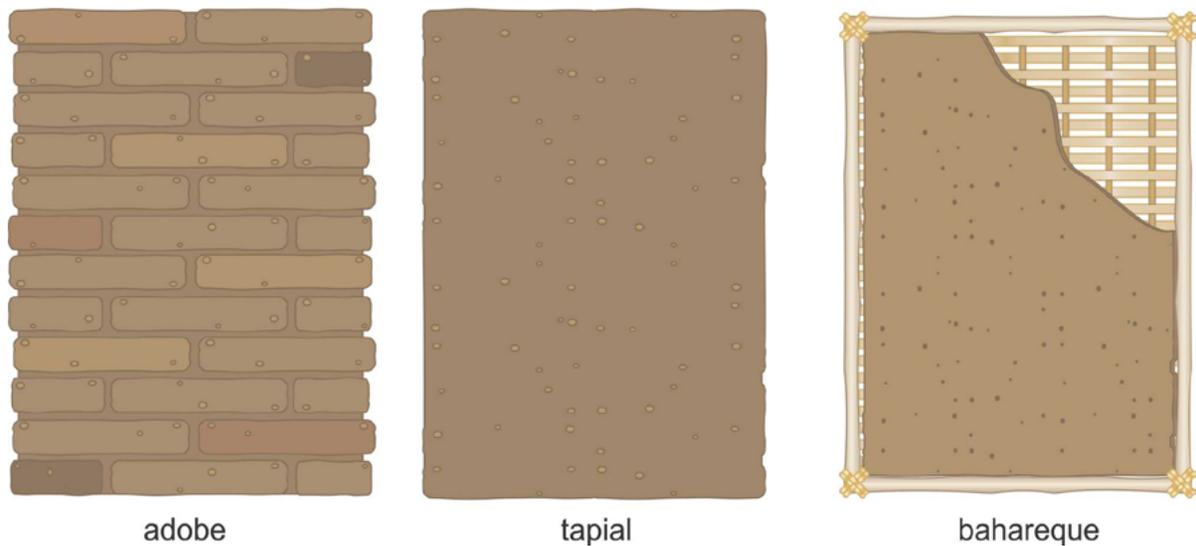


Figura 1. Adobe, Tapial y bahareque. Nota: Los espesores del tapial o el adobe en la zona centro occidental de México pueden variar de los 30 cm hasta un metro, mientras que el espesor de un muro de bahareque se mantiene alrededor de ocho a doce centímetros de espesor.

Como referente a la anterior aseveración, para Guerrero L.F. (2017), el origen del sistema constructivo de bahareque data de seis o siete mil años atrás, cuando las comunidades dejaron atrás el nomadismo para ser sedentarios. En esta nueva etapa se tenían que hacer cargo de los cultivos y rebaños, lo que se exigió una mayor permanencia en el mismo territorio por lo que la construcción de viviendas y de almacenamiento, requería de un método que garantizara la durabilidad de la construcción. Con el tiempo y la estabilidad lograda por estos grupos, ofreció el perfeccionamiento de los procesos de edificación, lo que seguramente propició la observación de las cualidades que ofrecía la adición de barro a la superficie de los muros entramados de bejuco o carrizos para hacerlos más duraderos y aislantes, generándose así la técnica de bahareque.

Por su parte, Derruau (1964), señala que, en Europa la arquitectura en tierra predominó en varias zonas en donde la piedra era difícil de encontrar. La facilidad de manejo de este método constructivo sin la necesidad de agregar cal, impactó de forma especial en el occidente Romano y en Grecia. Las técnicas a las que los antiguos pobladores de estas civilizaciones

acudían eran mayoritariamente tres sistemas evidenciados por su principal material, la tierra, encontrándose en forma del adobe, del tapial y del manteado; este último refiere al mismo método del bahareque descrito por Asencio, (1995), quién ubica temporalmente los inicios de su uso en el periodo neolítico y lo define como una composición de un recubrimiento fabricado con una mezcla de tierra y un agregado vegetal que puede ser paja picada u otro tipo de fibra natural utilizada para rellenar los huecos del entramado de materias vegetales utilizado para muros y techumbres que continuaron empleándose y lograron su perfeccionamiento hasta la época romana imperial, musulmana y edad media, tiempos donde se difunden ampliamente sus virtudes constructivas a muchas más regiones hasta la llegada de la época moderna.

Para casi toda América, al igual que regiones importantes de Asia y África el bahareque resultó un medio constructivo de gran valía bajo las mismas circunstancias de beneficios, el muro estructurado por un entramado de fibras naturales y el recubrimiento de tierra se presenta en diversos materiales, bajo diferentes procesos de elaboración, espesores y acabados que van de acuerdo con cada punto geográfico en el que se hace presente, pero que en principio y concepto siguen siendo muros de bahareque.

En Mesoamérica, específicamente en el país de El Salvador, existe un ejemplo vívido de utilización del bahareque que expone de forma precisa la utilización de este sistema en el 600 d.C. Una aldea llamada Joya de Cerén, conocida popularmente como la Pompeya de América, fue sepultada por un promedio de cinco metros ceniza arrojada por el volcán Loma Caldera, afortunadamente, el suceso no presentó bajas humanas, pero la solidificación del material volcánico mantuvo la geometría de las construcciones y enceres en moldes minerales que conservaron las características morfológicas del bahareque, Carazas (2014). Este fenómeno de conservación por hormas pétreas da luz a vestigios del uso del bahareque en los muros de múltiples viviendas. Los constructores de estas casas cimentaban sobre una plataforma de tierra compactada en la que se anclaban columnas de madera, de las cuales se sujetaba la estructura del muro y soportaban los techos de madera y zacate, Guerrero L.F. (2017). Este descubrimiento arqueológico es el único en América que permite revivir en un alto porcentaje las antiguas construcciones de arquitectura de tierra usadas por los mayas asentados en esta región.

Las razones por las que, la mayoría de las veces no se encuentran evidencias físicas de vestigios de la arquitectura de bahareque, es porque las características de los materiales con los que se fabrica requieren de acciones de mantenimiento constante para su conservación. El paso del tiempo, la intemperie y el desuso o abandono, propician que los patrones de esta arquitectura se fueran perdiendo por erosión poco a poco. Para México este panorama de deterioro no es ajeno, son escasos los datos materiales que permiten datar el origen de esta práctica arquitectónica tradicional. A pesar de ello y de acuerdo con Bernal (1984), subsisten evidencias que indican la presencia del sistema constructivo que datan de 1700 años a. C. ubicados en la Época Preclásica donde las tribus construían sus viviendas en agrupaciones no definidas por una traza regular y cuyo sistema constructivo se muestra como vestigios claros del bahareque.

Para muchos puntos del país, el bahareque constituyó un sistema constructivo de alta eficiencia por sus cualidades constructivas, térmicas y apariencia. Aplicando este concepto al caso local, en el estado de Colima la arquitectura de bahareque se identifica por la diversificación de elementos que la constituyen, su función divisoria específica y la zona geográfica a la que pertenecían. Estos rubros se especifican en función de que Colima es un estado cuya franja sur colinda con el Océano Pacífico, proporcionando un clima tropical, situación que cambia conforme se avanza en oposición al mar, hacia el centro y norte, donde la temperatura disminuye hasta llegar a la franja montañosa de la Sierra Madre y los Volcanes, cuyo contexto climático se vuelca disímil al de la costa.

Es bajo la primicia anterior que, el muro de bajareque se presenta en diferentes esquemas adaptados a las cuestiones climáticas, en la costa, para la estructura del entramado de fibra vegetal se utilizan bejucos o carrizos propios de los manglares, o venas de la hoja de palma, por citar algunos ejemplos y que, por lo general, estos armazones no son recubiertos total o parcialmente por tierra, lo anterior, para permitir el paso de los vientos y filtrar el aire caliente del interior de las viviendas. Para el centro y el norte del Estado el bajareque se compone de materiales propios de la zona y se revelan por un recubrimiento de tierra, procurando vanos ya sea en los muros o en las cubiertas para permitir el paso de la luz y refrescar, según sea el caso, el interior del espacio.

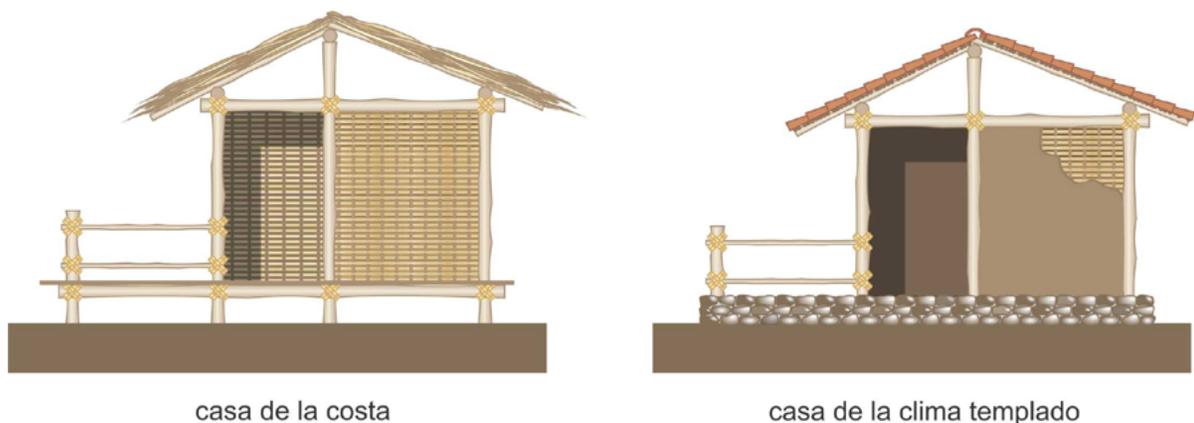


Figura 2. Bahareque de la costa y bahareque de clima templado. Nota: Puede apreciarse que en la casa de clima templado los muros aparecen con un repellado de tierra que cubre el entramado, pero para ambas, estos muros son protegidos de la humedad de la lluvia con techumbres que cubren en su totalidad la estructura y de la humedad baja, separando, por distintos medios la casa del suelo.

Así como los materiales de la estructura interna del bahareque pueden variar de acuerdo con su punto geográfico de construcción, con el tiempo, los materiales de estas estructuras pueden ser sustituidos por otros elementos como el alambre de púas, láminas delgadas de madera procesada de forma industrial, o cualquier elemento que permita la adherencia de la tierra y que se permita trabajar como un tejido. Paralelamente a estas recientes nociones, surgen investigaciones e implementaciones del sistema como un elemento de construcción alternativo que no abona a la crisis energética ni a la contaminación producida por los mate-

riales convencionales de construcción, proponiendo para la estructura interna la utilización del bambú como la materia prima idónea en la fabricación de este módulo constructivo.

El bambú guadua es un tipo de bambú usado en la construcción tradicional, como en algunos estados del país donde esta especie se genera de forma natural y que es parte de los materiales utilizados para la elaboración del bahareque y en otras muchas aplicaciones. En concordancia con Fuentes y Marcó (2013), debido a sus propiedades de tamaño, peso, flexibilidad, solidez y su velocidad de crecimiento el bambú se concibe como un material de amplio espectro para la construcción, de hecho, por su gran relevancia edificatoria, en Colombia existe una normativa estructural para la construcción con el bambú guadua, la Norma Sismo Resistente, NSR-10 Título G. 1 donde se incluye información referente a sismoresistencia extraída del libro: Gilfredo Carazas, A., Rivero Olmos, A., (2002), BAHAREQUE: Guía de construcción parasísmica.

Para el bahareque, la utilización del bambú guadua ofrece peculiaridades constructivas apropiadas para lograr potenciar los esquemas de flexibilidad y ligereza permitiendo un mejor comportamiento del sistema ante movimientos en toda su estructura, dando un mejor comportamiento ante los efectos de sismos Elizondo, (2020).

Por ser un material de propiedades extremas por su tamaño, su velocidad de crecimiento y adaptabilidad, este material puede desarrollarse en diversas zonas como las tropicales, las de climas templados o aquellas ubicadas hasta una altitud de 3500 metros sobre el nivel del mar. Fuentes y Marcó, (2013). La comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2021) se señala que las características anteriores posicionan al bambú como una materia prima propicia para su cultivo en el Estado de Colima y ante estas circunstancias, luego de un estudio de factibilidad, desarrollado por el Instituto para el Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable (IMADES) del Estado de Colima y la Universidad de Colima, y con el financiamiento de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), se determinó el territorio colimense es idóneo para la producción del bambú. El estudio realizado reveló que las especies de bambú *Otatea acuminata* y *Guadua angustifolia* podrían convertirse en cultivos productivos en los municipios de Comala, Villa de Álvarez y Colima.

Propuesta constructiva

La propuesta desarrollada parte de la premisa de reinterpretar los procesos tradicionales de construcción del bahareque para incorporar la utilización del bambú como un sistema de refuerzo a la construcción, estandarizando el diseño del panel en mención para su fácil implementación constructiva tanto en la vivienda rural como urbana. Además, se procuro que el sistema fuera lo más sencillo posible para no requerir de mano de obra especializada en su edificación, pero que fuese capaz de adaptarse a las necesidades de los programas arquitectónicos actuales.

Torres (2020) realizó una revisión exhaustiva de las variedades de los sistemas constructivos de bahareque encontrando las diferencias y peculiaridades de 23 sistemas utilizados. Clasificó las propuestas por tipo de muro, sus dimensiones en alto y ancho, espesores, materiales

en la composición del marco, uniones, material del interior, estructura para recubrimiento interior y exterior. A partir de esta investigación es que se presenta la siguiente propuesta.

Así entonces, el diseño y las dimensiones propuestas del módulo se alinearon a las típicas de materiales de la construcción en el mercado para que se puedan adaptar fácilmente entre las piezas y herrajes o que se pueda revestir con diversos acabados. El sistema se diseño con dimensiones 1.22 x 2.44 m en formato vertical mediante un bastidor de bambú previamente tratado y una diagonal del mismo material como tensor y contraenteo (Ver figura 3).

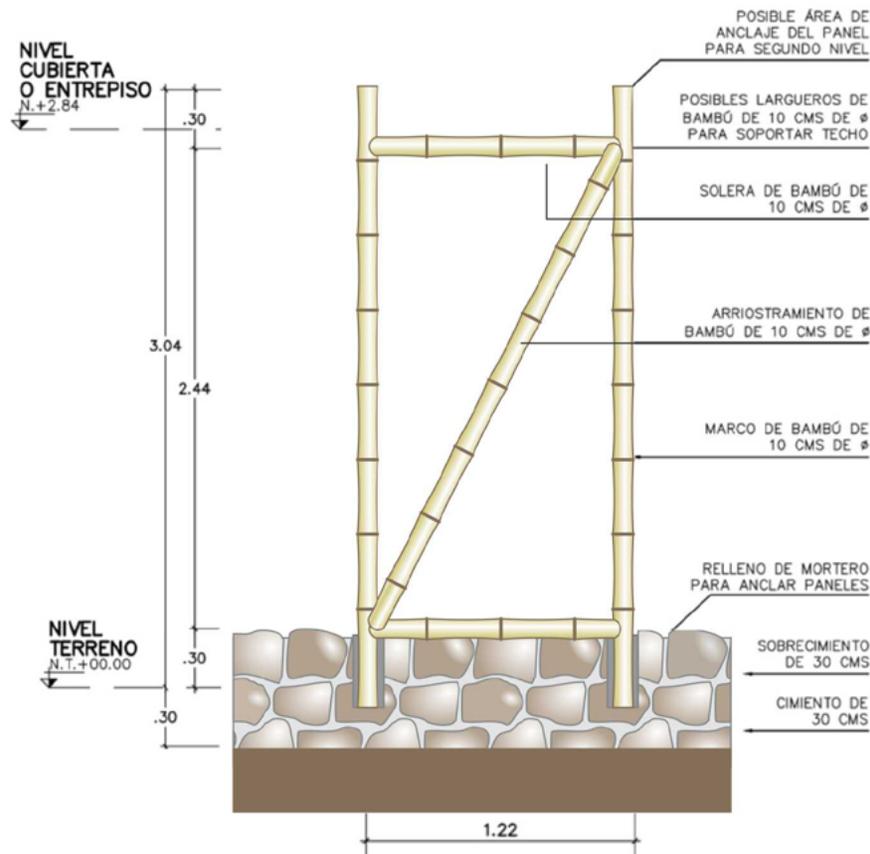


Figura 3. Bastidor de panel de bahareque y bambú en sistema modular. Anclaje, dimensiones y características.

Cada panel está compuesto de cinco piezas unidas entre sí con una conexión tipo boca de pescado (Ver figura 4). La selección del bambú para el bastidor y tensor deberá de ser lo más homogéneo posible y con diámetro aproximado de 10 cm, ya que entre más homogénea sean las dimensiones de los elementos que componen el marco estructural, será más fácil elaborar conexiones precisas.

Para las conexiones entre piezas de los paneles estructurales, se optó por implementar materiales modernos como el acero y el concreto, con el fin de garantizar una conexión más rígida sin movimientos, ya que en las conexiones es donde tiende a fallar en primera instancia la estructura. Así, en los anclajes a la cimentación, el bambú se inca y ahoga dentro del cemento

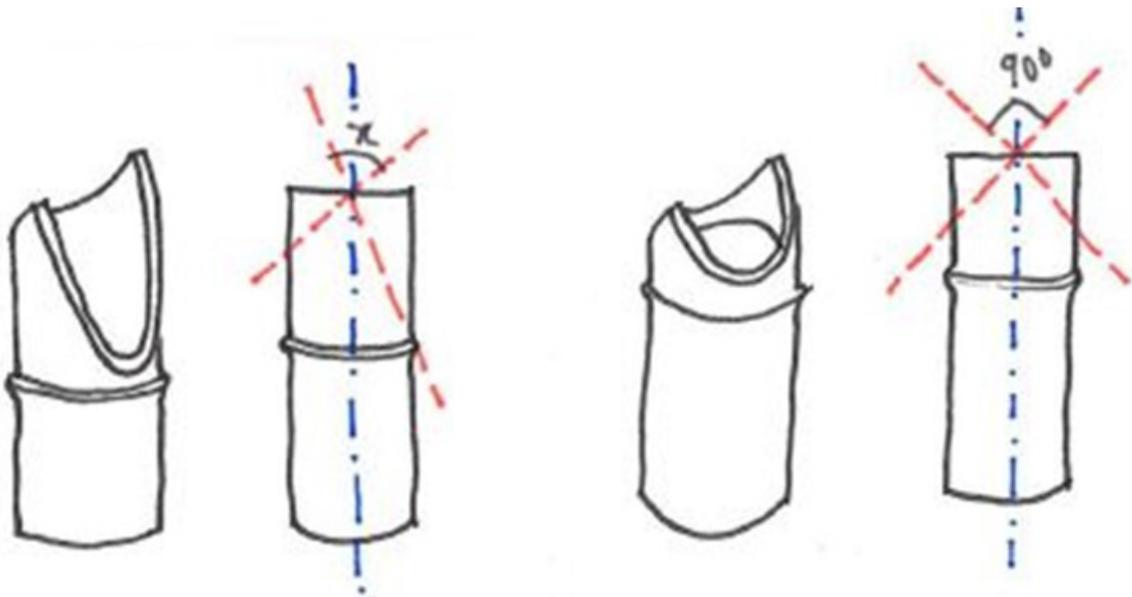


Figura 4. Trazos para realización de corte tipo boca de pescado.

Fuente: Rosa (2018).

con concreto y para el resto de las conexiones superiores se utilizaron pernos roscados, arandelas y pasadores metálicos.

Para el interior de los bastidores, se pensó que esta propuesta podría ser implementada en entornos urbanos con ciertos requerimientos de privacidad entre los espacios a diferencia del típico bahareque de costa que reduce, pero no limita en su totalidad la comunicación entre los espacios de las caras del sistema (Ver figura 2). Entonces, pensando en un sistema multi-locación, se propuso como relleno del bastidor del panel un forro de esterilla de bambú.

El revestimiento de los paneles, se utilizó el mismo material de bambú en forma de esterilla. Este término acuñado en América Latina hace referencia al bambú aplanado mecánicamente. Se optó por implementar la técnica de la esterilla en lugar de hacer los tradicionales entramados utilizados en el sistema constructivo de bahareque de la región, debido a que se busca reducir el peso del panel y facilitar un sistema de producción en serie.

Como recubrimiento, se realizó un revoque a base de materiales de la zona como tierra y fibras vegetales en función de la guía de construcción parasísmica de Carazas y Rivero (2002). Se aplicó en dos o tres capas dependiendo de la rugosidad de la esterilla, donde la primera capa sobre el bambú es de mortero de tierra y paja de 0.008 a 0.020 m de espesor repellado grueso mediante llana. La siguiente capa y subsecuentes se realizan con el mismo material, pero en granulometría más fina para resanar fisuras y cerrar poros dando el acabado final del muro por ambas caras (Ver figura 5).

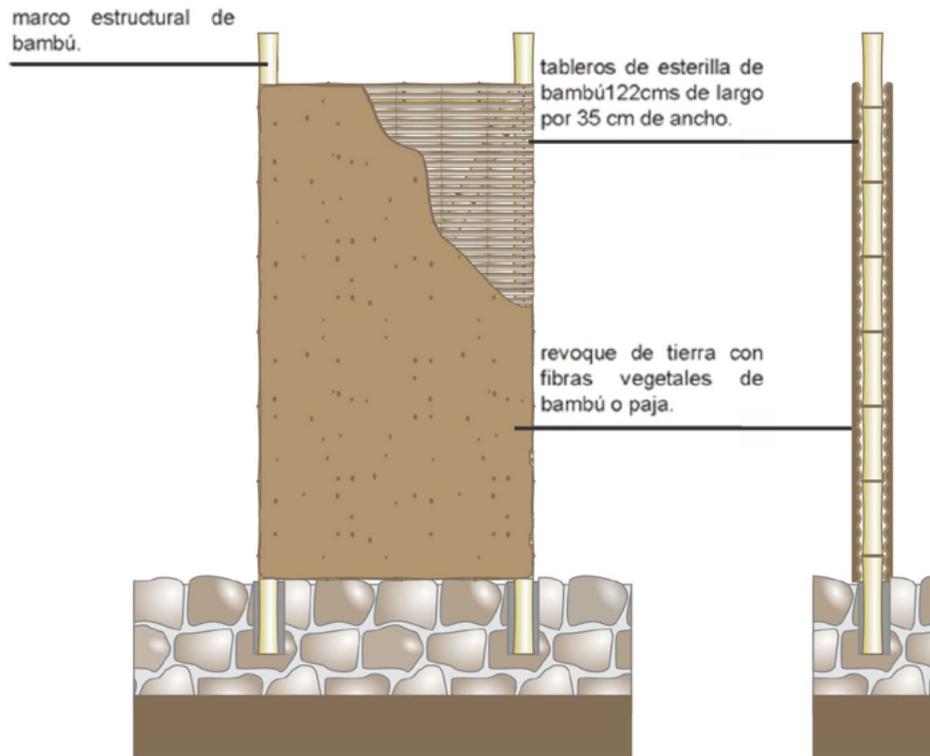


Figura 5. Detalle de acabados sobre panel.

Desempeño térmico

Como parte de la propuesta, se realizaron pruebas de desempeño térmico del panel. Las probetas para el análisis térmico se realizaron en dimensiones de 0.61 x 0.61 m siendo una sección del muro completo, pero respetando el espesor real del mismo de 0.15 m.

Esta probeta se comparó contra un sistema tradicional típico de la región de tabicón de cemento-arena. Las dimensiones de alto y largo se respetaron al igual que la probeta 1 de 0.61 x 0.61 m. Sin embargo, debido a sus características constructivas, el ancho de esta probeta no se pudo reducir más allá de los 0.18 m de espesor. El asentado de las piezas de tabicón, así como su recubrimiento fueron de acuerdo con el proceso constructivo típico de la región con mortero arena.

Las celdas experimentales se diseñaron y fabricaron de poliestireno expandido de en tres de sus caras (muros adicionales a la probeta), cubierta y losa. La dimensión del espacio interior fue de 0.61 x 0.61 x 0.61 m, el necesario para introducir la probeta en el único lado libre de cada cubo (Ver figura 6).

Para la selección de la fecha para la realización de las pruebas, se identificó un periodo del año donde se mantuvieran las condiciones de temperatura y humedad altas que caracterizan a la región de Colima, pero que, a su vez, pudiera agregarse la componente de la radiación solar incidente sobre el muro. La fecha de monitoreo fue del 5 al 15 de octubre.

El equipo utilizado para la prueba fueron dos sensores U12-012 de la serie hobo, marca onsetcomp con rango de medición en temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ con precisión es de $\pm 0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, resolución de $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y para humedad relativa de 5% a 95%, con precisión de $\pm 2.5\%$ de 10% a 90% y resolución de 0.03% a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este equipo se colocó al centro volumétrico del espacio de la celda para medir las condiciones interiores de cada celda.

Adicionalmente, se utilizó un tercer sensor para medir las condiciones exteriores de temperatura y humedad relativa. Este equipo se colocó y protegió dentro de un abrigo realizado con platos plásticos y dispuesto en forma horizontal para evitar modificaciones en los registros por radiación solar o precipitación lluvia (Ver figura 6).

Además, se utilizó un sensor externo S-THB-M002 conectado a los dataloggers U12-012 para medir la temperatura superficial interior de cada probeta. El rango de medición de los sensores es de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ con precisión de $\pm 0.21\text{ }^{\circ}\text{C}$ de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y resolución de $\pm 3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estos se colocaron en el centro del área de la probeta asentados con pasta térmica y protegidos de las condiciones interiores con una tapa de poliestireno de 0.05 m de espesor.

La frecuencia de las tomas fue de 30 minutos por 10 días, obteniendo un total de 477 datos por celda experimental.

En la figura 7 se presentan los resultados de temperatura interior de las dos celdas experimentales y de la temperatura exterior para los 10 días que duró el monitoreo. Los puntos azules representan las tomas obtenidas de la celda con la probeta de tierra, en color naranja la probeta de tabicón y en color gris la temperatura exterior del experimento. En líneas con-



Figura 6. Vista de celdas experimentales y equipo utilizado.

tinuas con la misma simbología de colores, se representan las líneas de tendencia de las tres condiciones.

Es posible observar que el tabicón presentó una reducción en la oscilación térmica interior con respecto al exterior superior a la presentada en la celda de la probeta del panel en cuestión. Sin embargo, esta reducción no necesariamente implica una reducción de temperatura, ya que, si se observan las líneas de tendencia, esta celda se encuentra aproximadamente 4°C por encima de la temperatura ambiente, mientras que la celda del panel se encuentra solo 2°C por encima. Comparativamente, el panel se desempeña 2°C en promedio mejor que el tabicón. Empero, en lo que se refiere a temperaturas máximas, el tabicón presenta temperaturas más bajas que el panel. En promedio, las temperaturas máximas del panel están 1°C por encima del tabicón y hasta 2.7°C por encima del ambiente, por lo que, en horas de mayor temperatura, el desempeño del tabicón es mejor que el del panel.

Por otro lado, en lo referente a las temperaturas mínimas, el mejor desempeño lo realiza el panel logrando igualar prácticamente el mismo desempeño que la temperatura exterior, mientras que el tabicón se encuentra entre 4°C a 5°C por encima de estos dos. De ahí que su desempeño global mostrado por la línea de tendencia indica que más caliente que el panel.

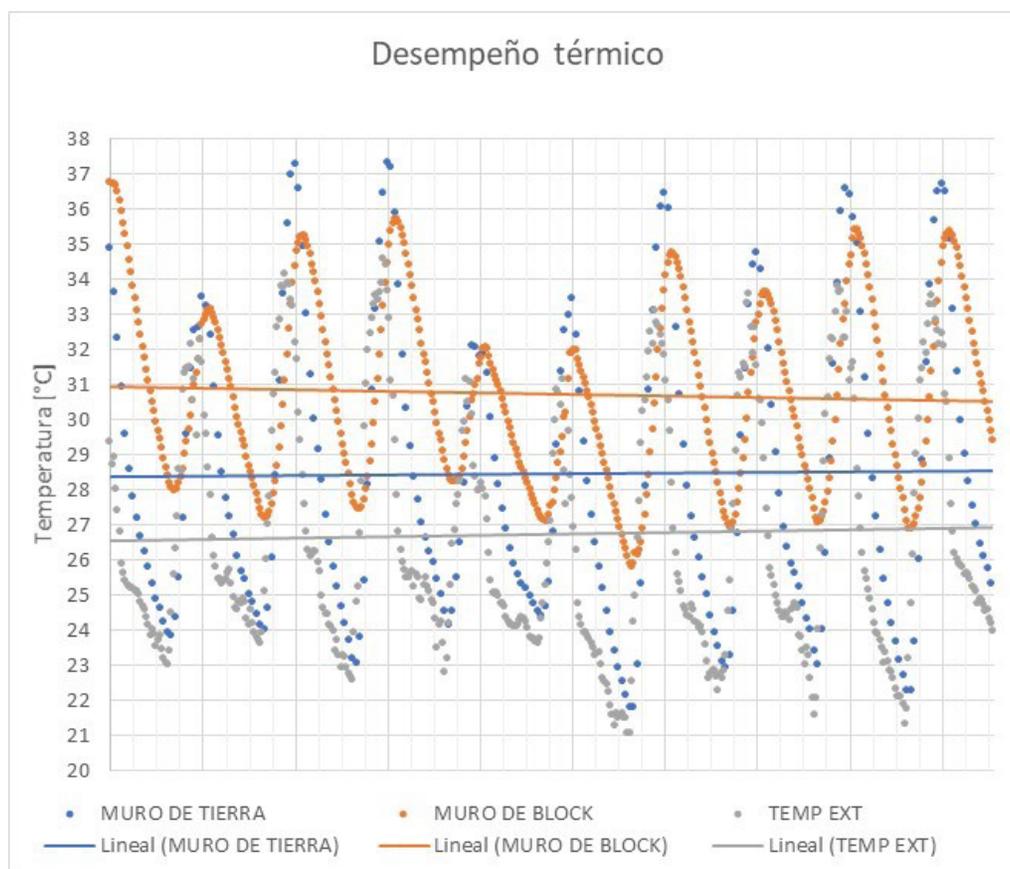


Figura 7. Desempeño térmico interior de las celdas experimentales.

En el caso de las temperaturas superficiales de las probetas, en la figura 8 se presentan los resultados comparativos para los mismos días experimentales. En color azul se presenta el desempeño del panel de bahareque, en línea continua la temperatura superficial y en discontinua su línea de tendencia, en color naranja el desempeño del muro de tabicón, en línea continua su temperatura superficial y en discontinua su línea de tendencia.

En cuanto a las temperaturas máximas, se observó un fenómeno que no es congruente con la temperatura interior mostrado en la figura 7. Las temperaturas superficiales de ambas probetas muestran desempeños muy cercanos, con diferencias inferiores a 0.5°C , mientras que en la figura 7 se llegaron a observar diferencias del doble en promedio. Esto puede deber a infiltraciones no identificadas en alguno de las celdas que permitieron la salida del exceso del calor en el muro de tabicón y, que, por ende, presentará temperaturas máximas inferiores al panel.

En las temperaturas mínimas, es donde se encuentra la mayor diferencia entre las dos celdas y que son las causantes de que las líneas de tendencia muestren también dicha diferencia. En promedio, la temperatura de la probeta del panel presentó temperaturas 2°C por debajo de las presentadas en el tabicón. Esto obligó al desempeño promedio del panel a desempeñarse en promedio 1°C por debajo del promedio del tabicón.

En general, tanto en la figura 7 como en la figura 8, las líneas de tendencia hacen evidente el mejor desempeño del panel de bahareque con adición de bambú entre 1°C a 2°C . Sin embargo, es necesario trabajar en las propiedades superficiales del panel para evitar que,

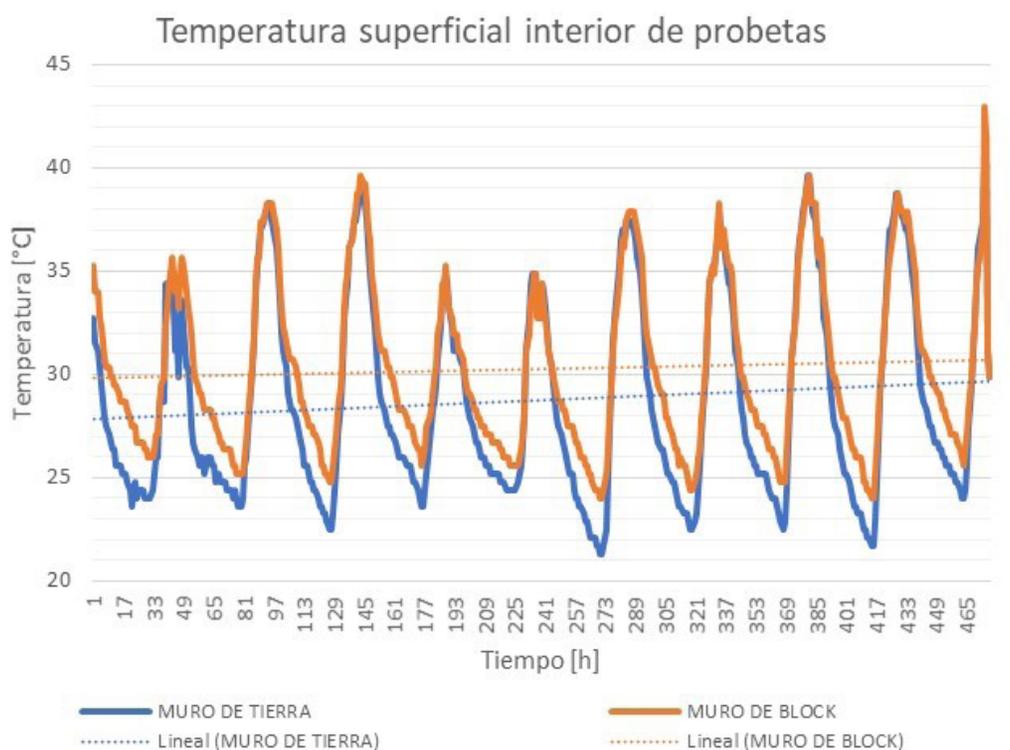


Figura 8. Temperatura superficial interior de probetas.

en momentos de las máximas, logre temperaturas tan altas. En su defecto, tendría que habilitarse otro tipo de estrategias que permitan la disipación de ese calor durante las horas del mediodía.

Pruebas mecánicas de bambú

Además de las pruebas térmicas desarrolladas, se realizaron pruebas mecánicas al bambú. Ya que el interior de los paneles se encontraba conformado por esterilla de bambú y revoques de mortero a base de tierra-paja, se consideró que la fortaleza del panel se encontraba propiamente en el bastidor, por lo que fue ahí donde se realizaron las pruebas de compresión.

Para la realización de las pruebas, se adquirieron dos varas de bambú de la especie *Guadua Angustifolia* de aproximadamente 3 m de largo. Dichas varas fueron cortadas de la primera plantación de bambú que se inició en el estado, por lo que tenían entre 4 y 5 años, indicando que no alcanzaban su madurez.

Las varas de bambú fueron previamente inmunizadas, siendo sumergidas durante tres días, dentro de un tubo de PVC de 18 pulgadas de diámetro que contenía agua, sales de boro y ácido bórico. Después de sacar las varas de bambú se les dio un tiempo de secado para posteriormente cortarlas en secciones de 45 cm de largo, logrando sacar 11 probetas para su estudio estructural.

PRUEBAS Y DATOS ESTRUCTURALES DE LAS PROBETAS DE BAMBÚ						
N° DE PROBETA	DATOS OBTENIDOS EN LA MÁQUINA DE COMPRESIÓN			CÁLCULO DE RESISTENCIA		
	TIEMPO MIN	CARGA KG	POSICIÓN MM	ÁREA EFECTIVA CM ²	CAP. DE CARGA KG/CM ²	MÓDULO DE ELASTICIDAD KG/CM ²
1	2.35	7,193	4.6	23.51	309.71	83,679.51
2	0.63	6,825	3.0	19.22	364.55	119,208.21
3	0.94	7,791	4.6	17.89	436.71	102,139.72
4	PRUEBA FALLIDA					
5	0.80	7,726	3.9	14.62	528.69	128,802.58
6	2.01	4,488	13.9	14.00	326.29	SIN DATOS
7	PRUEBA FALLIDA					
8	0.81	4,794	3.9	13.69	350.27	96,308.13
9	0.76	8,751	3.7	24.39	362.67	92,235.07
10	0.81	8,397	3.9	18.85	445.95	113,335.12
11	0.72	8,352	3.5	15.85	529.05	143,266.48

Figura 9. Resultados de la capacidad de carga y módulo de elasticidad del bambú *Guadua Angustifolia*.

Se calculó el área efectiva de cada probeta, se forjaron los cabezales de las probetas y se procedió al ensaye de las pruebas de compresión y cálculo del módulo de elasticidad. Los resultados se muestran en la figura 9.

Conclusiones

Se presentan las conclusiones del diseño y desarrollo de un prototipo de sistema constructivo modular utilizando como punto de partida, el sistema tradicional de bahareque e incorporando al bambú como un elemento natural de resistencia y mejora al sistema. Los resultados del análisis se plantearon en dos áreas, por un lado, su desempeño térmico y por otro, el desempeño físico-mecánico del bambú.

Parte de los resultados encontrados indicaron que el desempeño térmico general del sistema mostró mejores condiciones tanto en temperatura del aire al interior de los espacios como en temperaturas superficiales comparado contra un sistema constructivo convencional como lo es el tabicón.

Sin embargo, ambos sistemas mostraron temperaturas máximas superiores a las temperaturas ambientales, por lo que es necesario ahondar más en la mitigación de la temperatura en horas del mediodía para lograr un amortiguamiento efectivo al interior de los espacios. Es importante mencionar que es posible que el tamaño de las celdas experimentales donde se ensayaron las probetas pueda alterar los resultados del aire al interior de los espacios dando como resultado, temperaturas máximas superiores a las esperadas. Entonces, será necesario ejecutar pruebas en celdas de mayores dimensiones para reducir la diferencia entre área-volumen de la celda.

En cuanto a las temperaturas mínimas, el desempeño del panel fue similar a la temperatura del exterior y mejor que el desempeño de la probeta de tabicón por cerca de 2°C en promedio, indicando que cuenta con la capacidad de disipar el calor con mayor facilidad. Sin embargo, también se pudo observar que la oscilación térmica del panel es superior a la presentada por el tabicón, indicando que es posible que cuente con una masa térmica menor. También es atribuible lo anterior a la diferencia de los espesores en ambos, siendo el panel el de menor espesor por 0.03 m aproximadamente.

Respecto al desempeño físico-mecánico del bambú, el encontrado en la región presentó resultados parecidos a lo reportado en la literatura. Empero es necesario mencionar que el bambú utilizado en las pruebas no había logrado la plenitud en madurez, por lo que se puede esperar que, al paso del tiempo, su desempeño sea superior al indicado por otros autores.

En un futuro, será necesario ensayar pruebas del panel por completo para identificar sus características físico-mecánicas con mayor precisión y certeza. Además, deberá de proveerse de estudios para la preparación de las superficies expuestas al exterior y garantizar su durabilidad a la intemperización.

Finalmente, la propuesta aquí presentada trata de incorporarse como una posibilidad más al catálogo de sistemas constructivos que son viables para la construcción de la vivienda con mayor demanda en el país incorporando criterios más ecológicos tanto en la obtención de la materia prima, como en su producción, construcción y uso.

Referencias

Assis Rosa Ricardo (2018). Digital fabrication and bamboo. Analysis of principles for utilizing digital fabrication methods to advance bamboo for construction. 11th World Bamboo Congress Proceedings, Xalapa, México.

Asencio Esteban, J.A. (1995) Arquitectura de tierra y madera en la protohistoria del Valle Medio del Ebro y su Relación con la del Mediterráneo, España: Caesaraugusta.

Bernal, I. (1984). Tenochtitlán en una isla. México D.F. SEP.

Carazas Aedo Wilfredo, Rivero Olmos Alba (2002). Bahareque: Guía de construcción parasísmica. Misereor, Ed. CRATerre.

Carazas, W. (2014). Bahareque Cerén. San Salvador. Misereor-Cáritas.

CONAFOR (2018). Comisión Nacional Forestal. Avalan a Colima para producir bambú en 3 municipios. 2021, de Gobierno de México Sitio web: <https://www.gob.mx/conafor/prensa/>.

Derruau, M. (1964), Tratado de Geografía Humana, Barcelona.

Elizondo Mata, M. (13 de enero 2020). Imparte universitario conferencia en Simposio Internacional sobre Bambú. https://www.uco.mx/enterate/nota_7841.htm

Fuentes C & Marcó. (2013). Proyecto de viviendas de interés social en bahareque en-cementado para el municipio de Villamaría, Colombia. Colombia. Universidad Politécnica de Catalunya.

Gurrero Vaca, L.F. (2017). Pasado y porvenir de la construcción con bajareque. México: Editorial Restauro, compás y canto S.A de C.V.

Torres Moreno, J.S. (2020) Propuesta constructiva a base de bahareque de bambú para la vivienda rural en el estado de Colima. Caracterización termofísica y físico-mecánica. Tesis de maestría. Universidad de Colima.

Yuste, B. (2016). Arquitectura de Tierra. Caracterización De Los Tipos Edificatorios. Tesis master, Universidad Politécnica de Cataluña.

Nota: Todas la imágenes son de elaboración propia.

Fabricación del Bloque Residual a Base de Bagazo y Vinaza del Agave Mezcalero, Lodo de Papel y Tierra Arcillosa

Edwin Israel Tovar Jiménez¹

Karol Paulina Luría Figueroa ²

Carlos Javier Esparza López³

Luis Arturo Vargas Robles⁴

Marcos Eduardo González Trevizo⁵

1 Universidad Iberoamericana León | Departamento de Arquitectura y Diseño

Correo: edwin.tovar@iberoleon.mx

2 Universidad La Salle Oaxaca | Escuela de Ingenierías y Arquitectura

Correo: 014411551@ulsaoaxaca.edu.mx

3 Universidad de Colima | Facultad de Arquitectura y Diseño

4 Universidad Iberoamericana León | Departamento de Arquitectura y Diseño

5 Universidad Autónoma de Baja California | Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Resumen

En este trabajo se presenta un proceso de reutilización y aprovechamiento de los residuos industriales del mezcal, el bagazo y la vinaza, así como el papel de reciclaje, para conformar un nuevo sistema constructivo aplicado a una vivienda prefabricada, que permite encapsular en la construcción estos desechos industriales y obtener un sistema de bajo costo, sin mano de obra especializada, que brinde mayor confort y accesibilidad a la vivienda en las comunidades de Oaxaca.

Cabe mencionar que este trabajo es la primera etapa de una investigación a tres etapas. En este momento se tiene como resultado un proceso del manejo de estos residuos, la producción de un bloque constructivo con una capacidad de carga mayor a la de un block de cemento aligerado probado en laboratorio y los análisis ambientales que muestran la reducción de impactos negativos al medio ambiente. En la segunda etapa se hará la caracterización termofísica de los materiales y en la tercera etapa se consolidarán los modelos de los bloques ensamblables para una vivienda prefabricada.

Los resultados obtenidos de esta investigación se comparan contra un sistema constructivo ya existente, basado en bloques de concreto celular, para cuantificar la reducción de descargas ambientales negativas que consigue este sistema.

Palabras clave: Bagazo, Vinaza, Confort, Residuos industriales, Sistema constructivo.

Abstract

This work will present a process for reclaiming and reuse of residual vinasse and bagasse to develop a construction system which can be applied to prefabricated housing. This permits, in part, the encapsulation of the industrial mezcal waste in construction and also creates a system which is low cost and does not require specialized training while providing greater accessibility and comfort in the housing within the Oaxacan community.

It should be mentioned that this work is the first of three stages of research. Currently one result of the process of waste handling has been the construction of a building block with greater load capacity than that of the lightened cement when tested in the laboratory. The environmental analysis shows a reduction of the negative impact in the environment. The second stage will include the thermophysical characterization of the materials and the third stage will be the consolidation of materials for prefabricated housing.

The final building blocks obtained during this research will be compared against existing construction system, based on cellular concrete blocks, to quantify the reduction of negative environmental discharges.

Key words: Bagasse, Vinasse, Comfort, Construction system, Industrial byproducts.

Introducción

A nivel global, en numerosos países han aparecido grandes volúmenes de residuos depositados en extensos vertederos que deterioran amplias áreas del territorio, y muchos de ellos, a pesar de la existencia de políticas, leyes, numerosas regulaciones y normativas para su prevención y gestión, en muchas ocasiones producen un creciente perjuicio al medio ambiente. Entre las recomendaciones para contrarrestar y mitigar los efectos de los vertederos, además de la prevención, minimización, eliminación, reciclaje y recuperación energética, se ha aconsejado internacionalmente la conveniencia de reutilización de sus residuos (González, 2018).

A nivel nacional el uso de los subproductos de la industria mezcalera puede tener un alto potencial, porque nueve estados del país cuentan con la Denominación de Origen del Mezcal para su producción certificada (figura 1).



Figura 1. México y los estados que cuentan con la DOM.

Fuente: Consejo Regulador del Mezcal

Durante el 2020 en el estado de Oaxaca se tuvo una producción de 7,273.48 m³ de mezcal, generándose aproximadamente 40,949.66 toneladas de bagazo y 109,102.12 m³ de vinazas residuales. Estos desechos se arrojan al entorno inmediato causando un impacto ambiental negativo.

Por estos motivos el objetivo principal de este trabajo es utilizar los residuos de la industria del mezcal oaxaqueño para generar un sistema constructivo de bajo costo, que no requiere de mano de obra calificada y que contribuye a dar acceso a la vivienda con tecnología térmica a comunidades que lo requieran, como la periferia de la Ciudad de Oaxaca, San Agustín Yatareni, San Jerónimo Tlacoahuaya y Tlacolula de Matamoros (figura 2).



Figura 2. Vista satelital de la Ciudad de Oaxaca y de los municipios de San Agustín Yatareni, San Jerónimo Tlacoahuaya y Tlacolula de Matamoros.

Fuente: Google Earth Pro – Image 2021 Maxar Technologies – 2021 Google – INEGI

Se consideraron estas localidades porque de ellas se pueden obtener la mayoría de subproductos para la fabricación del Bloque Residual Ensamblable (BRE) y por la cercanía entre ellas a través de la Carretera Internacional Oaxaca – Istmo, evitando así más gastos energéticos.

Si se toma de referencia el centro histórico de la Ciudad de Oaxaca, en auto particular se llega en 10 minutos al municipio de San Agustín Yatareni, en 25 minutos se llega al municipio de San Jerónimo Tlacoahuaya y en 35 minutos se llega al municipio de Tlacolula de Matamoros.

Antecedentes

Materiales constructivos de referencia

La fabricación de materiales de construcción es la tercera industria a nivel mundial que más contamina actualmente porque requiere de un alto gasto energético desde la extracción de

materias primas, la fabricación de los materiales, el empaquetado, el reparto a puntos de venta, la instalación y puesta en obra, la demolición y el desecho final.

De acuerdo con Aguilar (2017) se necesitan más de 2 toneladas de materias primas por cada m² de vivienda que se construye y ello nos lleva a que la industria de la construcción tenga el siguiente impacto ambiental:

- La construcción y uso de edificios generan el 50% de las emisiones de CO₂ del planeta.
- Los edificios utilizan el 40% y 60% de los recursos naturales del planeta
- Los residuos de construcción y demolición (RCD) alcanzan el 40% de los residuos generados a nivel mundial.

Ladrillo rojo recocido

La fabricación de algunos materiales de la construcción que se utilizan en México tiene una carga energética y contaminación altas, por lo que es necesaria la búsqueda de materiales alternativos. Se menciona como ejemplo el ladrillo rojo recocido por ser uno de los materiales más utilizados en la construcción mexicana y uno de los más contaminantes en su proceso de fabricación.

El proceso de elaboración y cocido artesanal de la arcilla contribuye al deterioro del medio ambiente debido al uso de materiales combustibles altamente contaminantes, por ejemplo, diésel, combustóleo, aceites “gastados” y residuos industriales, pero también son utilizados leña, fibras de coco o cáscaras de arroz y otros cultivos.

Dentro de la misma industria ladrillera se tiene un gran consumo de energía, aproximadamente 4,06 billones de kWh equivalentes de gas natural al año. Los hornos cerámicos utilizados en este tipo de industria consumen una gran cantidad de combustibles fósiles, lo cual origina un enorme gasto energético y la liberación a la atmósfera de gases de efecto invernadero. Durante el proceso de cocción muchos gases nocivos (incluyendo gases carbónicos, hidrogenados y fluorados) y diferentes partículas son liberadas desde los hornos cerámicos. Estas emisiones son desde hace varios años una de las mayores preocupaciones ambientales del sector (Flores, 2017).

Hasta el 2018 se registraron un poco más de 122 hornos de ladrillo rojo recocido de acuerdo con información del INEGI (2019) en el Municipio de San Agustín Yatarení, Oaxaca, debido a que en esta localidad se encuentra abundante tierra arcillosa necesaria para la producción del ladrillo rojo recocido.

Es importante buscar alternativas de materiales menos contaminantes con procesos de fabricación menos dañinos a la salud. Como ejemplo de un proceso de fabricación altamente

contaminante se observa que la industria tabiquera no ha tenido cambios tecnológicos significativos (figuras 3, 4 y 5).

Las empresas familiares dedicadas a esta actividad tienen por lo general sus viviendas en el mismo predio de los hornos ladrilleros, quedando expuestos a la presencia constante de humos tóxicos generados por la combustión, ocasionándoles enfermedades pulmonares crónicas que deterioran su calidad de vida (Periódico De la Redacción, 2014).



Figura 3. Secado/ladrillos (previo a cocción.)

Figura 4: Horno ladrillero activo.

Figura 5: Vista/humos tóxicos.

Fuente: Acervo fotográfico propio de KPLF

Cloque de concreto celular

El concreto celular es el material base del bloque de cemento aligerado que se toma también como una referencia para el presente trabajo.

El concreto celular o concreto ligero estructural es un concreto hidráulico premezclado utilizado en construcciones que requieren de un peso volumétrico ligero y con resistencia estructural (figura 6). Si el concreto celular es de alta densidad y es mezclado con arena se crea un elemento estructural ideal para utilizarse en la fabricación de bloques constructivos, paneles prefabricados o en paramentos verticales (Cervantes, 2008). Para la fabricación de bloques a base de concreto celular se utilizan las siguientes densidades del concreto y cantidades de materiales, como se muestra en la Tabla 1.

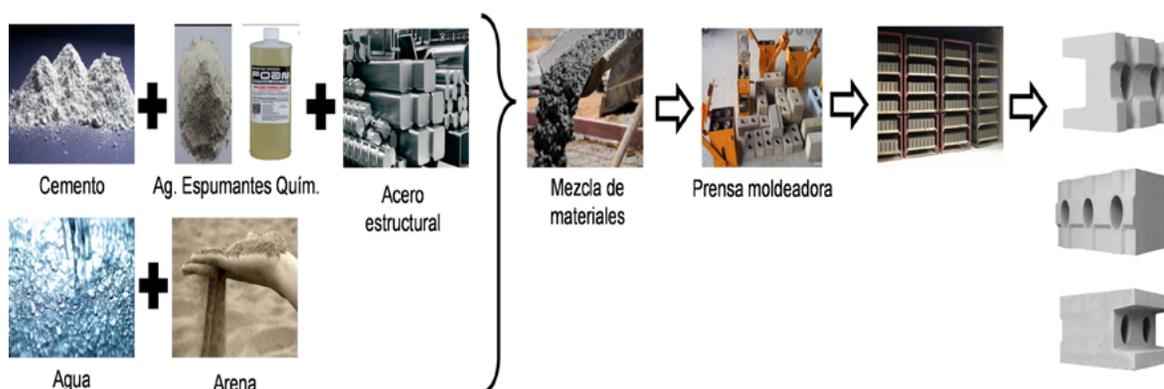


Figura 6. Diagrama de producción del concreto celular para bloques constructivos.

Tabla 1. Cantidades de insumos para elaborar bloques constructivos de concreto celular.

Fuente: Elaboración con información de Cervantes (2008).

Densidad (kg/m ³)	Cemento (kg)	Arena (kg)	Agua (lts)	Espumante S/B
600	310	210	110	0.9
800	350	370	120	0.8
1000	370	560	125	0.7
1200	400	750	140	0.65

Residuos utilizados

Bagazo y vinaza del agave

Actualmente el estado de Oaxaca cuenta con la Denominación de Origen del Mezcal (DOM) y de acuerdo con el Informe Estadístico del 2020 del Consejo Regulador del Mezcal (CRM), Oaxaca tuvo una producción del 92.7 % de la producción nacional del mezcal.

Oaxaca durante el 2020 tuvo una producción de 7,273.48 m³ de mezcal, generándose un aproximado de 40,949.66 toneladas de bagazo y 109,102.12 m³ de vinazas residuales (Tabla 2).

Tabla 2. Cantidades de subproductos generados para la fabricación del BRE.

Fuente: Elaboración con información del CRM, Flores-Robles-Castañeda, SAGARPA, SEMARNAT e INEGI

Insumos para BRE:	Cantidades que se generaron durante el 2020:
Mezcal producido en México	A nivel nacional durante el 2020 se produjeron 7,846,251 lts de mezcal, de esta cantidad el 92.7% se produjo en Oaxaca, representando un total de 7,273,474.67 lts de mezcal oaxaqueño en el 2020. (CRM, 2020)
Bagazo de agave angustifolia	Por cada litro de mezcal elaborado se generan 5.63 kgs de bagazo de agave, representando un total de 40,949,662.28 kgs de bagazo residual en el 2020. (Flores-Robles-Castañeda, 2020)
Vinaza de agave angustifolia	Por cada litro de alcohol producido se generan de 12 a 15 lts de vinazas, representando un total de 109,102,119.75 lts de vinazas residuales en el 2020. (SAGARPA, 2016).
Papel de oficina-hogar desechado	Cada día se registra en los Valles Centrales de Oaxaca 21.74 toneladas de papel desechado de oficinas y hogares. (SEMARNAT, 2016)
Tierra Arcillosa	Hasta el 2018 en el municipio de San Agustín Yatareni se encontraban 122 hornos de cocción de ladrillo rojo recocido. (Censo Económico del INEGI, 2019)

Durante la fabricación del mezcal se generan tres residuos, que al día de hoy son de poca importancia en la agroindustria, pero con una amplia repercusión ambiental. El primero son las pencas (hojas) del agave, el segundo es el bagazo y el tercero la vinaza (Flores, 2020).

De acuerdo con Iñiguez (2014) el bagazo del agave es la fibra generada después de que las cabezas del agave “piñas” son troceadas, cocidas, enjuagadas y exprimidas para extraerles los azúcares fermentables para la obtención de los mostos que serán utilizados en la producción del mezcal. El bagazo desechado en Oaxaca es vertido en ríos, arroyos o amontonado a cielo abierto afuera de los palenques o parcelas, liberándose los alcoholes impregnados y propiciando el aumento de los gases de efecto invernadero (figura 7).

Las vinazas del agave son el último residuo generado en la destilación del mezcal y de acuerdo a Rodríguez (2017) el 80% de las vinazas generadas en México son desechadas en campos de cultivo, cuerpos de agua (ríos, lagos y reservas) y/o sistemas de drenaje municipal, sin recibir un tratamiento depurativo previo, propiciando que la flora y fauna locales se vean en peligro de extinción, por la alta concentración de materia orgánica, las altas temperaturas de 50°C a 80°C y por su pH muy ácido que oscila de 4.9 a 5.4 (figura 7).

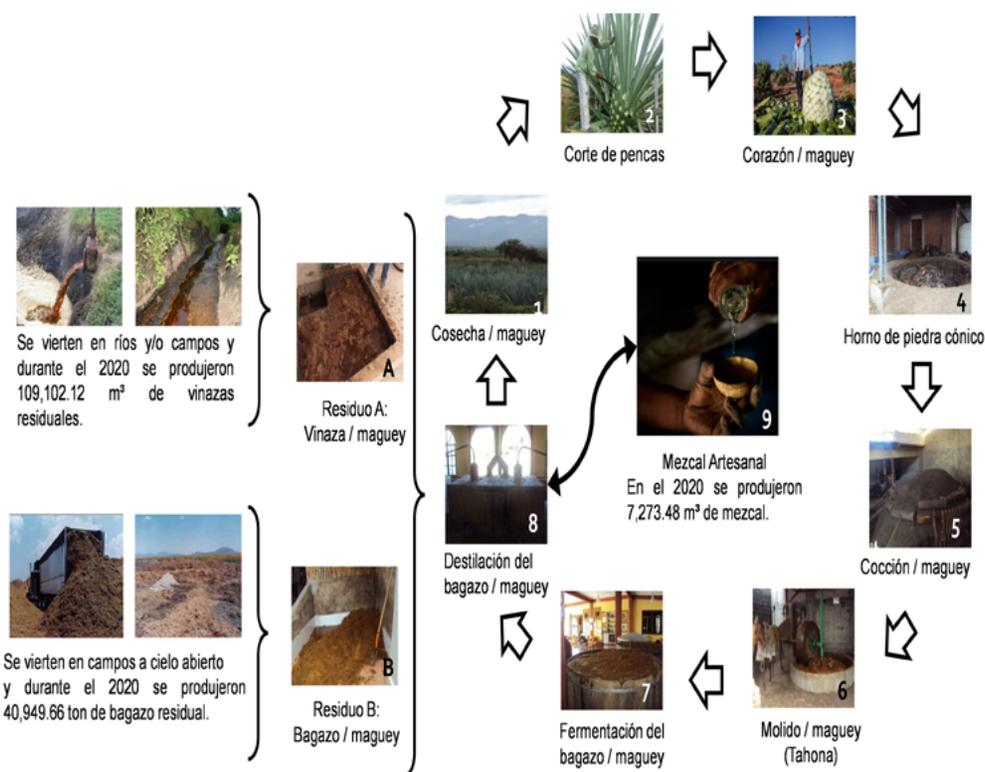


Figura 7. Diagrama de producción del mezcal artesanal oaxaqueño y residuos generados.

Papel de reúso

Durante el 2017 se tuvo un promedio registrado de 584 toneladas de cartón y papel en el estado de Oaxaca de acuerdo con la información de Lugo (2019), una considerable cantidad para proponer la reutilización local del papel en la elaboración de nuevos materiales constructivos.

De acuerdo con la SEMARNAT (2016) la composición física de los residuos en los Valles Centrales consta de un 25% de residuos inorgánicos con valor comercial, de un 33% de

residuos inorgánicos sin valor comercial y de un 42% de residuos orgánicos. Dentro del porcentaje de residuos inorgánicos con valor comercial se encuentra el papel desechado con un aporte de 21.74 ton/día en la delimitación de los Valles Centrales.

El reporte de Green Peace (2019), se registraron solo dos centros de acopio de papel y cartón en la Ciudad de Oaxaca, en los cuáles se reportó un acopio de 4 toneladas anuales de papel y cartón.

Desarrollo

El desarrollo de esta investigación se realiza considerando dos actividades industriales diferentes entre sí, la fabricación del ladrillo rojo recocido y la fabricación del mezcal. Aparentemente no tienen relación entre sí, sin embargo, ambas están emitiendo mucha contaminación y esa es la vinculación entre ellas.

El objetivo principal es utilizar los residuos de la industria del mezcal oaxaqueño para generar un sistema constructivo de bajo costo, que no requiere de mano de obra calificada y que contribuye a dar acceso a la vivienda digna en comunidades que lo requieran.

A su vez se busca difundir y promover ante la sociedad oaxaqueña la urgente necesidad de reutilizar, reducir y reciclar los productos de desecho que muchas veces son menospreciados por la mayoría de la población.

Materiales y Métodos

El procedimiento de trabajo que se siguió en la presente investigación se basa en la metodología de Investigación Tecnológica, con base en Muñoz (2011). La metodología se muestra gráficamente en la figura 8.



Figura 8. Diseño de Metodología para la fabricación del Block Residual Ensamblable (BRE).

En la figura 9 se muestran las etapas a seguir para obtener el prototipo con las mejores propiedades de aglutinamiento y de resistencia que permitieran integrar un Block Residual Ensamblable (BRE).

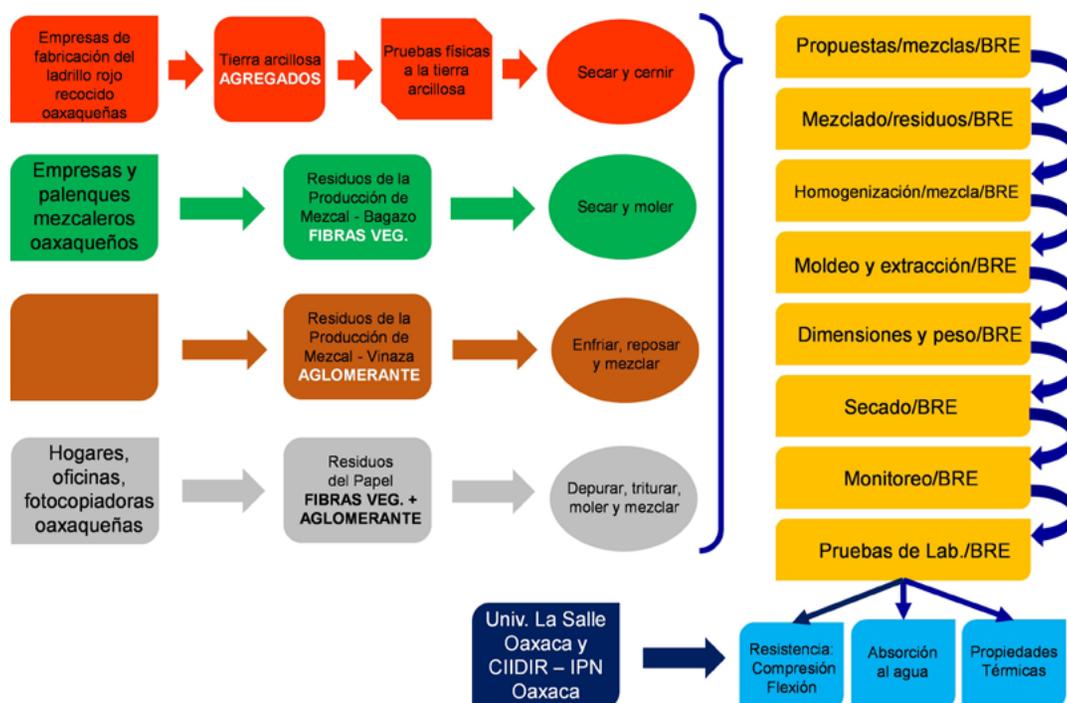


Figura 9. Proceso constructivo para la fabricación del BRE.

Preparación de insumos para fabricación del BRE

Para poder fabricar el Bloque Residual Ensamblable se requiere que los cuatro residuos tengan un tratamiento previo con las siguientes consideraciones como se observa en la figura 10.

- **Bagazo de agave de mezcal:** Para poder utilizar esta fibra es necesario que esté libre de pedacería de pencas del agave, que esté seca y que tenga un tamaño aproximado de 2.50 cms de largo para que pueda aportar mejores propiedades estructurales. Se recomienda para su traslado al lugar de la fabricación que sea guardado en costales de reúso.
- **Vinaza de agave de mezcal:** Para poder utilizar la vinaza es necesario su almacenamiento en envases de plástico duro (cubetas de pintura con sus tapas) por el pH tan ácido que presenta. Se recomienda que sea guardada bajo la sombra para detener su proceso de fermentación mientras se utiliza. Se requiere que esté fría y sea revuelta antes de ser vertida en la mezcla general del BRE.
- **Papel de oficina-hogar desechado:** Para poder utilizar el papel de oficina-hogar es necesario que esté libre de grapas, clips, espirales de plástico ó metálicos, de cubiertas plastificadas y grasas. Se somete a un proceso de trituración y después es molido con

agua, se cuela previamente para retirarle el exceso de agua y se pueda incorporar a la mezcla del BRE.

- **Tierra arcillosa:** Para poder utilizar la tierra arcillosa es necesario que sea cernida y esté libre de ramas, hojas y restos de basura para realizarle las pruebas preliminares de sedimentación, granulometría y dureza, con la finalidad de confirmar que cuenta con las propiedades plásticas necesarias para la fabricación del BRE.

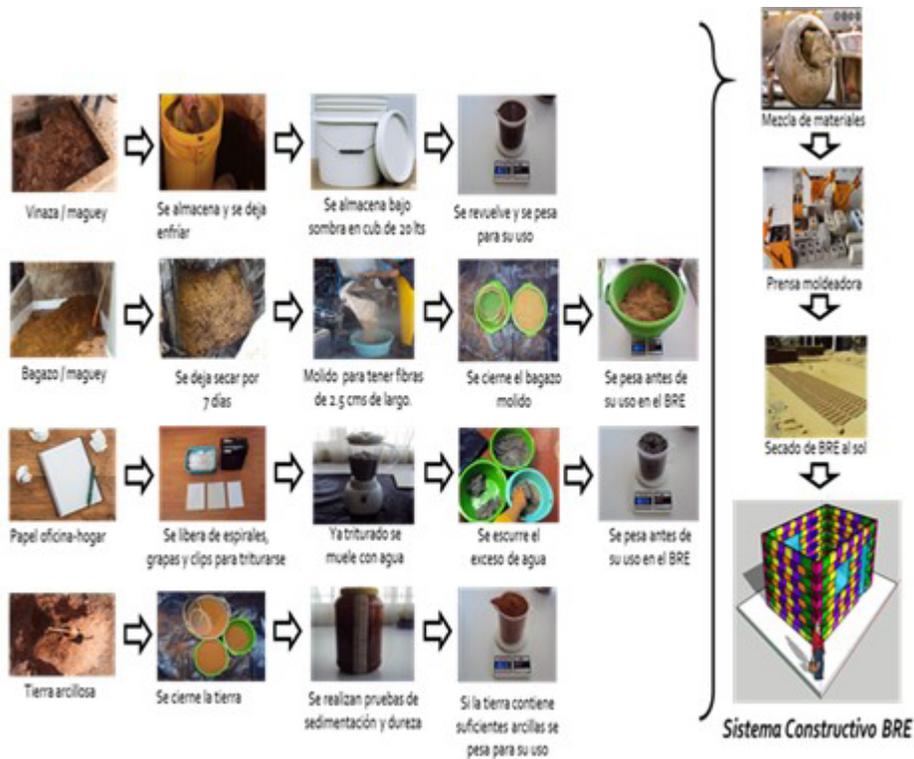


Figura 10. Diagrama de tratamiento previo de subproductos para la fabricación del BRE.

Integración de mezclas

Se realizaron las propuestas de mezclas para la fabricación del Bloque Residual Ensamblable, tomando como referencia las mezclas propuestas de Aguilar (2017) en cuanto a agregados, fibras vegetales y aglomerantes se refiere.

Se diseñaron 10 mezclas diferentes en proporciones y con algunos otros ingredientes adicionales que pueden favorecer la adhesión final (Tablas 3 a la 12). El diseño de las mezclas se realizó antes de conseguir los materiales y hacer las pruebas físicas.

Tablas 3 y 4: Propuestas de mezclas 1 y 2 para fabricación del BRE.

Propuesta Uno del BRE		Propuesta Dos del BRE	
Materia:	Cantidad:	Materia:	Cantidad:
Bagazo de maguey mezcalero	1.50 kg	Bagazo de maguey mezcalero	0.90 kg
Vinaza de la destilación del mezcal	3.5 lt	Vinaza de la destilación del mezcal	2.0 lt
Lodo de papel	4.20 kg	Lodo de papel	3.15 kg
Tierra arcillosa	4.095 kg	Tierra arcillosa	4.095 kg
Pegamento blanco	1.0 lt	Agua	3.50 lt
Agua	3.50 lt		

Tablas 5 y 6: Propuestas de mezclas 3 y 4 para fabricación del BRE.

Propuesta Tres del BRE		Propuesta Cuatro del BRE	
Materia:	Cantidad:	Materia:	Cantidad:
Bagazo de maguey mezcalero	0.90 kg	Bagazo de maguey mezcalero	1.50 kg
Vinaza de la destilación del mezcal	4.0 lt	Vinaza de la destilación del mezcal	4.0 lt
Lodo de papel	3.15 kg	Lodo de papel	4.20 kg
Tierra arcillosa	5.46 kg	Tierra arcillosa	5.46 kg
Agua	3.50 lt	Agua	3.50 lt

Tablas 7 y 8: Propuestas de mezclas 5 y 6 para fabricación del BRE.

Propuesta Cinco del BRE		Propuesta Seis del BRE	
Materia:	Cantidad:	Materia:	Cantidad:
Bagazo de maguey mezcalero	2.0 kg	Bagazo de maguey mezcalero	2.0 kg
Vinaza de la destilación del mezcal	4.50 lt	Vinaza de la destilación del mezcal	6.0 lt
Lodo de papel	4.20 kg	Lodo de papel	4.50 kg
Tierra arcillosa	6.50 kg	Tierra arcillosa	7.50 kg
Cal	1.50 kg	Cal	1.20 kg
Agua	3.50 lt	Agua	3.50 lt

Tablas 9 y 10: Propuestas de mezclas 7 y 8 para fabricación del BRE.

Propuesta Siete del BRE		Propuesta Ocho del BRE	
Material:	Cantidad:	Material:	Cantidad:
Bagazo de maguey mezcalero	2.20 kg	Bagazo de maguey mezcalero	2.50 kg
Vinaza de la destilación del mezcal	5.50 lt	Vinaza de la destilación del mezcal	6.50 lt
Lodo de papel	5.0 kg	Lodo de papel	6.0 kg
Tierra arcillosa	7.50 kg	Tierra arcillosa	8.50 kg
Agua	4.50 lt	Agua	4.50 lt
Sal de mar en grano	1.2 kg	Sal de mar en grano	1.5 kg

Tablas 11y 12: Propuestas de mezclas 9 y 10 para fabricación del BRE.

Propuesta Nueve del BRE		Propuesta Diez del BRE	
Material:	Cantidad:	Material:	Cantidad:
Bagazo de maguey mezcalero	3.0 kg	Bagazo de maguey mezcalero	4.0 kg
Vinaza de la destilación del mezcal	6.50 lt	Vinaza de la destilación del mezcal	7.50 lt
Lodo de papel	5.0 kg	Lodo de papel	6.0 kg
Tierra arcillosa	9.0 kg	Tierra arcillosa	10.0 kg
Agua	4.50 lt	Agua	4.50 lt
Pulpa de pencas de maguey	2.0 kg	Pulpa de pencas de maguey	2.50 kg

Una vez preparados los subproductos, se pesaron de acuerdo a las cantidades especificadas en la mezcla 1, se mezclaron, se dejaron reposar por dos horas. La mezcla se llevó a una empresa dedicada a la fabricación de tabicón de cemento, para que la mezcla 1 del BRE fuera moldeada en la máquina vibrobloquera manual M-100, con una capacidad de producción de 600 pzs por día y funciona con motor monofásico de 1 HP, para darle a los primeros prototipos del BRE las dimensiones de un tabicón de cemento de 10 x 15 x 30 cms (figuras 11, 12, 13 y 14).

Los prototipos se dejaron secar un mes al sol, periodo en que los bloques de materiales naturales como el adobe pueden alcanzar su secado máximo de acuerdo con Quintana (2017) y Valqui (2019), (figuras 15, 16, 17 y 18).



Figura 11. Proceso de mezclado de los subproductos de mezcla 1 del BRE.

Figura 12. Máq. vibrobloquera para moldeado del tabicón.

Figura 13. Vibrado y moldeado de mezcla/BRE.

Figura 14. Vista de los primeros prototipos del BRE de 10x15x30 cms.

Fuente: Acervo fotográfico propio de KPLF.

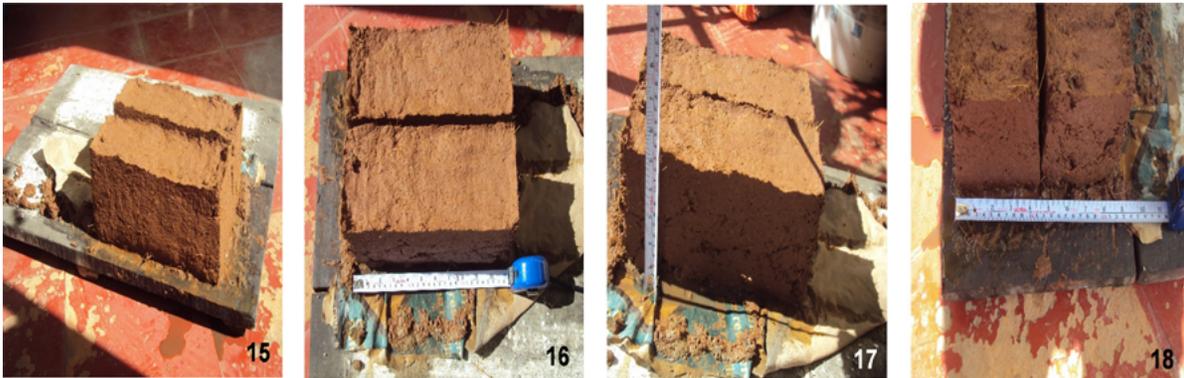


Figura 15. Secado al sol de los prototipos de mezcla 1 del BRE.

Figura 16. Largo del BRE de 30 cms.

Figura 17. Alto del BRE de 15 cms.

Figura 18. Ancho del BRE de 10 cms.

Fuente: Acervo fotográfico propio de KPLF.

Pruebas de Resistencia Estructural

Una vez secos los primeros prototipos, se realizaron las gestiones necesarias para poder utilizar los equipos del Laboratorio de Ingenierías y Arquitectura de la Universidad La Salle Oaxaca (figuras 19, 20 y 21).

Se realizaron las pruebas de compresión axial y a la flexión con la Máquina de Ensayos Universal CMS con capacidad de carga de 1000 kN a las piezas del tabicón de cemento, a las piezas del ladrillo rojo recocido y a las piezas del BRE para comparar los resultados entre ellos y comprobar la viabilidad del Bloque Residual Ensamblable, como se puede observar en las figuras 22, 23, 24, 25, 26 y 27.



Figura 19. Equipo de cómputo e impresora de la Máquina de Ensayos Universal.

Figura 20. Esp. de Control Measurement Systems, mod. WAW-1000r y #/serie AD11688.

Figura 21. Vista gral. de la Máq. de Ensayos Universal de 1000 kN.

Fuente: Acervo fotográfico propio de KPLF.

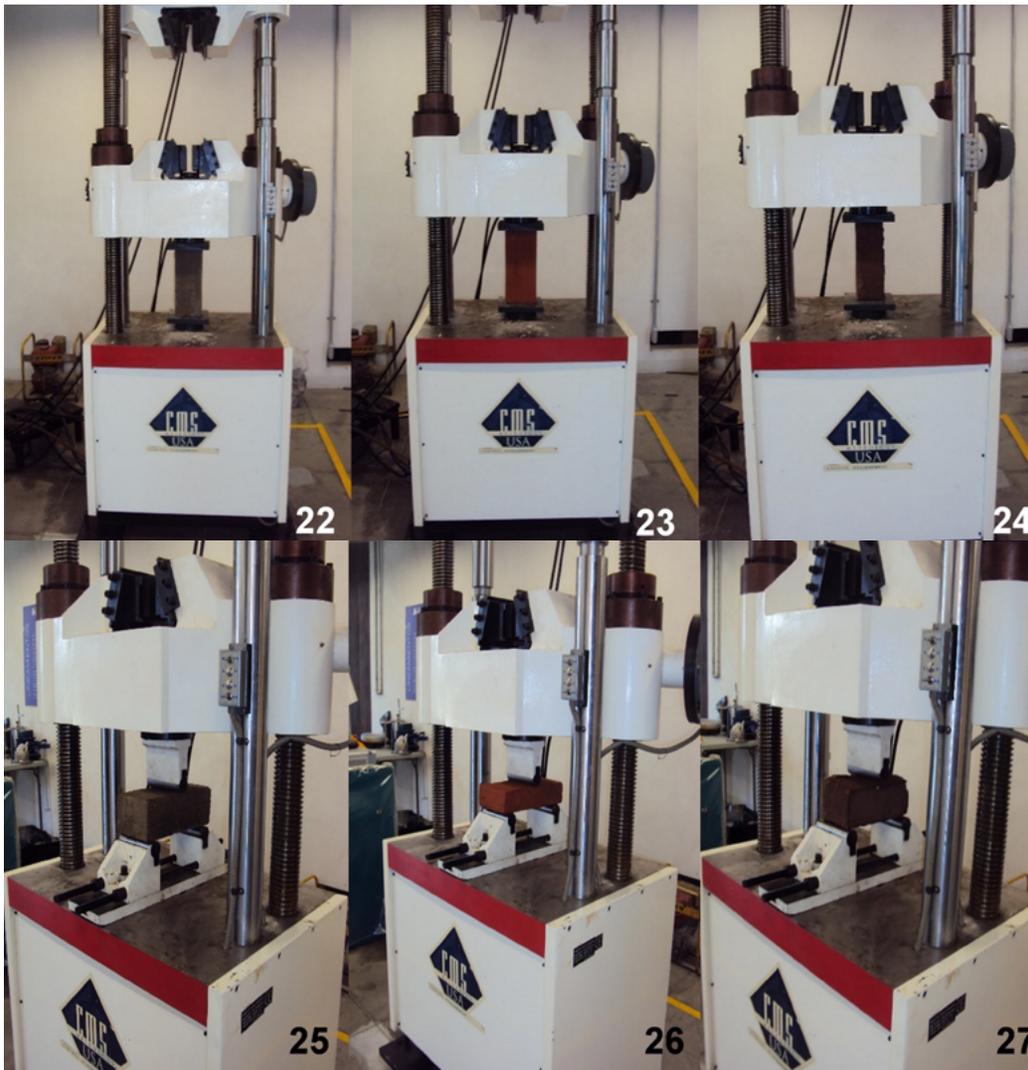


Figura 22. Prueba de compresión axial al tab./cemento con Máq. de Ensayos Univ.-1000 kN.

Figura 23. Prueba de compresión axial al tab. rojo rec. con la Máq. de Ensayos Univ.-1000 kN.

Figura 24. Prueba de compresión axial al BRE con la Máq. de Ensayos Univ.-1000 kN.

Figura 25. Prueba de flexión al tabicón de cemento con la Máq. de Ensayos Univ.-1000 kN.

Figura 26. Prueba de flexión al tab. rojo rec. con la Máq. de Ensayos Univ.-1000 kN.

Figura 27. Prueba de flexión al BRE con la Máq. de Ensayos Univ.-1000 kN.

Fuente: Acervo fotográfico propio de KPLF.

Resultados

Analizando los datos de estas primeras pruebas, es evidente que la propuesta del BRE presentó una resistencia a la compresión más alta que el tabicón de cemento y menor a la del ladrillo rojo (Tabla 14).

Revisando los datos de estas primeras pruebas, es evidente que la propuesta del BRE presentó la resistencia a la flexión más alta, mientras que el ladrillo rojo presentó un valor medio y el más bajo es del tabicón de cemento (Tabla 14).

Tabla 14. Resultados de pruebas de laboratorio de la mezcla 01 del BRE.

Fuente: Elaboración con información obtenida de las pruebas de laboratorio.

Resultados de pruebas de laboratorio de la mezcla 1 del BRE		
Pruebas:	Materiales:	Resultados:
Resistencia a la Compresión	Tabicón de Cemento de 10 x 15 x 30 cms, peso de 7.032 kgs.	27.69 kN = 2823.59 kgs
	Ladrillo Rojo Recocido de 7 x 14 x 28 cms, peso de 4.765 kgs.	50.22 kN = 5121.01 kgs
	Bloque Residual Ensamblable de 10 x 15 x 30 cms, peso de 1.890 kgs.	34.83 kN = 3551.67 kgs
Resistencia a la Flexión	Tabicón de Cemento de 10 x 15 x 30 cms, peso de 7.032 kgs.	20.57 kN = 2097.56 kgs
	Ladrillo Rojo Recocido de 7 x 14 x 28 cms, peso de 4.765 kgs.	21.02 kN = 2143.44 kgs
	Bloque Residual Ensamblable de 10 x 15 x 30 cms, peso de 1.890 kgs.	24.71 kN = 2519.72 kgs

Indicadores Ambientales

Algunas de las desventajas que presenta el block de concreto celular es que requiere de materiales que para su fabricación necesitan extraer más materias primas de la naturaleza (cemento, arena, agua, espumantes químicos y acero), sus procesos de fabricación y reparto requieren de un gran gasto energético y huella ecológica, no cuenta con materiales que aporten inercia térmica al sistema constructivo ensamblable final y cuando termina la vida útil de los bloques, requieren de tratamientos costosos, lentos y muy contaminantes para su degradación en la naturaleza.

El block residual ensamblable contribuye a disminuir las descargas negativas al medio ambiente, para su fabricación no requiere de la extracción de nuevas materias primas

Desempeño Bioclimático de una Escuela de Carlos Leduc en Clima Cálido Sub-Húmedo

de la naturaleza, reutiliza los desechos agroindustriales locales, se conforma un sistema constructivo ensamblable para muros de carga, divisorios y cubiertas ligeras, aprovecha las energías renovables (sol y viento), contribuye a que familias de bajos recursos tengan acceso a sus propias viviendas y la identidad del mezcal oaxaqueño se incrementa al reutilizar los residuos que genera en productos sustentables, como se observa en las tablas 15 y 16.

Tabla 15. Comparación de Indicadores Ambientales entre el block de concreto celular y el BRE.

Fuente: Elaboración propia KPLF.

Criterio de Desempeño Ambiental:	Referencia: Block de concreto celular	Innovación: BRE
Energía Incorporada	La energía de entrada para fabricar 1 kg de concreto celular consta de: Electricidad: 0.26 MJ Gas natural: 1.56 kg Diesel: 0.063 MJ Gas LP: 0.0004 kg Cemento: 0.22 kg Cal: 0.16 kg Arena: 0.62 kg Aluminio: 0.0010 kg Yeso: 0.069 kg Transporte: 0.29 tkm	La energía de entrada para fabricar 1 kg de BRE consta de: Electricidad: 0.10 MJ Diesel: 0.063 MJ Bagazo de agave: 0.50 kgs Vinaza de agave: 1.33 lts Tierra arcillosa: 1.82 kgs Lodo de papel: 1.40 kgs Transporte: 0.29 tkm
Agua Incorporada	La cantidad de agua para fabricar 1 kg de concreto celular es de 2.07 lts	La cantidad de agua para fabricar 1 kg de BRE es de 1.17 lts
Impacto Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Por cada m² de construcción con mat. convencionales se requieren más de 2 toneladas de materias primas extraídas de la naturaleza. ❖ Por cada m² de construcción con mat. convencionales se requieren de 5.7 m³ de agua potable. ❖ Por cada m² de construcción con mat. convencionales se generan 441 kgs. de CO₂, principalmente por la fabricación y uso del cemento y acero estructural. ❖ El peso de construcción con el sistema Mecanocreto es de 160 kg/m². 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Por cada m² de construcción con el sistema BRE se requieren los siguientes residuos: <ul style="list-style-type: none"> ✓ Bagazo/agave: 24.75 kgs ✓ Vinaza/agave: 66 lts ✓ Tierra arcillosa: 90.09 kgs ✓ Lodo/papel: 69.3 kgs. ✓ Agua: 57.75 lts ❖ Por cada m² de construcción con el sistema BRE se generan 0.16 kgs. de CO₂. ❖ El peso de construcción con el sistema BRE es de 36.24 kg/m².
Potencial de reciclaje y reutilización de materiales	Una vez que el sistema de Mecanocreto llega al final de su vida útil se requiere de tratamientos especiales, caros y prolongados para separar, demoler, fundir y obtener nuevamente las materias primas originales que se emplearon para fabricar dicho sistema.	En caso de que las piezas del sistema BRE se dañaran o rompieran, se pueden demoler, se humedece la mezcla y se moldea para que se pueda volver a utilizar. En caso de desecharse, son materiales orgánicos, por lo que se pueden degradar en la naturaleza.
Toxicidad de materiales	La mayoría de los materiales con los que se fabrica el sistema de Mecanocreto son artificiales y contienen varias sustancias nocivas para la vida en general, recomendándose tratamientos especiales y caros para su retorno al medio ambiente.	Todos los materiales con los que se fabrica el sistema BRE son orgánicos, por lo que se puede desintegrar en los terrenos sin afectar la flora y fauna locales.

Tabla 16. Comparación de aportaciones del BRE contra el block de concreto celular.

Fuente: Elaboración propia KPLF.

Aportaciones Técnicas:	Referencia: Block concreto celular	Innovación: BRE
Tiene resistencia a la compresión y a la flexión?	SI	SI
Es un material permeable al agua?	SI	SI
Es un material que cuenta con inercia térmica?	NO	SI
En su elaboración requiere de la extracción de materias primas?	SI	NO
Durante su fabricación se necesita de energías no renovables?	SI (90%)	SI (30%)
Existe un ahorro energético en su elaboración?	NO	SI
En su fabricación emplea la reutilización de subproductos locales?	NO	SI
Es una opción económica para la gente de escasos recursos?	NO	SI
Representa una opción que quita descargas al medio ambiente?	NO	SI
Requiere de mano de obra especializada en su construcción?	NO	NO
Se reducen los desperdicios y el margen de error?	SI	SI
Se lleva mucho tiempo construir con esta opción?	NO	NO
Al término de su vida útil se puede reintegrar a la naturaleza fácilmente?	NO	SI

Comportamiento térmico y confort

De acuerdo con González (2018) la incorporación de lodo de papel a un bloque de arena sílice, aportó las siguientes mejoras en su desempeño comparado con un block de tierra tradicional: Redujo en un 47% la densidad, redujo la conductividad y aumentó su calor específico en un 20%, por lo que lo hizo al mismo tiempo térmicamente más resistente. Por otro lado, la incorporación de lodo de papel en la mezcla referida hizo que tuviera una reducción del 64.5% en la conductividad, aumento en el calor específico y reducción en sus valores de densidad, respecto a un bloque de concreto celular (tabla 17).

Tabla 17. Comparación de aportaciones termofísicas del block de arena sílice y lodo de papel, respecto a un block de tierra tradicional y un block de cemento celular.

Fuente: (González, 2018)

Propiedades	Ladrillo	Adobe	Silice - lodo de papel	Bloque de concreto
Masa volumétrica (Kg/m ³)	1800	1620	855	2300
Conductividad térmica (W/m °C)	0.72	0.49	0.383	1.08
Calor específico (J/Kg °C)	829	1240	1573	920
Difusividad térmica (m ² /s)	*1.7x10 ⁻³	*8.7x10 ⁻⁴	1.02x10 ⁻³	1.84x10 ⁻³
Retraso térmico (hrs)	*4 hrs 38'	*6 hrs 32'	6 hrs 28'	4 hrs 31'
Amortiguamiento térmico (%)	*30	*18	18	*30
Resistencia térmica (m ² °C/ W)	*0.208	*0.306	0.391	0.138

Hacemos notar especialmente la aportación que se presenta al retardo térmico, que es significativo para el material con agregado de lodo de papel, tomando en cuenta que en esta región se presentan climas con oscilaciones térmicas que van de 21 K en el mes de enero, a 13.4 K en el mes de junio, que precisan del uso de masa térmica con un retardo mínimo de 8h (figura 28).

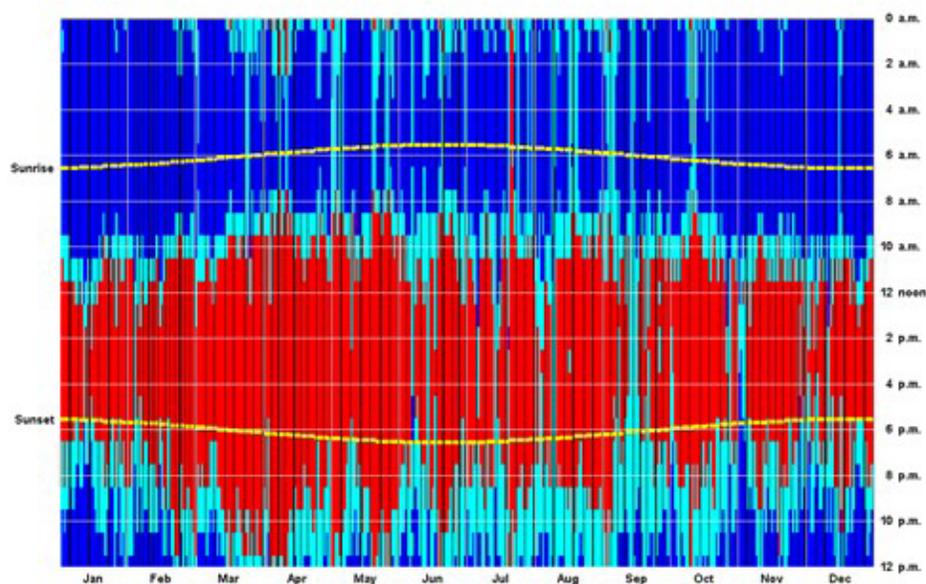


Figura 28. Graficación de temperaturas horarias de en un año típico. Donde las temperaturas en azul se encuentran en un rango de 0 a 20°C (37%); en cian las ubicadas en un rango de 20 a 24°C (26%); y en rojo las distribuidas en el rango de 24 a 38°C (37%).

Fuente: elaboración propia en Climate consultant

Se estima que el sistema constructivo estudiado en este trabajo, tenga un comportamiento más estable que el tabique y que el block de cemento, cercano al material presentado líneas arriba. Con los datos obtenidos por González (2018), se realizó una corrida térmica paramétrica en Ener Habitat, para identificar que el comportamiento que obtendremos con el BRE, es el objetivo que se busca en un clima como el de los valles centrales de Oaxaca, ayudando a reducir la oscilación de temperaturas presentadas al interior de este espacio teórico, y acercándose más al desarrollo dentro de la zona de confort. La evaluación se realizó tomando en cuenta un muro de 20 cm de espesor, en una orientación sur, con una absorptancia de 0.5, sin aire acondicionado (figura 29).

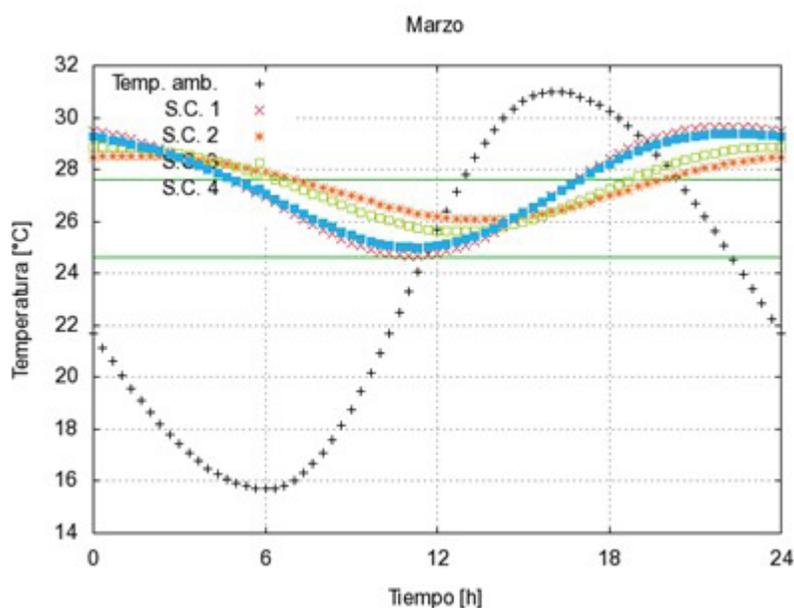


Figura 29. Simulación en Ener Habitat de un material similar al BRE con tierra y lodo de papel, como objetivo de nuestra etapa 2. Los materiales simulados son: 1) ladrillo; 2) Adobe; 3) Sílice y Lodo de Papel; 4) Block de concreto celular.

Por estos datos arriba presentados, anteriormente encontrados en otras investigaciones de propiedades térmicas, en la segunda fase de estudio de la presente investigación se espera que el BRE, mejore el desempeño térmico de la construcción y ofrezca una significativa aportación al confort humano.

Tercera etapa del estudio

En la tercera etapa de este estudio, se desarrollará un modelo de vivienda basado en este material BRE, considerando que se integre un sistema sin marcos rígidos, prefabricado, y fácilmente ensamblable por los usuarios.

Tomando en cuenta las cantidades de materiales que conforman la mezcla para generar un block, y la cantidad de blocks que se utilizan en una casa de 120 m² de construcción, estudiada como prototipo preliminar de este estudio, se obtienen la siguiente cantidad de materiales utilizados mostrados en la tabla 18.

Al utilizarse esta cantidad de materiales, se hace notar que sería la cantidad de desechos de la industria mezcalera y papel de reúso, que se pueden encapsilar en la construcción, y que al mismo tiempo libera el medio ambiente de esta carga ambiental negativa.

Tabla 18. Cantidad de materiales utilizados en una casa prototipo de acuerdo a los materiales usados en la mezcla del BRE.

Cantidades de residuos para fabricación del BRE			
Terreno y construcción:	Residuos:	Cantidades por 1 m ² :	Cantidades por 120 m ² :
Terreno de 6 x 20 mts	Bagazo de agave	24.75 kgs	2.97 ton
Casa de 2 niv. de 6 x 9 mts con 120 m ² de construcción			
Planta Baja: Cochera 1 auto, acceso peatonal, jardín frontal, sala – comedor, cocina abierta, recámara 1, escaleras, baño completo, jardín posterior, terraza y área/lavado.	Vinaza de agave	66 lts	7.92 m ³
	Papel de reúso	69.30 kgs	8.31 ton
	Tierra arcillosa	90.09 kgs	10.81 ton
Planta Alta: recámara 2, recámara principal, escaleras, dos baños completos y terraza.	Agua	57.75 lts	6.93 m ³

Conclusiones

La conformación del BRE contribuye a reducir el impacto negativo que causan los residuos de la industria mezcalera.

Una vivienda de 120 m² de construcción contribuye a encapsular 2.97 ton de bagazo de agave; 7.92 m³ de vinaza de agave; 8.31 ton de papel de reúso.

El BRE, obtuvo una resistencia mecánica más alta que la que presenta el block de cemento celular, aun cuando el tabique rojo recocido tiene más resistencia mecánica de acuerdo con las pruebas de laboratorio.

Dados los resultados de las primeras pruebas de laboratorio de compresión axial y a la flexión, es necesario seguir trabajando en las mezclas propuestas para aumentar la resistencia a la compresión, a la flexión, determinar el grado de permeabilidad al agua y las propiedades térmicas que pueda presentar el BRE, con la finalidad de responder asertivamente a las Normas Oficiales Mexicanas de Construcción porque se pretende hacer del Sistema Constructivo BRE una vía de fácil acceso a la vivienda térmicamente confortable para las familias que no cuentan con vivienda propia en los municipios conurbados a la Ciudad de Oaxaca.

Referencias

Aguiar, A., (Noviembre del 2017), “Fabricación de bloques ecológicos a base de material producto de la construcción”, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería Civil y Construcción, pág. 1 a 132.

Alegría, A. (Diciembre del 2017), “Mezcaleras de Oaxaca emprenden cultivos de siembra sustentable”, La Jornada, págs. 1-5.

Alfonso, A. (Enero del 2018), “Materiales de construcción con residuos industriales de vertederos ecológicamente invasivos”, Arquitectura y Urbanismo, Volúmen XXXIX, Número 1, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, ISSN 0258-591X, ISSN 1815-5898 <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376858935002>

Ancizar, A., Figueroa, K., Durán, N. y Robayo, M., (Junio del 2017), “ Ecobloque estructural para vivienda de interés rural: Un aporte para las comunidades del Alto Magdalena-Colombia”, Universidad Católica Luis Amigó, pág. 1-12. DOI: 10.21501/21454086.2214

Benítez, V., (Junio del 2017), “Adobe estabilizado con extracto de cabuya”, Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, pág. 1 a 86.

Bertha, J. (Enero del 2019). “Ladrilleras: entre la crisis y la contaminación”. Noticias NVI Oaxaca, 1-5.

Bojórquez, G., Luna, A., y Gallegos, R., (Enero-Abril 2000), “Sílice y lodo de papel, uso de residuos industriales agregados en un concreto ligero”, Revista TEMAS de ciencia y tecnología, Vol. 4, Núm. 10, pág. 3 a 9.

Cervantes, A., (2008), “Nuevas tecnologías en Concretos – Concreto celular, concreto reforzado con fibra y concreto ligero estructural”, Congreso nacional de administración y tecnología para la Arquitectura, Ingeniería y Diseño, Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco.

Cortés, C. (2009). “Propiedades mecánicas a tensión de las fibras del bagazo del Agave Angustifolia Haw, residuo proveniente de la producción artesanal del mezcal”. (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, Ed.) Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México: Instituto Politécnico Nacional.

Consejo Regulador del Mezcal – DOM (2020), “Informe estadístico 2020”.

Danitza, K., Sánchez, R., Pita, J., Pérez, L. (Julio – Sept. del 2019), “Caracterización de las propiedades mecánicas de un ladrillo no estructural de tierra como soporte de material vegetal en muros verdes”, Ingeniería, Investigación y Tecnología, Volumen XX, Número 3. ISSN 2594-0732 FI-UNAM <http://dx.doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2019.20n3.030>

Flores, L., Cortés, E., Macías, M., García, M. y Esquivel, L. (2017), “Diseño y manufactura de una máquina ladrillera compacta para comunidades rurales”, Memorias del XIX Concurso Lasallista de Investigación, Desarrollo e Innovación CLIDi 2017, pág. 7 – 12.

Flores, P., Robles, C. y Castañeda, E., (Septiembre del 2020), “Generación y caracterización básica de bagazos de la agroindustria del mezcal en Oaxaca”, Revista Mexicana Ciencias Agrícolas, Volúmen II, Número 6, pág. 1437 – 1445.

González, D., (Enero – Abril del 2015), “Las energías renovables al servicio de la humanidad”, *Arquitectura y Urbanismo*, Volumen XXXVI, Número 1, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba, ISSN 0258-591X <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376839253008>

Illsley, C., Giovannucci, D., y Bautista, C. (2009). “La dinámica territorial de la zona mezcalera en Oaxaca”. Ciudad de México, México: Grupo de Estudios Ambientales A. C.

López, M. (2015), “Una mirada a la industria del mezcal de Oaxaca”, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Económicas, pág. 273 a 293.

Lugo, E., Ramos, C., Cid, A., & Quevedo, M. (2019). “RECICLAR, la falacia de la industria en la lucha contra la contaminación plástica, estado de reciclaje en México”. (A. M. plástico, Ed.) Ciudad de México, México: Greenpeace México A. C.

Martínez García Llácer, A. (2016). *Arquitectura Alternativa II: Construcción a bajo costo, reciclar y construir con el desecho (Vol. II)*. (E. T. Arquitectura, Ed.) Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

Maya, E., (2014), “Métodos y técnicas de investigación – Una propuesta ágil para la presentación de trabajos científicos en las áreas de Arquitectura, Urbanismo y otras disciplinas afines”, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura, pág. 3 a 88.

Moreno, D., Carrillo, J., (Noviembre del 2019), “Normas APA 7ª edición - Guías de citación y referenciación”, Universidad Central, Coordinación Editorial, pág. 5 a 24.

Montes, A. (Septiembre del 2017), “Mezcal y tierra”, Editorial Carteles Editores, Primera Edición, pág. 9 a 101.

Muñoz, C. (2011), “Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis”, Editorial Prentice Hall, Segunda edición, pág. 1 – 27, 66 – 75, 78 – 86, 90 – 114, 115 – 130.

Oliver, A., Neila, F., García, A., (Enero – Marzo del 2012), “Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica”, *Materiales de construcción*, Volumen 62, 305, Número 131-140. ISSN 0465-2746 eISSN 1988 – 3226, Doi: 10.3989/mc.2012.58010

Ordaz, L. y Bailón, A., (Agosto del 2019), “Aprovechamiento de los subproductos valiosos de la industria del mezcal en Durango”, pág. 14 – 23.

Ortíz, L., (Noviembre del 2012), “Informe final de Diagnóstico nacional del sector ladrillero artesanal en México”, Empresa de Servicios Profesionales para el Desarrollo Económico, S. C., SER- Pro, pág. 2 a 36.

Peterssen, S., (Mayo – Agosto del 2020), “Los materiales de construcción, su ausencia en la certificación de edificios sustentables”, Chile, *Arquitectura y Urbanismo*, Volumen XLI, Número 2, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, ISSN 0258-591x, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376864178009>

Plan Estatal de Desarrollo de Oaxaca (2016-2022), Gobierno del Estado de Oaxaca. https://www.finanzasoxaca.gob.mx/pdf/planes/Plan_Estatal_de_Desarrollo_2016-2022.pdf

Pozo, A. (2019), "Materiales compuestos de fibras naturales", E. T. Espacio Editorial, Madrid, España, Universidad Politécnica de Madrid.

Quintana, D., Vera, M., (2017), "Evaluación de la erosión y la resistencia a compresión de adobes con sustitución parcial y total de agua en peso por mucílago de nopal en porcentajes del 0%, 25%, 50%, 75 y 100%", Universidad Andina del Cusco, Perú.

Ramos, A., Sepúlveda, J. y Garcés, L., (2019), "Pequeñas y medianas empresas productoras de ladrillo artesanal en Oaxaca, México: Contexto de pobreza", Revista de Ciencias Sociales (Ve), Vol. XXV, Num. 2, Universidad de Zulia, Venezuela.

Rodríguez, A., De la Cerna, C., (Diciembre del 2017), "El mezcal, su producción y tratamiento de residuos", Alianzas y tendencias BUAP, Volumen 2, Número 8, pág. 10 a 14.

S/A, (Agosto del 2010), "Tabiqueros: la persistencia de una tradición en el Estado de México", Número 253, pág. 1 a 5.

S/A, (Diciembre del 2014), "La contaminación provocada por el humo de los hornos de las ladrilleras ubicadas en los Valles Centrales", De la Redacción, pág. 1 a 5.

SAGARPA, (Septiembre del 2016), "Vinazas: Alternativas de uso – Nota informativa sobre innovaciones en materia de productividad del sector", SAGARPA, CONADESUCA, Universidad Autónoma Chapingo", pág. 2 a 11.

SEMARNAT, (2020), "Resumen ejecutivo del programa estatal para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos urbanos y manejo especial en el estado de Oaxaca", pág. 16.

Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) (2016), "Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social". http://diariooficial.gob.mx/SEDESOL/2016/Oaxaca_087.pdf

Serrano, M., Pérez, D., Torrado, L. y Hernández, N., (2017), "Residuos inertes para la preparación de ladrillos con material reciclable: una práctica para protección del medio ambiente", Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, pág. 13 – 138. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81652135016>

Valdez, K., (2018), "Resistencia a la compresión axial del adobe compactado con la incorporación de porcentajes de caucho triturado de neumáticos", Universidad Privada del Norte, Lima, Perú, Facultad de Ingeniería, pág. 22 a 86

Valqui, E. y Lozada, L., (2019), "Bloques de colpar confinado con Gynerium sagittatum como alternativa para disminuir riesgos sísmicos", Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Perú.

Vega, N., y Pérez, P. (Junio del 2017), "Oaxaca y sus regiones productoras de mezcal: Un análisis desde cadenas globales de valor", Perspectivas Rurales, pág. 103 a 132.

Velásquez, S., Peláez, G., y Giraldo, D. (Junio del 2016), "Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos", Informador Técnico de Colombia, Volumen 80, Número 1, pág. 77 a 86.

Veronese, P. (Octubre del 2018), "Innovar como filosofía de vida", pág. 1 a 15.

Zavala, J. (Enero del 2021), “ Uso del agua, el lado oscuro tras el “Boom”de la industria del mezcal en Oaxaca”, Periódico El Universal, Oaxaca.

González, Alfonso (2018). Materiales de construcción con residuos industriales de vertederos ecológicamente invasivos. *Arquitectura y Urbanismo*, XXXIX(1),5-26.[fecha de Consulta 30 de Agosto de 2021]. ISSN: 0258-591X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376858935002>

<https://oaxaca.eluniversal.com.mx/sociedad/11-01-2021/uso-del-agua-el-lado-oscuro-tras-el-boom-de-la-industria-del-mezcal-en-oaxaca>

Propiedades de la Cal y su Relación con la Calidad del Aire y la Salud de los Ocupantes en las Edificaciones

Dr. José Roberto García Chávez¹

Dr. Rosario Tovar Alcázar²

1 Universidad Autónoma Metropolitana | CyAD, Departamento de Medio Ambiente |
Área de Arquitectura bioclimática | Posgrado en Diseño Bioclimático
Correo: josebertogsol@gmail.com

2 Universidad Autónoma Metropolitana | CyAD, Departamento de Medio Ambiente
Área de Arquitectura bioclimática | Posgrado en Diseño Bioclimático
Correo: rosariotovaralcazar@hotmail.com

Resumen

La cal es un material de construcción milenario que ha demostrado su efectividad y amplia gama de beneficios. Al paso del tiempo, las edificaciones han ido perdiendo su funcionalidad en algunos aspectos, puesto que hoy en día la mayoría de ellas son altamente dependientes de diversos tipos de energía proveniente de combustibles fósiles. Condición que puede ser revertida si se retorna a las prácticas constructivas tradicionales, considerando sus múltiples aplicaciones y las ventajas que ofrece en cada una de éstas. Por ejemplo, la cal puede utilizarse con importantes ventajas en la construcción. De igual forma, gracias a su propiedad de carbonatación, puede contribuir de forma directa a la mitigación de los problemas ambientales que aquejan al planeta. En este trabajo se presentan las ventajas de utilizar la cal como material de construcción y sus beneficios ambientales y en la salud de los ocupantes de las edificaciones se plantean estrategias para su aplicación en recubrimientos, con base en los resultados obtenidos en el desarrollo experimental de diversos prototipos.

Palabras clave: Cal, edificaciones, sustentabilidad, resiliencia, salud.

Abstract

Lime is an ancient construction material that has proven its effectiveness and wide range of benefits. Over time, buildings have been losing their functionality in some aspects, since today most of them are highly dependent on various types of energy from fossil fuels. Condition that can be reversed if we return to traditional construction practices, considering its multiple applications and the advantages it offers in each of them. For example, lime can be used to great advantage in construction. Similarly, thanks to its carbonation property, it can directly contribute to mitigating the environmental problems that afflict the planet. In this work, the advantages of using lime as a construction material and its environmental benefits are presented, as well as strategies for its application in coatings on the health of the occu-

pants of the buildings, based on the results obtained in the experimental process of various prototypes.

Keywords: Lime, buildings, sustainability, resilience, health.

Introducción

Cronología de los usos históricos de la cal

La cal es uno de los materiales de construcción más antiguos del mundo. Tiene una larga y rica historia y se ha aplicado en múltiples edificaciones, incluso en algunas muy emblemáticas, a nivel mundial. La cal se ha utilizado en la industria de la construcción durante más de 2000 años. En términos generales, la cal es un material conglomerante¹ como el cemento y el yeso; que posee una alta alcalinidad, con un $\text{pH} > 12$. La cal se obtiene de la roca sedimentaria caliza, la cual es un carbonato de calcio que, al ser calcinado a una temperatura elevada (de $1,600\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1,700\text{ }^{\circ}\text{C}$), se convierte en un óxido de calcio que es lo que comúnmente se conoce como “cal viva” (CaO) y en el proceso se libera CO_2 . Posteriormente, la “cal viva”, al contacto con el agua, se “hidrata”, formando el polvo blanco conocido como hidróxido de calcio o “cal hidratada”. Éste es el producto que se comercializa envasado y que se utiliza principalmente en la construcción.

Se menciona su uso en las mezclas para mortero, yeso interno, revoque externo, cimentaciones y, específicamente en ambientes con altos niveles de humedad como acueductos y estanques, entre otros. Además del barro, la tierra y la arcilla, la cal es uno de los materiales aglutinantes más antiguos. Los primeros usos del mortero de cal datan de 6500 a. J. en la región del Valle del Indo (actual Pakistán) y en otras regiones de África y posteriormente en Egipto en diversas pirámides, con una antigüedad de alrededor del 2500 a. J. Además, hay numerosas reminiscencias de su uso extensivo durante el Imperio Romano (que se estableció del año 27 a. J. al 476 d. J.), que desarrolló una forma de hacer el proceso de elaboración del mortero de cal más práctico, utilizando hornos para su calcinación a altas temperaturas, como se mencionó anteriormente.

Tradicionalmente, los morteros contenían únicamente cal y arena; requerían CO_2 para endurecerse o convertirse en piedra caliza y no podían conseguirlo si se exponían al agua o a la humedad. Ciertamente, los romanos fueron los primeros en desarrollar morteros hidráulicos, mezclando cal con una puzolana (materiales naturales o artificiales que contienen sílice y/o alúmina.), posiblemente ceniza volcánica o polvo de ladrillo. Esto hizo que la mezcla se endureciera mucho más rápido y también permitió su uso en estanques, cisternas y acueductos, entre otras construcciones. Un notable ejemplo del uso de la cal se encuentra en el Pantheon de Roma, una de las edificaciones antiguas mejor preservadas, construido en el año 123 a. J., bajo el régimen del emperador Hadrian, de 119 d. J. a 128 d. J. aunque algunos historiadores estiman que el edificio original fue construido entre el 29 a. J. y el 19 a. J. por

¹ Material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto, por efectos de tipo -exclusivamente- químico.

Marcus Agrippa, un arquitecto y cónsul romano, amigo cercano del emperador romano Augusto; y que durante más de 1,500 años fue la mayor cúpula construida y con un diámetro de 43.4 metros, aún tiene el récord de ser la mayor construcción de concreto no armado que existe a nivel mundial.

El ingrediente clave es la mezcla específica de piedra caliza y ceniza volcánica utilizada en el mortero, en este histórico y notable ícono de la arquitectura (figura 1). Otra característica notable del Pantheon es que la altura desde el suelo hasta el óculo (de 8.30 metros de diámetro) y el diámetro de la cúpula son iguales: 43.20 metros. Esto significa que una esfera perfecta podría caber dentro del Panteón, que se cree que es una referencia simbólica a un lugar sagrado, o literalmente, a la esfera celestial (figura 2). Además, el óculo, al mediodía solar el día 21 de abril, en que se conmemora la fundación de Roma (según la tradición literaria romana, se inició el 21 de abril del año 753 a. J., cuando los gemelos Rómulo y Remo fundaron la ciudad de Roma), los rayos del sol pasan a través del óculo generando un efecto de luz excepcional, que ilumina la entrada principal del edificio en el norte.



Figura 1. Pantheon de Roma, vista interior.

Fuente: <https://www.wantedinrome.com/news/covid-19-in-italy-rome-reopens-the-pantheon-after-three-months.html>

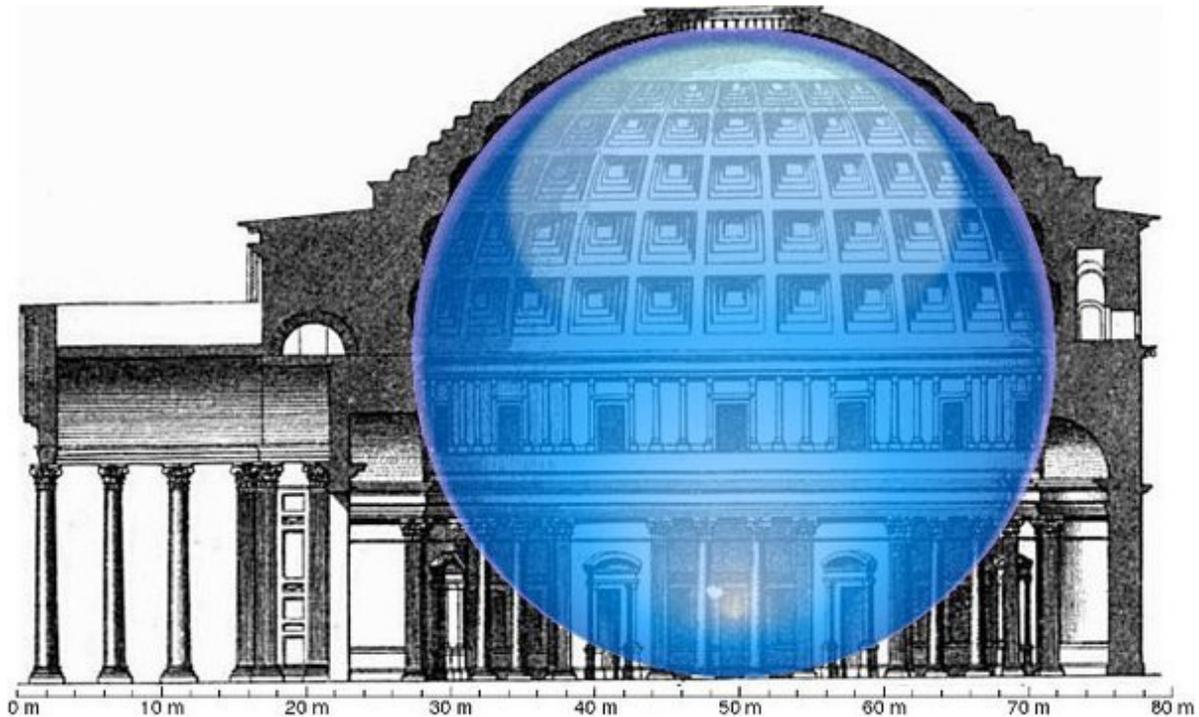


Figura 2. Pantheon de Roma. Sección. Relación esférica de la altura y el diámetro de la cúpula.

Fuente: <https://www.quora.com/Why-is-the-Pantheon-one-of-the-most-well-preserved-Roman-temples>

Por otra parte, mezclando mortero de acuerdo con la fórmula del admirable arquitecto, escritor, ingeniero y tratadista romano Marco Vitruvio Pollion (80 a. J a 15 d. J.), quien es su obra excelsa: “*Los Diez Libros de la Arquitectura*”, indica cómo debe ser utilizada la cal y en qué proporciones debe ser mezclada con otros agregados para fabricar el mortero, y que en esencia *se debe preparar la mezcla en una proporción de una parte de cal por tres de arena (1:3)*, con algunas variantes, de acuerdo a la aplicación (Vitr., Book II and De Architectura,; II, Chapter V y V, XII).

En posteriores análisis científicos, se conoció que el mortero de cal incluía “grupos densos de un mineral duradero llamado stratlingita²” (C2ASH8). Además, es importante mencionar que la puzolana, que es un material silíceo o silico-aluminoso que por sí solo posee poco o ningún valor cementante, pero que finamente dividido y en medio húmedo a temperatura ordinaria, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio, formando un compuesto con propiedades cementantes.

Otros ejemplos de la utilización de la cal, obtenida de rocas carbonatadas, principalmente, calizas y dolomitas, como conglomerante en revestimientos exteriores e interiores ha sido una constante a través de la historia en diversas culturas y civilizaciones que han habitado y habitan regiones como las del Mediterráneo. Por ejemplo, en la ciudad de Jericó (actualmente Cisjordania, en Palestina), se han encontrado recientemente fragmentos de construcciones con cal de aproximadamente 10,000 años de antigüedad. En Mesopotamia, que se considera

2 Mineral del género de los silicatos.

la primera civilización conocida, la cal se usaba en combinación con el barro o arcilla como revestimiento de muros de templos, canalizaciones de agua, baños, aljibes y viviendas, entre otros. Asimismo, se ha encontrado su aplicación en la extraordinaria ciudad al abrigo de la tierra, en Cappadocia, ubicada en Turquía y construida por la cultura de los Hititas en torno al año 1,400 a. J. En esta arquitectura al abrigo de la tierra, se aprovecha la inercia térmica y las temperaturas en niveles de confort térmico del subsuelo donde se construyó. En el año de 1963, un habitante de Derinkuyo descubrió esta maravillosa ciudad subterránea. Los hititas usaban la cal para revestir el interior de los espacios arquitectónicos donde vivían, consolidándolos y estructurándolos, sin perder su calidad y propiedad de transpiración necesaria en los interiores, entre otras (figuras 3 y 4). Esta ciudad subterránea consta de 8 niveles, donde se ubican diversos espacios arquitectónicos como una escuela de misioneros, ductos de ventilación termoconvectiva, cocinas, comedores y dormitorios, entre otros.

Por otra parte, los egipcios emplearon la cal como apoyo de las pinturas en el interior de las pirámides. Asimismo, en diversas edificaciones clásicas de la cultura griega se encuentran restos de policromía realizada con lechadas de cal, pigmentos minerales y aditivos orgánicos. Los romanos acuñaron la palabra que se conoce hoy en día como estuco y perfeccionaron la técnica empleada por los griegos.

En la región de Andalucía, se pueden apreciar notables ejemplos de aplicación en superficies y decoraciones con un alto nivel tecnológico y creativo, principalmente en construcciones durante el período de ocupación árabe (del año 711 d. J. hasta 1492 d. J.), en la Alhambra de Granada y la Mezquita de Córdoba (figuras 5 y 6). El Palacio de la Alhambra fue construido por primera vez en 1236 por los últimos emires musulmanes (reyes) en España y la dinastía Nazarí.

El mortero conocido como Al-Andalus es un antiguo aglutinante o mortero de cal, que se utilizó durante siglos en numerosos edificios históricos de Al-Andalus, en Granada y Córdoba, España. Las propiedades físico-químicas y microscópicas de los morteros de Al-Andalus en Granada se estudiaron como parte de una investigación sobre las materias primas minerales presentes en el territorio de España. Un resultado significativo de este estudio fue que los morteros presentaron altos índices de humedad, adhesividad (altos niveles de aglutinante) y resistencia mecánica.

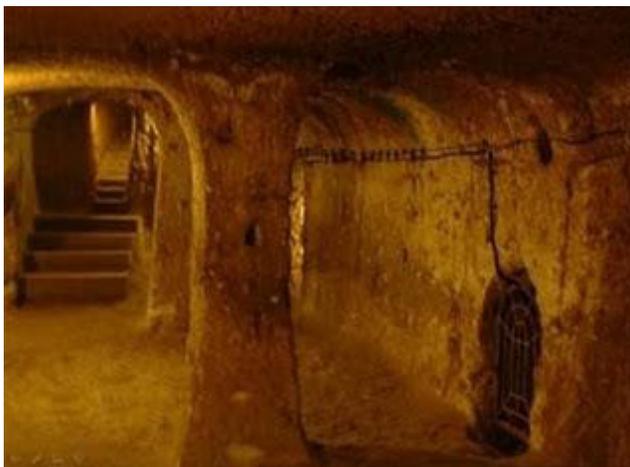


Figura 3. Vista de espacios interiores de la ciudad al abrigo de la tierra de Derinkuyo, en Capadocia, Turquía.

Fuente: <https://es.paperblog.com/arquitectura-subteranea-770732/>



Figura 4. Vista en sección de la ciudad al abrigo de la tierra de Derinkuyo, en Capadocia, Turquía.

Fuente: <https://es.paperblog.com/arquitectura-subterranea-770732/>



Figura 5. Vista exterior de la Alhambra.

Fuente: <https://vasariplaster.com/pages/history-of-plaster>

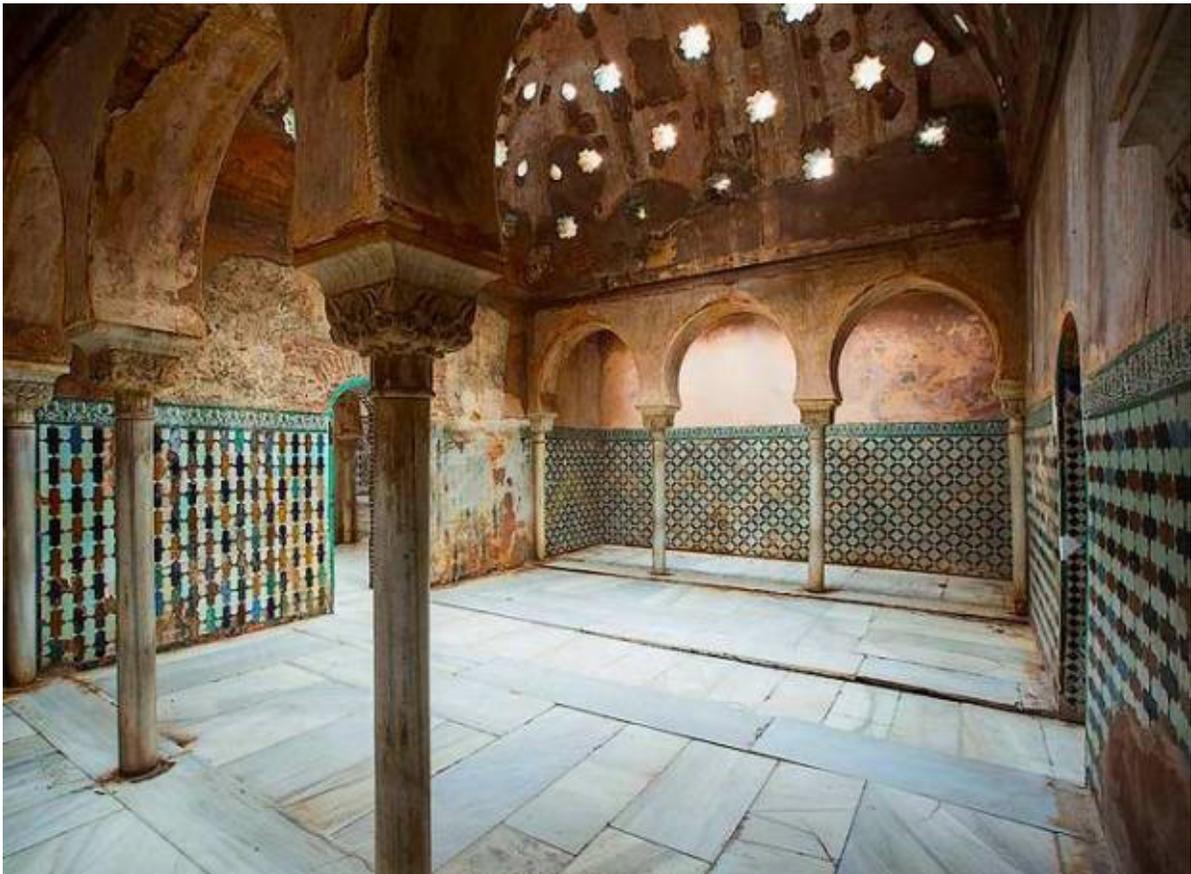


Figura 6. Vista interior de los baños del Hamam del Palacio de Comares de la Alhambra. Se aprecian las bóvedas horadadas con numerosos tragaluces; el bayt al-maslaj o sala de las Camas, donde hay dos amplios aposentos que están ligeramente elevados; la linterna central típica de la arquitectura nazarí; la bayt al-sajun, el hipocausto, las salas de vapor.

Fuente: <https://vasariplaster.com/pages/history-of-plaster>

1. Propiedades y beneficios de los materiales de construcción como la cal

La cal ha sido un material de construcción que se ha aplicado en múltiples construcciones a nivel global. Una de sus principales ventajas es su alta permeabilidad al vapor, lo que permite que la envolvente edificatoria “respire”, con lo cual se reduce el riesgo de que la humedad quede atrapada y la consiguiente afectación a la “piel del edificio”, también se inhibe la condensación y sus consecuencias en la salud de sus ocupantes. Ciertamente, al ser la cal permeable al vapor, el aire ambiente puede traspasar la envolvente constructiva, de una manera que no ocurre con un material más denso como es el caso del cemento o los revoques a base de polímeros, entre otros. Además de la permeabilidad, otros importantes beneficios que ofrece el uso de la cal en las construcciones son el hecho de que la cal evita la condensación, debido a que la humedad no se acumula en los espacios arquitectónicos, evitando la formación de moho, que no solo es desagradable a la vista, sino, que además puede liberar esporas que pueden afectar severamente el sistema respiratorio y en consecuencia, deteriorar la salud de los ocupantes.

Asimismo, la cal es una aliada para el medio ambiente, ya que no libera productos químicos dañinos, por lo que, a diferencia de otros productos y materiales sintéticos en la construcción, es segura para utilizarse en diversos ambientes naturales. Por otra parte, la cal tiene menos energía incorporada que el cemento y al absorber CO₂ del ambiente, tiene un efecto favorable al mitigar el Cambio Climático del planeta. Con el uso apropiado de la cal es posible la estabilización de suelos con contenido de arcillas expansivas; por ejemplo. También, con el uso de pequeñas cantidades de cal se pueden proteger materiales vulnerables y de baja energía incorporada, como la arcilla o barro y las pacas de paja, entre otros.

La cal proporciona adherencia, debido a que su composición molecular está formada por partículas muy finas, mucho más pequeñas que las que forman el cemento, y es más adhesiva, es decir, aglutinante lo que le permite penetrar en los microscópicos espacios de las superficies de otros materiales, para obtener una adhesión perenne, sin ocasionarles daño alguno, lo que si puede ocurrir con mezclas de cemento. La cal es un material de construcción que a diferencia de los materiales tiene un nivel de flexibilidad apropiado y, por lo tanto, tiene un mejor comportamiento en casos de movimientos sísmicos en las construcciones. Ciertamente, los materiales más rígidos como de cemento, pueden agrietarse o deformarse, incluso con leves movimientos o expansiones del terreno. La cal tiene gran durabilidad, lo que se confirma con diversas edificaciones que fueron construidas hace miles de años y aún se encuentran en buenas condiciones.

Otras de las ventajas de la cal es que es plástica y maleable y se puede producir a pequeña escala, lo que presenta un menor impacto ambiental. Además, la cal, por ser cáustica o abrasiva, tiene cualidades desinfectantes, generando ambientes más saludables. También, las superficies y los materiales de cal pueden volverse más resistentes con el tiempo, debido a la formación de cristales de calcita que se forman en ambientes ricos en cal, algo que no ocurre con los cementos.

Finalmente, la cal aplicada como acabado superficial es estéticamente agradable, con un aspecto más natural que procede de la doble refracción de la luz que se genera a través de los cristales de calcita que están presentes en ella, creando una textura más suave que la que se obtiene con productos a base de cemento y por lo tanto, se puede implementar favorablemente en edificios, tanto contemporáneos como tradicionales.

En su utilización en pinturas de exteriores en su estado original, la cal proporciona altos niveles de reflectancia, lo que permite reducir significativamente las ganancias de la irradiación solar y favorecer la obtención de condiciones de confort térmico, lo cual es conveniente, principalmente en climas cálidos.

2. Energía incorporada en los materiales de construcción y su relación con la sustentabilidad. El caso de la cal

Todas las actividades humanas provocan un impacto en el medio ambiente. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP por sus siglas en Inglés, United Nations Environmental Program), el sector de la construcción es responsable de más del

38% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (UNEP, 2020). Actividades como la minería, el procesamiento, el transporte, las operaciones industriales y la combinación de productos químicos dan como resultado la liberación de seis gases GEI, como bióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxidos de nitrógeno (N₂O), Ozono (O₃), fluorocarbonos (halocarbonos) y vapor de agua. Cuando estos gases son emitidos a la atmósfera, absorben una parte de la irradiación solar y la redistribuyen en forma de radiación infrarroja de onda larga en la atmósfera, calentando el planeta. Con una cantidad exorbitante de GEI emitidos diariamente, el espesor de la capa de la atmósfera se incrementa exponencialmente, lo que provoca que cantidades importantes de irradiación solar permanezcan en el planeta y no se lleve a cabo el balance diurno de ganancias y pérdidas de energía térmica a nivel global. Actualmente, esta “capa” se ha vuelto tan gruesa que la humanidad y todos los ecosistemas están sufriendo graves consecuencias como la progresiva desertificación, el derretimiento del hielo en áreas del ártico y el antártico, la escasez del agua y la manifestación frecuente e inusitada de fenómenos meteorológicos como tormentas, huracanes e inundaciones, entre otros; lo que ha alterado los ecosistemas y reducido la biodiversidad, todo lo cual se compendia en el lamentable fenómeno del Cambio Climático (CC) que cada vez es más evidente en diversas regiones de la Tierra. Ciertamente, el aumento de las emisiones de GEI provenientes del sector de los edificios y la construcción, enfatiza la urgente necesidad de establecer diversas acciones para reducir significativamente la demanda de energía en el ámbito de la construcción, descarbonización del sector eléctrico e implementación de estrategias de materiales y sistemas constructivos que reduzcan las emisiones de los GEI del ciclo de vida.

En consideración a lo anterior es urgente y necesario plantear diversos objetivos para contribuir a reducir las emisiones de GEI para mitigar el Cambio Climático en el planeta. Es precisamente en la arquitectura y específicamente en el sector de la construcción donde se pueden implementar acciones enfocadas a lograr estos objetivos. En la reunión de las partes COP 26 realizada en Glasgow en noviembre de 2021, se plantearon las acciones para lograr mitigar el Cambio Climático. Al finalizar la reunión, las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático adoptaron el Pacto de Glasgow para el Clima, cuyo objetivo es convertir la década de 2020 en una década de acción y apoyo al clima. Algunos de los acuerdos incluyeron el impulso de acciones para disminuir la emisión de GEI para mitigar el Cambio Climático, apoyar con recursos económicos a los países en desarrollo, reducir la deforestación, disminuir la emisión de metano y de los otros GEI a la atmósfera, promover la descarbonización en todas las áreas relacionadas con el sector eléctrico, cumplir con los Acuerdos de la COP21 de París para que el aumento de la temperatura media mundial pueda limitarse a 1.5°C y para cumplir con este objetivo se solicitó firmemente a los países que reduzcan progresivamente la energía del carbón y las subvenciones ineficientes a los combustibles fósiles (UNEP, 2021).

En relación a los materiales constructivos, el término energía incorporada (embodied energy, EE, por sus siglas en inglés) se refiere al impacto total de todas las emisiones de GEI atribuidas a un material durante su ciclo de vida. Este ciclo abarca la extracción, la fabricación, la construcción, el mantenimiento y la eliminación. Se han desarrollado estándares internacio-

nales para calcular la energía incorporada de los productos y materiales, por ejemplo, el ISO 14067: 2018 Gases de Efecto Invernadero - Huella de carbono de los productos - Requisitos y pautas para la cuantificación (ISO, 2018).

Por ejemplo, el concreto es un material con una energía incorporada extremadamente alta. En la fabricación del cemento se liberan grandes cantidades de CO₂ en la etapa de calcinación, así como en la quema de combustibles fósiles en hornos. Al sumar estas actividades con la explotación de arena y piedra, al uso del hierro para el corrugado, a su transporte a la obra para incorporarlo a la mezcla, el resultado es un severo impacto al medio ambiente. Otros materiales de construcción, como el aluminio, la cerámica, el ladrillo y el plástico, etc., también requieren grandes cantidades de energía para su fabricación, transportación y distribución, ya que los minerales que se utilizan en ellos deben extraerse y tratarse en procesos que consumen grandes cantidades de energía, que proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles.

A diferencia del cemento, los morteros de cal y sus productos relacionados reabsorben las emisiones de CO₂ durante el proceso de producción y continúan recarbonatando durante su fase de aplicación, creando un proceso de circuito cerrado de ciclo de vida completo, lo que resulta en cero negativos (-2 %) emisiones de carbón al medio ambiente (BioLime, 2020). Por lo tanto, el uso de la cal, en un análisis de su ciclo total (holístico), tiene un importante beneficio ambiental para disminuir la emisión de los GEI y contribuir a la mitigación del Cambio Climático.

3. Revaloración de la cal para utilizarse nuevamente en las edificaciones

Con base en los anteriores razonamientos presentados en esta investigación, es viable inferir que, en muchas circunstancias, la cal debería ser la primera opción de utilización en la construcción, incluso en las edificaciones contemporáneas y, por lo tanto, es importante revalorar sus ventajas y considerarla como una alternativa muy conveniente. En resumen, la reutilización de la cal puede tener efectos positivos a gran escala en la construcción, tanto en términos económicos como ambientales y es deseable su exploración y desarrollo adecuados para que sea compatible con los requerimientos de construcción actuales, enfocados a la sustentabilidad y al mejoramiento de la calidad de vida o a las condiciones de confort de los ocupantes en los diversos géneros de edificaciones.

4. Importancia del uso de la cal en revoques para mejorar la calidad del aire intramuros y la salud de los ocupantes en sus edificaciones. Gestión y control de la humedad

Aunque sería posible considerar bajo este rubro algunas propiedades más especializadas, es importante indicar que para efectos de la presente investigación -simplemente- se hace referencia a las cuatro características de la cal que tienen relación directa con la concentración de agua y su probable control, partiendo del hecho de que el agua propicia infinidad de patologías en los elementos constructivos y estos a su vez, condicionan la calidad del aire al interior.

La alcalinidad

Lo que es lo mismo a un incremento significativo en el pH de las mezclas, con la consecuente inhibición de la aparición de microbios y demás agentes nocivos o perjudiciales para el ser humano.

La higroscopia

Lo que significa que tiene afinidad con las moléculas de agua y por ello, que las atrae o absorbe con mayor facilidad, aspecto de gran importancia para la gestión y control de humedad en los ambientes interiores.

La transpirabilidad

Contemplada como la capacidad que tiene una superficie para expeler fluidos, contribuyendo de manera significativa a la disipación de la humedad.

La carbonatación

Que es la paulatina absorción de CO₂ para retornar a una composición mineral de carbonato, permitiendo así la disminución de la concentración de este gas en el aire intramuros. En exteriores, la carbonatación de las superficies con cal absorbe CO₂, con lo cual se reduce la acumulación de este gas en el medio ambiente.

5. Metodología experimental. Prototipos investigados

El objetivo que se propuso alcanzar con los procedimientos experimentales que a continuación se describen, fue evaluar el desempeño de los revoques hechos con mezclas de cal y determinar su grado de eficiencia en el control de las patologías provocadas por la concentración de agua. Lo cual se coteja mediante la comparación cualitativa de las características de muros recubiertos tanto con mezclas de cal como con mezclas de yeso, mortero y cemento.

Por lo que se construyeron 8 prototipos - muros a escala 0.35 x 0.15 x 0.05 m y se les aplicaron distintos revoques (Figura 7).



[A] cal-arena en proporción 1:3

[B] cemento-arena en proporción 1:3

[C] mortero de cemento-arena en proporción 1:3

[D] yeso en proporción 1:1

Figura 7. Proporciones para revoques empleados.

Estos muros fueron colocados sobre unas charolas de metal y confinados en cajas de plástico (0.60 x 0.40 x 0.35 m) que permitieran monitorear y controlar las condiciones ambientales. Para tal efecto, también se colocaron registradores *HOBO® MX1102A Data Logger* con los que se pudieron tener mediciones de temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono.

La integración de los prototipos se describe en el diagrama de la Figura 8.

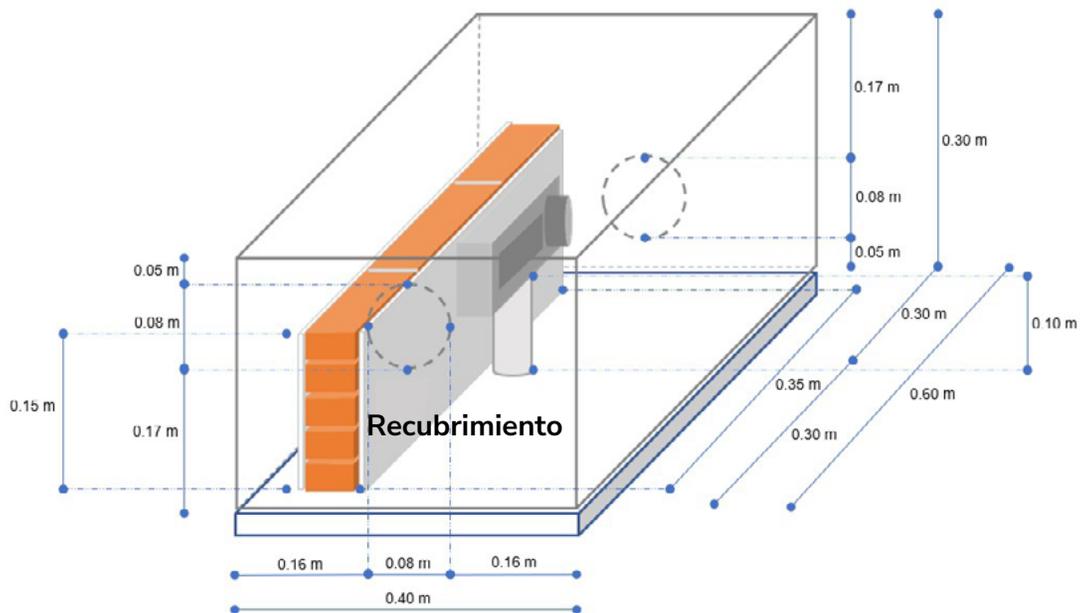


Figura 8. Diagrama de integración de prototipos.

El desarrollo de las pruebas descritas en el apartado previo, se dio mediante el suministro de 500 ml de agua en las charolas y el registro del comportamiento de los recubrimientos a lo largo de 28 días. Para cada una de las 4 pruebas se utilizó un muro de control, recubierto con el revoque [A] y uno más con otro revoque [B] [C] y [D] respectivamente. Es decir, cada prueba se realizó bajo la comparativa de dos muros con distinto revoque según podrá identificarse en los resultados.

6. Análisis e interpretación de los resultados

El análisis de los resultados cualitativos se hizo a través del registro fotográfico de los prototipos y el de los resultados cuantitativos, se ejecutó en función de los datos arrojados por los registradores y otros instrumentos. Sin embargo, estos últimos no están incluidos en su totalidad en el presente documento.

Alcalinidad

Como enuncia Monte, I. (2016) los ácidos y las bases o álcalis³ siempre han estado presentes en la naturaleza, en el caso de éstas últimas, desde tiempos remotos se identificaron 3 tipos: la potasa, resultante de las cenizas de la madera, la cal obtenida por la calcinación de conchas y el bicarbonato de sodio procedente de la evaporación de cierto tipo de agua. Recalca que los valores de pH son distintos, pero tienen sistemas muy conocidos como el agua de lluvia, el agua de mar y el agua carbonatada; en los 3 casos la variabilidad de pH radica básicamente en las reacciones y en el equilibrio del agua con diferentes especies de un sistema químico en común: los carbonatos.

Para efectos de evaluar esta prueba, se tomó como referencia la escala de pH que representa el Índice logarítmico del grado de acidez o alcalinidad de una solución (Figura 9).

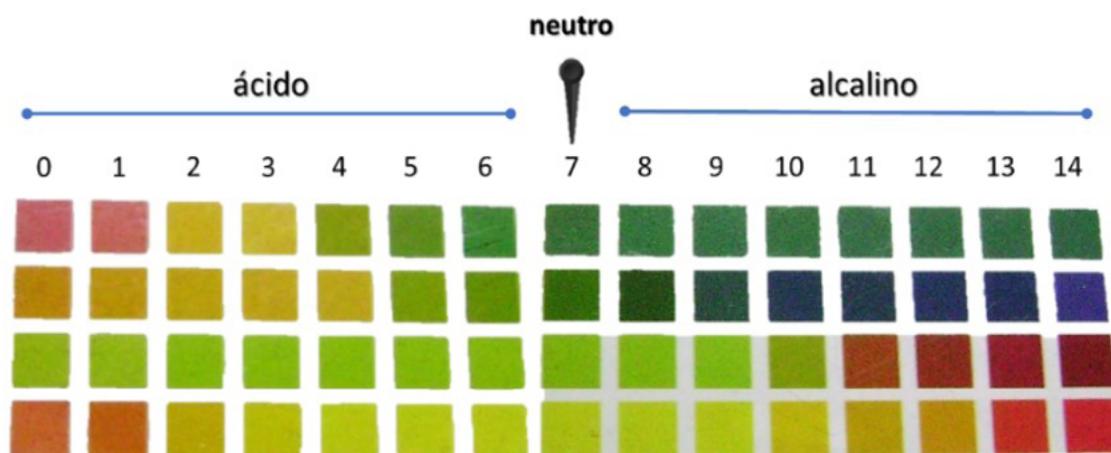


Figura 9. Escala de pH.

Según lo reportado por las tiras de papel pH, en el prototipo con revoque [A] la alcalinidad disminuyó considerablemente, una vez que estuvo expuesto al aire y consiguió carbonatar (endurecer).

La lectura inicial de pH (en presencia de agua) fue de 12 y a los 5 días (como carbonato) fue de 5, lo que coloca al recubrimiento dentro del rango de la acidez, tal y como se muestra en la Figura 10.

De igual forma, el prototipo [D] tuvo un pH inicial de 9 y posteriormente, un pH ácido de 4 (Figura 11), apenas un punto por debajo del registrado en el prototipo [A]

3 Derivado del árabe al-qaly que significa las-cenizas.

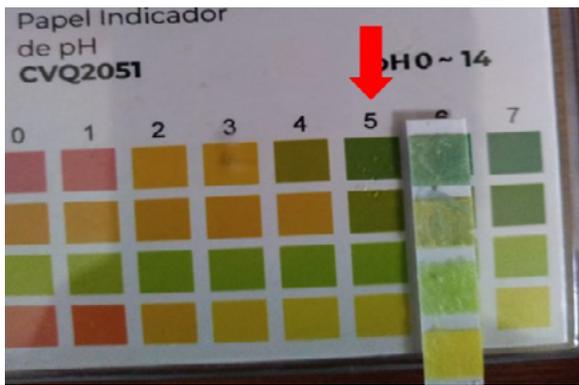


Figura 10. Lectura del P [A]

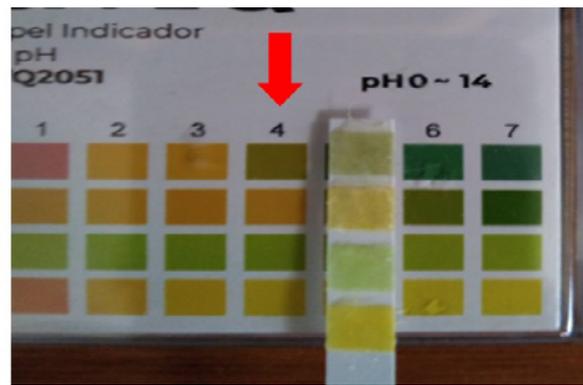


Figura 11. Lectura del P [D]

Ambos resultados indican que los recubrimientos, una vez que pierden agua y están en estado endurecido tienen un pH que bien puede propiciar la presencia de moho. Sin embargo, a los 28 días de haber terminado el procedimiento experimental, aún no había indicios de su aparición según lo muestran las figuras 12 y 13.

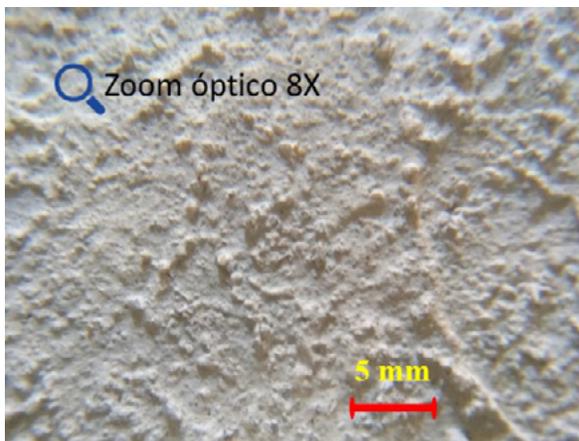


Figura 12. Prototipo [A]

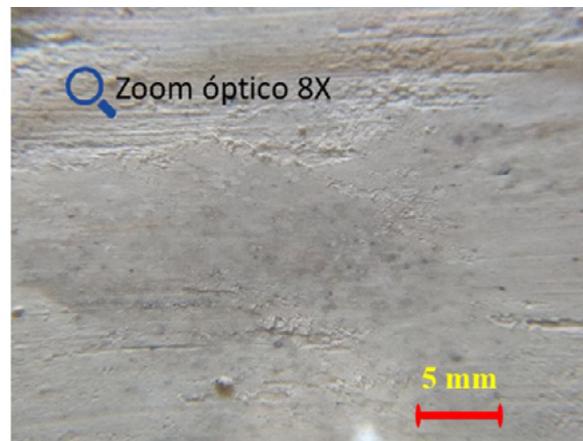


Figura 13. Prototipo [D]

Tal como indica Mileto, C. (et al.) (2018) en relación a la cal “[...] Una vez puesto en obra, el material comienza a carbonatarse y a fraguar, endureciéndose desde el exterior hacia el interior [...]” Aspecto que explica la razón por la que es menos probable que un revoco hecho con cal presente moho, porque aún y cuando en la superficie el pH sea ácido, al interior conserva humedad y por lo tanto, la alcalinidad de la mezcla no carbonatada.

La empresa COM-CAL comercializadora de productos hechos a base de cal, indica en su sitio web que la cal es un antimicrobiano natural que evita la proliferación de algas y hongos, hasta que finaliza el proceso de carbonatación, el cual parece ser bastante prolongado, ya que debido a la finura de los poros de los aplanados o revoques, la filtración del aire hasta la capa interior de los mismos, puede demorar -incluso- años; pero esto depende de su espesor y de la cantidad de capas que lo conformen.

Muñoz, C. (et al.) (1995) comparte los resultados de un estudio realizado con soluciones saturadas de cal de construcción, para verificar su efecto biocida y determina que éstas, crean un mecanismo de acción bactericida en las membranas externas de las bacterias para inhabilitarlas.

Para Larrea, E. (et al.) (1995) ninguno de los microorganismos citados en la Tabla 1. puede sobrevivir en un ambiente con un pH superior a 10 y los virus comienzan su desintegración con un pH de 11.

Tabla 1. Microorganismos y pH.

Fuente: Larrea, E. (1995)

microorganismos	sobrevivencia rangos min y max de pH
bacterias (*)	0 a 10
hongos (*)	3 a 10
virus (**)	- a 11
nemátodos (***)	5 a 9

(*) Piatkin, K., Krnoshein, Y., (1980) Microbiología, Ed. Mir. Moscú, URSS
 (**) Mattheus, R.R.F., (1970) Plant Virology, Academic Press New York, USA
 (***) Sosa-Moss, C. Información persona. Co. Posgraduados. Montecillos, México.

Mileto, C. (et al.) (2018) sostiene que, gracias a la alcalinidad de la cal, las mezclas con este material son desinfectantes naturales.

Por lo que se deduce que si el revoco hecho con cal, conserva la alcalinidad en su capa interior, lo más probable es que no haya aparición de moho.

Los muros se sacaron de las cajas de confinamiento porque se asumió que no era necesario el monitoreo de las condiciones ambientales, ya que, al haber estado controladas, fueron más estables y no dieron pauta a las alteraciones necesarias para el crecimiento de moho. Como lo señala el *Center for Environmental Health of New York State Department of Health*, este hongo es sumamente adaptable y resistente, además de ser muy tóxico y perjudicial para la salud, porque causa desde alergias, enfermedades respiratorias hasta serias infecciones que pueden propagarse a varias partes del cuerpo. Por eso, es sumamente importante identificar las formas y los tiempos, en los cuales éste surge; si bien, no se puede controlar al hongo, es importante conocer su comportamiento para retardar su aparición.

Para lo cual, se concluye que es indispensable la identificación puntual de las condiciones ambientales que detonan su nacimiento.

Higroscopia

Si se concibe a la higroscopia o higroscopicidad como la capacidad de atraer, absorber o emitir humedad del aire, el uso de materiales naturales es inminente para conseguir el balance higrométrico al interior de los espacios; esto se consigue porque absorben el vapor de agua a través de sus 2 o 3 cm superficiales y de igual forma -por diferencia de presión-, pueden expelerlo sin alterar de manera significativa la humedad del espacio, reduciendo así las posibilidades de una condensación.

Para esta prueba se tomó como referencia dicho concepto, primeramente, para el fraguado en el caso del prototipo [C] que fue recubierto con mezcla de mortero de cemento, pero también para determinar la gestión de la humedad relativa en el espacio confinado.

En este rubro, se pudo apreciar cómo en el prototipo [A] se mantuvo la humedad relativa ligeramente elevada, mientras que en el prototipo [C] se tuvieron leves variaciones a lo largo de los días de monitoreo.

Esto provocado -probablemente- porque a diferencia de la cal, el mortero de cemento necesita de la humedad para fraguar y alcanzar así, su resistencia a la compresión.

Además, no se debe perder de vista, que la prueba se realizó en días con humedad relativa ambiental elevada según las EMA's⁴.

Es válido mencionar que a causa de la lluvia diaria en la Cd. de México (mes de septiembre), fue complicada la pérdida de agua de los muros/revoques durante su proceso de construcción y por la humedad relativa alta, ambos sistemas se vieron saturados y/o rebasados para la óptima captura-disipación de agua o humedad.

Aun así, el revoco con mortero tuvo -ligeramente- (2-3%) una mayor retención de la humedad al interior del muro, presentando este comportamiento de manera constante.

Dadas las condiciones ambientales (luz y agua) a las cuales, estuvieron expuestos los prototipos, se concluye que la insuficiente ventilación y la exposición a la incidencia de los rayos solares, propició la condensación de la humedad del aire; estado que sumado al exceso de agua en los muros, mantuvo un alto % de humedad relativa dentro de los recipientes y en consecuencia, ésta estuvo por arriba del rango de confort para verano todos los días de lectura.

Otro de los aspectos a considerar en el desarrollo de esta prueba fue la porosidad de las superficies. La textura de ambos revoques se tornó totalmente distinta, mientras en el prototipo [A] (figura 14) las partículas del agregado fino se observaron inmersas en la superficie, en el prototipo (figura 15) se apreció lo opuesto; es decir, los "granos" del árido estuvieron expuestos y se alcanzaron a visualizar diminutos "cráteres", como si no existiera suficiente cohesión entre las partículas del mortero de cemento y las del árido.

4 Estaciones Meteorológicas Automáticas.

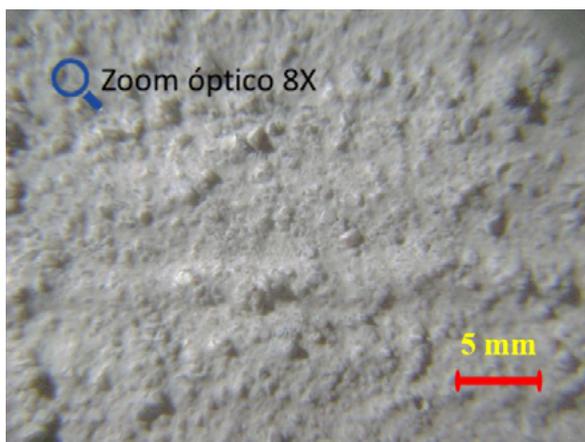


Figura 14. Prototipo [A]

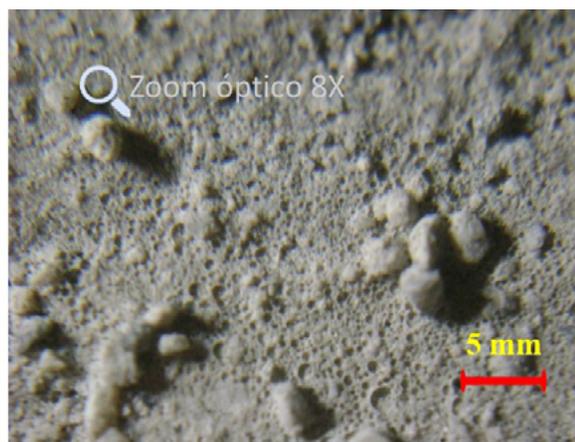


Figura 15. Prototipo [C]

Rodríguez-Mora, O. (2004) indica que, el grado de saturación de agua / vapor o llenado de los poros capilares de una superficie está relacionado con el diámetro de éstos. Los poros del soporte del muro con mayor diámetro (5 micras) no tienen contacto con los revocos, dado que no existen fuerzas capitales suficientes para contrarrestar la porosidad de la mezcla; es decir, el muro sólo capta agua libre pero no el agua de la propia mezcla, siendo así que una alta succión de agua por parte del muro, no es garantía de que se esté propiciando una adherencia sustancial entre este y el revoco en cuestión.

Por eso, se concluye que la completa integración de las partículas de los materiales involucrados en los revocos (conglomerantes + áridos), es indispensable para que el recubrimiento permanezca adherido a la superficie del soporte o muro. A esto se refiere Rodríguez-Mora, O. (et al.) (2004) cuando habla de los anclajes mecánicos que se crean en la interfase de la mezcla y el muro, esto se da justo cuando los conglomerantes tienen suficiente agua para penetrar en los poros y permanecer ahí.

De esta forma, se sabe que a mayor rugosidad de las superficies, mejor será la capacidad adherente de la mezcla a las superficies y por ende, mayor tránsito capilar del agua por los poros del revoco y mayor adherencia de éste al muro.

Es así como la higroscopia juega un papel de extrema relevancia en lo relativo a la humedad de los espacios y la conservación de los revocos / muros.

Y la calidad del aire interior depende en gran medida de la consolidación de los revocos de muros, techos y pisos, porque de nada sirve que se promuevan la ventilación y la renovación constante del aire al interior de los espacios, si éste se contamina al remover pequeñas partículas de material débilmente unido.

Transpirabilidad

La transpirabilidad se traduce en la forma en que las superficies gestionan y expelen la humedad que contienen los elementos constructivos.

De manera muy similar a lo sucedido con la prueba anterior, el % de humedad relativa en los prototipos [A] y [B] fue muy alto. Eso sin mencionar, que no tuvo variación ni a lo largo de los días, ni en función del tipo de material empleado para cada revoco. La humedad al interior del espacio confinado fue alta.

La humedad relativa ambiental según las EMA's se situó entre un 15 y un 25% por debajo, lo que demuestra la capacidad de ambos cementantes (cal y cemento) para la transpirabilidad y expulsión de la humedad almacenada al interior del muro.

Condición que en época de lluvias podría ser contraproducente porque los espacios se ven saturados de agua y al expeler los recubrimientos la humedad que llevan en su estructura, se incrementa la falta de confort de los ocupantes. Cabe mencionar que este incremento de humedad, en ciertos casos es sumamente benéfico.

Incluso, como suele decirse siempre será mejor que los recubrimientos expelan la humedad y no que la mantengan al interior de sí.

Mileto, C. (et al.) (2018) expresa en relación a la carbonatación o endurecimiento de la cal “[...] Al hacerlo, conserva una cierta cantidad de humedad en su núcleo que incrementa su capacidad de transpiración y su flexibilidad [...]”

De hecho, se recomienda que las capas de revoco con cal sean muy finas, porque de esta forma se favorece el desplazamiento de la humedad, justamente por los conductos capilares que se conforman.

Rodríguez-Mora, O. (2004) dedica varios apartados de su obra al tema de la evaporación y es debido a que cuando un revoco la experimenta de forma progresiva, debido a una discontinuidad de la superficie y a la consecuente presencia de poros, irremediablemente se presenta una interrelación entre las fases líquida y gaseosa, misma que genera tensiones superficiales y compresiones en los intersticios del revoco, dando paso a su contracción.

Por otro lado, se determina que con el incremento de la temperatura y la ventilación constante, la disipación del exceso de humedad es factible, además de necesaria para mejorar la gestión de agua al interior de los muros y de los espacios.

Sin embargo, la evaporación del agua lleva implícita la aparición de criptoflorencias⁵ (figura 17), a los 3 días de la prueba, el prototipo [B] presentó cristales minerales en uno de los extremos superiores. Es pertinente recordar que estos prototipos estuvieron expuestos al contacto directo con el agua (figura 16).

⁵ Surgen cuando las sales al cristalizarse aumentan su tamaño, produciendo daños internos que se manifiestan como abombamientos o ruptura de las capas exteriores.



Figura 14. Prototipo [A]

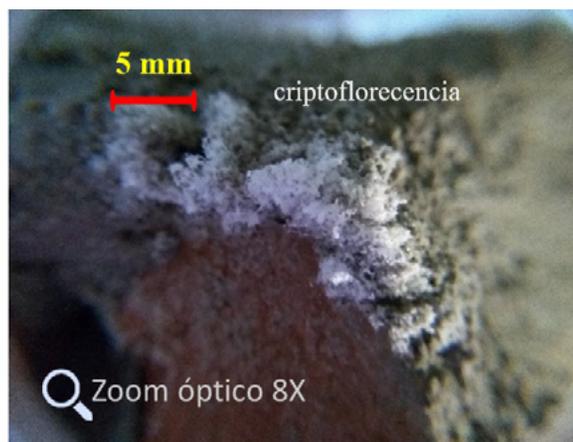


Figura 15. Prototipo [B]

Rodríguez-Mora, O. (2004) expresa: “Habitualmente no es en la masa del mortero donde pueden localizarse las principales vías de penetración de humedad sino en la interfase de unión con las piezas de albañilería. Los fluidos siguen la línea de menor resistencia y si existen intersticios en la interfase ejecutada estos se convierten en pequeñas vías de acceso, que sumadas provocan una filtración evidente.”

Carbonatación

Esta prueba fue de suma importancia para evaluar la calidad del aire al interior de los prototipos.

Según el estándar de la ASHRAE⁶ (figura 18), la concentración de CO₂ en los espacios tiene un nivel recomendado para el ser humano, que va de las 350 a las 1000 ppm⁷.

Este rango indica el requerimiento de renovación de aire y está ligado de manera directa con la posibilidad de enfermarse, dada la saturación de CO₂ principalmente al interior de cualquier espacio, en el que convivan un número de personas considerable.

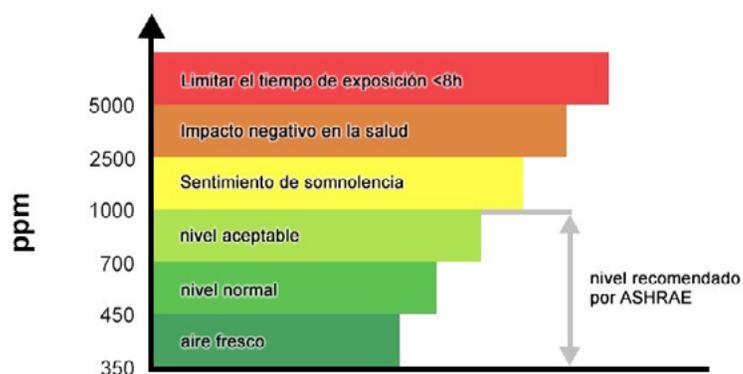


Figura 18. Estándar de concentración de dióxido de carbono (CO₂) según la ASHRAE.

6 American Society of Heating, Refrigerating y Air Conditioning Engineers.

7 Se refiere a la cantidad de unidades de una determinada sustancia (agente, etc.) que hay por cada millón de unidades del conjunto.

Para la interpretación de la concentración de CO₂ en los prototipos, se hizo el traslape del estándar de la ASHRAE y los resultados arrojados por los registradores. De esta forma, se determinó que en ambos casos la cantidad de CO₂ se ubicó dentro del nivel recomendado para la realización de actividades de manera segura o confiable.

En el caso del prototipo [A] la concentración de partículas se dio de manera paulatina y progresiva, aspecto que se explica por la absorción de CO₂ necesaria para el proceso de carbonatación de las mezclas con cal aérea. Los primeros días de la prueba, se requirió de mayor CO₂ y posteriormente, esa demanda se estabilizó e incluso, disminuyó ligeramente.

En el prototipo [B] el patrón de comportamiento en relación al CO₂ fue poco estable, el cemento no requiere del aire para fraguar, sin embargo, la absorción de CO₂ también se presentó, con la salvedad de que en 3 de los 5 días, sus niveles fueron superiores a los del prototipo [A].

En la NTG 41050. Norma Técnica Guatemalteca. Mortero de pega para unidades de mampostería, se indica que al terminar su hidratación, el cemento Portland produce un 25% de su peso en Hidróxido de Calcio; es decir, cal. Lo que -en parte- lo hace comportarse como tal, en cuanto a la carbonatación y solubilización se refiere.

La textura de los revocos fue -nuevamente- contrastante. Mientras el prototipo [A] parece haber encapsulado las partículas del árido o agregado (figura 19), el prototipo [B] (figura 20) las expuso, las segregó, presentando una fisura considerable y completa a lo largo de una de las juntas entre los ladrillos. La retracción del revoco tendría fundamento si se hubiera excedido la cantidad de cemento, pero la textura rugosa del mismo, pone de manifiesto que eso no sucedió.

De manera incidental, este recubrimiento expelió gran cantidad de humedad, al grado de haber propiciado condensación en las paredes del contenedor de plástico.

Este revoco permaneció con pequeñas gotas de agua sobre la superficie, a lo largo de los primeros 5 días de prueba.

Se reitera la imperiosa necesidad de promover la ventilación constante para provocar la disipación de la humedad cautiva en los revocos y sus respectivos soportes.

El prototipo [A] tuvo una mejor gestión de la humedad, toda vez que pese a haber estado expuesto a las mismas condiciones ambientales, no presentó fisuras y tampoco “sudoración”.

Rodríguez-Mora, O. (2004) menciona que en ocasiones la exudación o sudoración se produce por un peso específico distinto entre los componentes del revoco; los de menor peso se elevan y los de mayor se sedimentan, es así como el agua por su menor densidad sube y produce conductos capilares que debilitan las superficies al -eventualmente- generarse oquedades y con ello filtraciones.

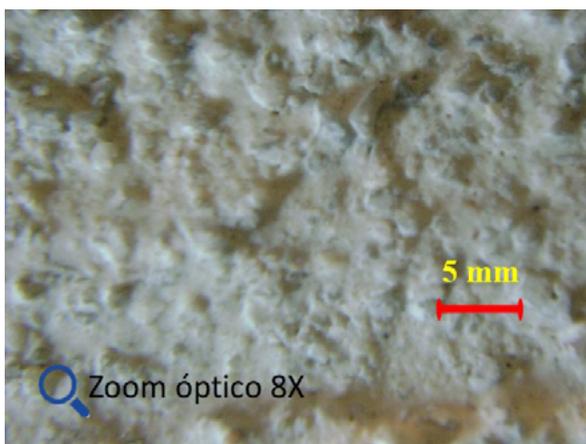


Figura 14. Prototipo [A]



Figura 15. Prototipo [B]

En el caso del prototipo [B] el agua subió y al evaporarse dejó expuestas, parte de las sales que contenía. Se debe aclarar que en este par de prototipos los revoques estuvieron en posición horizontal.

7. Conclusiones

Las propiedades de los materiales dependen del entorno, de los factores externos o de las situaciones que no se ven, que simplemente se sienten. Esta es la visión oriental de conexión con el ambiente, que se impone a la creencia occidental de que todo surge en el interior. Además, de que se asume que la materia es similar si se trata del mismo objeto. Analizando los resultados de los procedimientos experimentales realizados, se puede determinar que no porque todos los materiales involucrados sean cementantes, tienen un comportamiento igual. Si bien, todos ellos tienen como elemento en común al Calcio, su reacción y desempeño dicen más de lo que se puede apreciar visualmente.

Se determinó que los cementantes evaluados no presentaron beneficios tangibles en los relativo a la higroscopia, porque la ventilación no se tomó en consideración, siendo un factor decisivo para promover la evaporación y con ello, la pérdida de humedad, tanto en los muros como en los revoques.

La capacidad de carbonatación y/o absorción de este gas por parte de los revoques hechos con cal, permitió constatar que -efectivamente- la cal aérea demanda del CO₂ para pasar del estado fresco al endurecido, a diferencia de otros cementantes.

No se puede olvidar que este intercambio de fluidos en los espacios y por ende, en los sistemas de muros, ayuda a mejorar la calidad del aire interior, en beneficio de las condiciones de confort higrotérmico y la salud de los ocupantes.

Asimismo, en ocasiones se asume que, por no visualizar los contaminantes, éstos no existen. La realidad es que en las viviendas se albergan gran cantidad de partículas procedentes de los materiales con los que están revoques los diversos elementos tanto constructivos como

decorativos. Eso sin mencionar, las sustancias con las cuales se convive diariamente, por ser “esenciales” para el aseo y la ambientación de los espacios. A ciencia cierta, nadie tiene un panorama completo de las condiciones del aire a las que está expuesto al interior de las viviendas y menos aún, de los riesgos que se corren al tener escasa ventilación o iluminación naturales; ambos, aspectos que sin duda deberían preocupar a todos, sin importar si se tiene alguna afección pulmonar o no.

Hablar de las características de los materiales y mobiliario en una vivienda, es estar frente a un catálogo significativo de variables y -posibles- causas, no sólo de la falta de confort visual, olfativo e higrotérmico, sino también de padecimientos, principalmente de tipo respiratorio, digestivo e incluso mental. Al ser todos, ocupantes de una vivienda, la identificación del tipo de materiales y la predicción de su consecuente comportamiento es vital, sin importar si éstos son utilizados como recubrimientos (acabados finales) o no.

Monitorear el desempeño de los materiales es una actividad sencilla que permite determinar el grado de injerencia de éstos, en las condiciones que imperan tanto en los espacios de los que forman parte, como el estado de salud de los ocupantes que están expuestos a su permanente funcionamiento. Porque, aunque parezca inverosímil los materiales que se ven y los que no, sufren una transformación durante su ciclo de vida, siendo la etapa de “operación” en la que llegan a experimentar cambios significativos física y químicamente, esto a causa de su continua interacción con los factores ambientales como la temperatura, la humedad y la concentración de dióxido de carbono, por mencionar los más relevantes.

Así que, después de haber realizado las 4 pruebas descritas en el presente documento, se puede afirmar que los cambios que se aprecian en los revoques de muros son una muestra del “envejecimiento” al que está expuesta la materia. Es un proceso muy similar al que presenta el ser humano a lo largo de su vida, de ahí la necesidad de promover (con cierta regularidad) las intervenciones de mantenimiento preventivo de las construcciones y la -eventual- remodelación de los espacios, aspecto que va más allá de un cambio de imagen, ya que representa la posibilidad de sustituir los materiales caducos o dañados, de renovar algunos elementos estructurales y también aquellos -considerados como- superficiales, por ser éstos los que tienen un contacto directo con los ocupantes; lo anterior, en aras de proveer de nuevas -quizá- mejores condiciones de habitabilidad y mayor calidad de aire al interior en beneficio de la salud de los ocupantes de las edificaciones.

Referencias

- BioLime, 2020. <https://biolime.com/lime-vs-cement/>
- Center for Environmental Health of New York State Department of Health | Health & Environment (ny.gov)
- COGUANOR (2012). NTG 41050. Norma Técnica Guatemalteca. Mortero de pega para unidades de mampostería. Especificaciones. Guatemala.
- COM-CAL | COM-CAL Materiales para la restauración, rehabilitación y bioconstrucción ISO, 2018. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14067:ed-1:v1:es:sec:4>
- Larrea, E. (et al.) (1995). Efecto biocida del Hidróxido de Calcio y la importancia de su utilización en la agricultura; Asociación de Fabricantes de Cal A.C. México.
- Mileto, C. (et al.) (2018). Maestros de la Cal. Red Nacional de Maestros de la Cal. INT-BAU-UK. United Kingdom.
- Monte, I. (2016). Agua, pH y equilibrio químico: Entendiendo el efecto del dióxido de carbono en la acidificación de los océanos; Secretaría de Educación Pública. Subsecretaría de Educación Media Superior. México.
- Muñoz, C. (et al.) (1995). Efecto bactericida de la cal hidratada en solución acuosa. Bol. Oficina Sanit Panam 118 (4). Panamá.
- Quora 2021 <https://www.quora.com/Why-is-the-Pantheon-one-of-the-most-well-preserved-Roman-temples>
- Rodríguez-Mora, O. (2004). Propiedades de los Morteros para Fábricas. Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero.- AFAM. España.
- The Ten Books of Architecture. Cambridge. Harvard University Press. Oxford University Press, 1914. Translated by Morris Hicky Morgan.
- UNEP, 2020. <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/building-sector-emissions-hit-record-high-low-carbon-pandemic>
- UNEP, 2021. <https://www.unep.org/news-and-stories/story/cop26-ends-agreement-falls-short-climate-action>

Colaboración especial en inglés

Physical and Numerical Analysis of Bioclimatic Strategies Implemented on Social Housing

Cesar Augusto Real Ramirez¹

Jose Maria Velazquez Soto²

Rosalba Orduña Martinez³

Jesus Isidro Gonzalez Trejo⁴

1 Universidad Autonoma Metropolitana | Systems Department

Correo: carr@azc.uam.mx

2 Universidad Autonoma Metropolitana | Natural Environment Department

3 Universidad Autonoma Metropolitana | Systems Department

4 Universidad Autonoma Metropolitana | Systems Department

Abstract

This paper presents the results of aerodynamical performance research focused on maintaining the thermal comfort and increasing the energy efficiency of a typical social housing unit located in a high-density urban area. Bioclimatic design strategies are used to develop a sustainable and economic technology in existing housing clusters in Mexico City. A full-scale prototype, built on campus facilities, was used to study the flow conditions around the design. All scaled prototypes implement similar criterion. Furthermore, a scaled prototype is evaluated within a low-speed wind tunnel installation. Additionally, numerical simulations were performed at transient state based on previous physical measurements and historical local climatic conditions to determine preferable modifications.

Keywords: Bioclimatic design; climatic conditions; wind tunnel; numerical methods; social housing; energy efficiency.

Introduction

Bioclimatic design focuses on natural ventilation and climate control systems with low energy consumption, where the external geometry of the architectural space provides the flow and temperature conditions in which thermal comfort remains constant even if the weather conditions change. Local prevailing winds can be used to construct the architectural spaces in a way that promotes the movement of air mass and minimizes stagnant air volumes inside the housing units based on the interaction of the air with the floor and the facades of the housing.

Traditionally, architecture has focused on comfort; however, it is necessary to introduce new strategies to generate ideas that lead to design transformation and innovative construction projects. Mexico City is one of the largest metropolitan areas in the world and has a large number of people on the periphery of the urban environment [1].

Historically, human settlements developed with no concept of sustainability. The result is that the total number of hours of transportation and utility costs increased. Providing infrastructure to these high-density populated areas is difficult [2].

In recent decades, politics propitiated urbanization with almost no land cost. The result is a large amount of housing, approximately 3000 units in each cluster without connectivity, which is significantly less sustainable. Mexico County borders the metropolitan area and has a different climate because the mountain system there has many altitudes, as shown in Figure 1.



Figure 1. Flat housing in the Mexico City metropolitan area

The height of the buildings is predominantly uniform. Most of the buildings have a least three floors, and they can be described as a “flat city.” However, zones exist in which the economic development is proportional to the height of the buildings. This situation is not unique to one city, and in Mexico City, it occurs downtown, in an area known as the country’s financial district [3].

The flow conditions have no significant differences because of the large density of buildings built in the valley. According to the Systems and Geography National Institute (INEGI), Mexico City, a megalopolis is located in Mexico’s Valley with an altitude of 2240.00 m above sea level. This valley is in a volcanic belt on the high plateaus of south-central Mexico [4]. Because of the high-density of people in the valley, the heat release mechanism is intensified, as human activities and additional greenhouse gases being emitted to the atmosphere. In the case of large cities, urbanization creates a microclimate. In the case of Mexico City, the air temperature is approximately 5.00 °C above the local temperature.

The first part of the study is based on physical and numerical simulation of the flow conditions around an approved prototype housing unit based on the federal government standard construction requirements within the Valley of Mexico [5]. Physical simulations were performed using a fully scaled prototype constructed within the Universidad Autonoma Metropolitana-Azcapotzalco campus facilities in an urban environment.

The inlet flow conditions toward the housing unit are important because they determine whether the environment is urban or semi-urban. The topography around the housing, solar trajectories, rainfall, vegetation, magnitude and trajectory of the wind all contribute to user comfort [6].

The climatic area of the housing is very important. Cool climates need to have solar gain and be dry, warm climates where solar radiation needs to be minimized. Mexico City has a temperate climate based on the Köppen climate classification. The average annual temperature of the metropolitan area is 16.00°C. Specific months and hours of the day can provide direct thermal comfort within the housing unit without air conditioning [8-10].

A local climatic station was installed at the top of one of the buildings around the housing. This allowed us to obtain the predominant flow conditions for the prototype that were then used as inlet conditions within the wind tunnel and in numerical simulations. It was necessary to develop a study where wind speed and wind direction were controlled conditions for aerodynamic tests [11].

According to local measured climatic conditions, the range of wind speed varied between 0.00 m·s⁻¹ and 5.00 m·s⁻¹. A scaled prototype constructed in translucent acrylic was used in a low-speed wind tunnel to reproduce different flow patterns. Urban, semi-urban and uniform flow patterns can be used for different purposes [10, 12, 13].

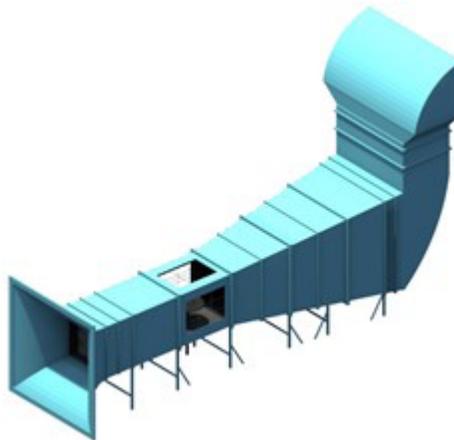


Figure 2. Low-speed wind tunnel schematic diagram located in the Bioclimatic Architecture Laboratory at Universidad Autónoma Metropolitana

Figure 2 shows a schematic diagram of an open circuit, low-speed wind tunnel located at the Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. The wind tunnel is fully characterized and has automated acquisition instruments to register the thermodynamic variables needed for the determination of the velocity profile within the wind tunnel test zone [14].

Local measurements included several thermodynamic variables, for example, air humidity, air velocity magnitude, air direction, outdoor temperature, indoor temperature, and atmospheric pressure. They were measured using a climatologic station located on a building close to the fully scaled prototype.



Figure 3. Physical model of the housing unit in compliance with federal government standards.

Figure 3 shows the fully scaled prototype that was built in compliance with the Mexican federal government standards at the University campus facilities to simulate different climatic conditions. The housing is oriented to the south, and the figure shows the rear facade of the dwelling.

A chimney, bushes, and a fence, which are shown, are not considered in the aerodynamic study. Around the housing unit, there are electrical facilities and a casting laboratory with a covered corridor between them. The flow conditions are similar to those we might find in an area with a high-density population. Approximately 150.00 m to the north is the main road and a housing area with many six-floor buildings.

Translucent acrylic was used within the wind tunnel to evaluate the aerodynamic performance, quantify the benefit of an integrated proposal, and estimate the energy savings because of the benefit in kinetic energy of the air flow.

Physical and numerical model

The construction of a scaled prototype of social housing must guarantee that the qualitative behavior of the air at different climatic conditions can be repeated. To obtain this similarity, the design must have the same geometry. Despite using a scaled prototype, the ratio between physical dimensions was preserved, and different geometries around the housing, such as windows and doors, were scaled.

Achieving a full geometric similarity is not practical because some of the design features that should have different parts or accessories have to be analyzed individually to obtain a scaled prototype within the wind tunnel. This design is unique to certain speed regimes. In a subsequent analysis, we will present the contribution of the most important interior housing factors affecting the aerodynamic performance of the dwelling.

According to Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT), the average field in social housing is 40.00 m². The full-scaled prototype has 80.00 m² dis-

tributed over two floors, 12 windows and two exterior doors. The restroom and bedrooms are located at the top floor and the dining room, living room and kitchen are in the basement.

Translucent acrylic, 3.10^{-2} m thick, was used in the physical scaled design. No parts were attached, and no unique base was used to change the boundary layers and the air flow toward the scaled model. In Figure 4, the geometric casing of the dwelling is presented.

The significant external elements used to achieve geometric similarity are outlined in the model. The fireplace was removed because in the full-scaled prototype, it improved aesthetics but is not considered a constitutive in the final proposal, as shown in Figure 5. The numerical model used the geometric similarity criteria and solved the Navier-Stokes equations for a turbulence model.



Figure 4. Physical representation of a typical social housing unit in Mexico within the wind tunnel.

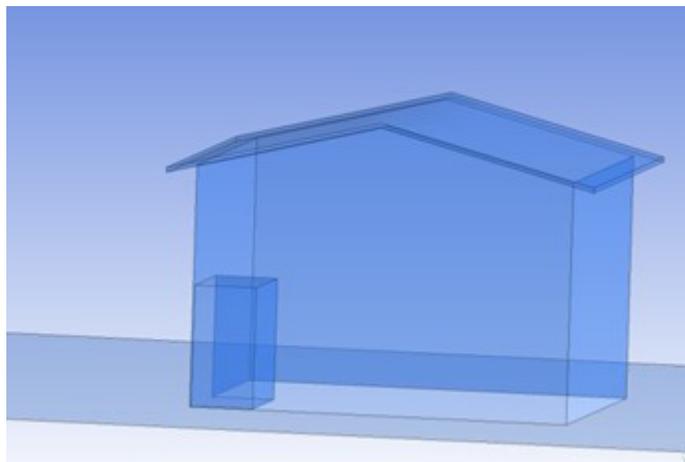


Figure 5. Numerical model of a typical social housing unit in Mexico.

This study presents only the fluid flow around the dwelling and does not analyze the interior fluid flow, which is going to be presented in future work. One of the main design criteria in the development process of the proposals was the compliance federal government construction standards [5]. The study also considers cost and ease of installation.

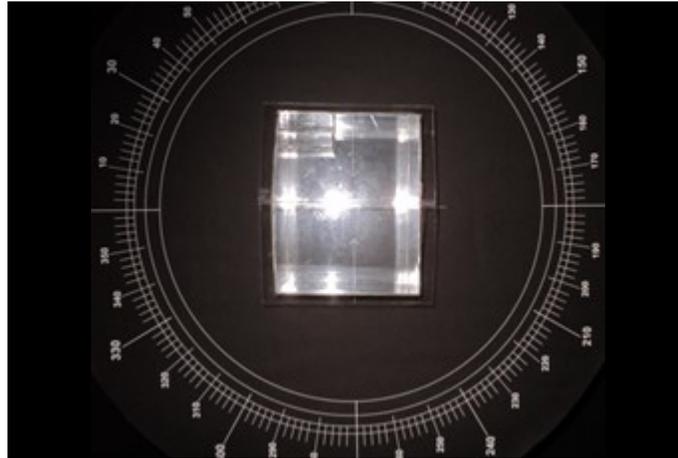


Figure 5. Aerial view of the scaled prototype mounted on a rotating platform within the wind tunnel.

Figure 6 shows the translucent acrylic prototype mounted on a graduated rotating base. This base allows us to know the different orientations in which the wind can reach the exterior walls of the housing. The experimental facility allows us to precisely know the wind direction and visualize it in different planes, such as vertically and horizontally oriented in accordance with the light source used. The diameter of the base contributes to the flow conditions of the physically scaled design because the development of the flow on the surface will be related to the distance between the edge of the base and the housing.

The operation conditions in the laboratory were taken during the test with a meteorological station located on the roof of the installation, which reported a relative humidity of 56.00%, the atmospheric pressure of 78,000 Pa and 21.00 °C of local temperature.

Once the flow condition is uniform, a minimum of 15 min of operation at the same frequency, the model is moved to the predefined area within the wind tunnel known as the test zone to allow a fully developed flow. In previous studies, an urban flow profile was reached with basic geometric elements that modified the flow. Future work will present the characterization of different flow conditions to describe urban and semi-urban patterns within the low-speed wind tunnel.

A future research project will focus on developing models where thermal studies are reported using thermal and optical equipment under different local atmospheric conditions within the low-speed wind tunnel. The goal of this study will be to reproduce the flow profile conditions in the principal regions of the country and a future publication will present the progress of this research.

Methodology

The constitutive equations of the flow surrounding the dwellings are the Navier-Stokes and continuity equations. Both are presented in vector form.

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \bullet \rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

The turbulence model used in this study is the Large Eddy Simulation (LES) model, which is solved numerically using commercial software named Fluent [15]. In an LES turbulence model, the Navier-Stokes equations are filtered, and the numerical model calculates two conditions, which are the vortex's influence due to mesh size and the vortexes smaller than the mesh size.

The filtered variable is defined by the following equation:

$$\bar{\varphi}(x) = \int_D \varphi(x') G(x, x') dx' \quad (3)$$

where $\bar{\varphi}$ is the stresses deformation, D is the flow domain, and G is the filtered function that determines the scale of the resolved vortexes. If we discretize equation (3) over a finite volume, we obtain the following equation:

$$\bar{\varphi}(x) = \frac{1}{V} \int_V \varphi(x') dx', \quad x' \in V \quad (4)$$

where V is the volume of the computational cell. The filtered function $\bar{\varphi}$ implies two conditions, and φ for everything else. The flow conditions in this study require that the air is considered incompressible resulting in the LES turbulence model equations described below:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (6)$$

The tensor data calculated in the sub-grid area is developed from the Smagorinsky-Lilly model and the discretized equation is as follows:

$$\tau_{ij} \equiv \overline{\rho u_i u_j} - \overline{\rho} \overline{u_i u_j} \quad (7)$$

The main advantages of the LES turbulence model are as follows. (i) It is possible to reproduce the transient flow pattern around the housing that is needed to study the proposal. (ii) It considers an approximation of the larger scale vortexes that are calculated in the numerical simulation and use a set of filtered equations. The turbulence is filtered and allows for solution of a greater number of unknowns and reduces numerical error. (iii) The accuracy of the results needs to be compared with physical experiments that cannot be solved using other turbulence models.

The computing resources used in LES are higher than DES, RSM, k-e and laminar models. In some cases, the steady state solution is not possible because of the boundary conditions, nature of phenomenon, convergence time and available computational. The most significant disadvantages of using an LES turbulence model are as follows. (i) The accuracy on the results of fluid variables could not be validated. (ii) The application of LES is valid only for three-dimensional cases and in non-steady state. (iv) It is not possible to use multiphase flows.

Results

To obtain reliable results of physical experiments, we considered that the orientation of the housing, layout of the surrounding buildings, wind direction and the main road 150.00 m away from the facility could locally modify the direction, speed, and magnitude of the wind to east - west and from $0.00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ to $5.00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

In physical experiments within the wind tunnel, it was possible to obtain repeatability at different operational conditions. In accordance with historical information about climatic conditions, the velocity magnitude was set at $4.00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in the north-east direction.

The information obtained with the previously mentioned local climatic station was processed and used as an inlet condition for numerical simulations. Flow visualization was performed using continuously produced white smoke, which was injected at the entrance of the open circuit wind tunnel to reproduce flow features for the scaled model. A class IIIa, 650.00 nm, 2.50 mW, red diode laser was used to illuminate a vertical plane to highlight the three-dimensional features that develop around the design, as shown in Figure 7.

According to Meza, a 5.00 Hz change in the frequency control is equivalent to $0.50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in the wind speed magnitude within the test zone of the tunnel. In this study, we determined the test zone and ensured that the velocity profile is fully developed and repeatable [14].

To satisfy the dynamic similarity, we scaled the velocity magnitude of the working fluid based on 5.00 Hz changes in the wind tunnel frequency control. Once in the wind tunnel, the air enters a region with a flow straightening honeycomb geometry, which ensures that the flow in the test area is uniform and laminar.

A mixture of water-based lubricant was heated to generate white smoke that has a similar density to air and did not modify the inlet flow upon injection. Laser based lighting allowed us to study the flow behavior using different vertical planes, and subsequently to interpret the

three-dimensional behavior of the flow. As shown in Figure 7, the air impacts the rear wall of the prototype and divides the flow, with resulting upward and downward flow directions.

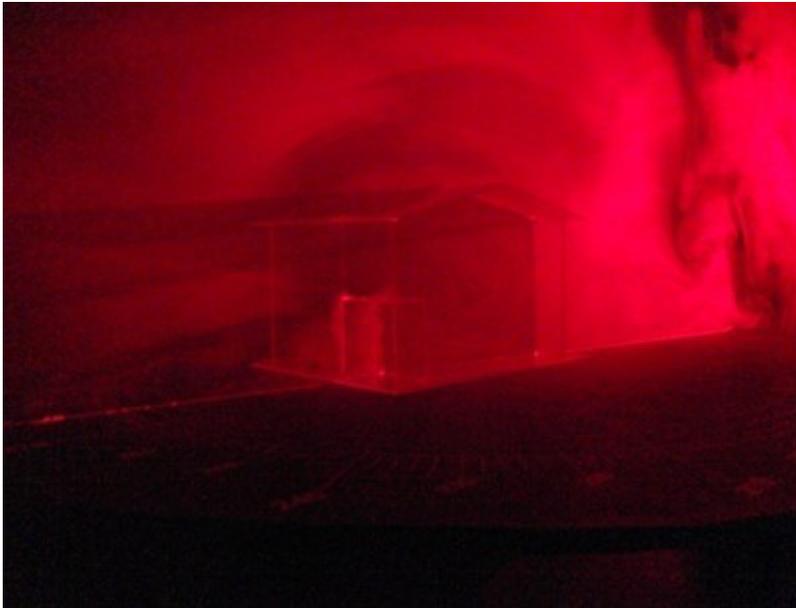


Figure 7. Isometric view and laser illuminated plane of the case study.

Downward flow swirls with the walls of the housing and drives the surrounding upward flow. The upward flow collides with the top cover of the housing and is mainly diverted into two directions, left and right. Figure 7 illustrates the phenomenon with green arrows. Once the flow passes through the housing, it interacts with the front wall of the prototype and the floor and the air becomes turbulent. This action develops at a distance of at least five times the length of the housing and is relative to wind speed. This flow condition repeats continuously and is known as an urban environment, which may be affected by different housing designs. The laser illumination allowed us to study “virtual” planes that helped to interpret

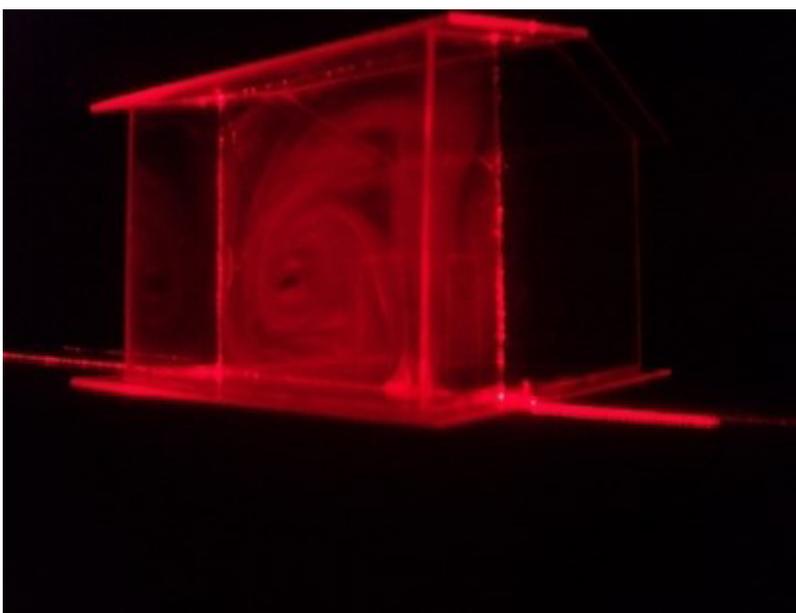


Figure 8. Laser illuminated and quadrant delimited plane for internal volume of the study case.

the outside and inside flow around an architectural design within a wind tunnel. As shown in Figure 8, a pulse of smoke entered the design without interior architectural elements to observe the possible interaction of interior and exterior flow.

The kinetic energy of the vortices, generated from the interaction with the walls of the house, distributed around the internal volume and generated streams, but there was a preponderant direction in swirl. Quadrants were used to divide the plane, which allowed us to determine two different vortices. Both had the same rotation; however, in quadrant three, there was a smaller and more intense vortex. The second vortex, located in the first quadrant, covered nearly the entire area of the plane, but it did not have enough energy to promote thermal comfort because of the low-speed magnitude of the air.



Figure 9. Aerodynamic performance of the scaled model within the wind tunnel.

Figure 9 shows eleven stream traces generated through a smoke comb machine. A metal filament burned liquid oil at different equidistant heights of the tube and produced a continuous line that moved because of the air inside the wind tunnel.

Figure 8 and Figure 9 have differences. The white streamlines describe a zone above the housing, which is primarily because of the interaction of the flow with the roof. This phenomenon affects the heat transfer to the outside because it generates a natural thermal insulator that prevents natural convection because of the prevailing winds.

Physical simulations validated the numerical simulations. As shown in Figure 10, air behavior is reproduced qualitatively and lead to an interpretation of the recirculation zone previously mentioned. When the flow split, above the upper cover of the housing, the recirculation zone was equal length to the housing. Both visualization techniques and numerical simulations indicate that turbulent flow is obtained because of the interaction with the walls, the boundary layer than generate between the upper cover and the flow and is enhanced because of the upper flow.

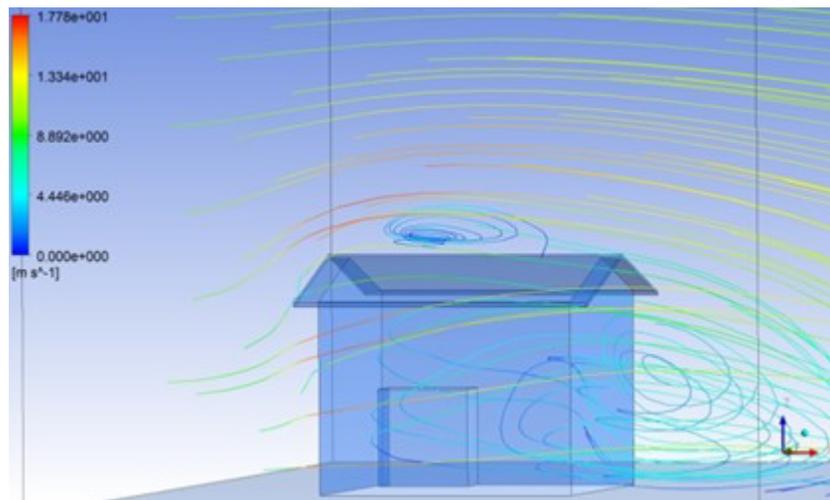


Figure 10. Numerical simulation results of aerodynamic performance of social housing.

The modification of the surface roughness in the upper cover can reduce the development of the boundary layer. This study proposes the use of “steps” to affect the growth of the layer and increase the convection heat transfer. In the past, this concept was successfully implemented. Over the last century, Central America housing used “pavers” in upper covers to maintain interior comfort in regions close to Ecuador. Several authors have studied this technology [16, 17]; however, our proposal suggests the installation of solar cells inside the bricks, from which energy reserves can be measured [18-20].

The numerical model reproduced the flow pattern that developed in the wind tunnel experiment. The pattern consisted of three main streams of convergence: the downward flow of the top cover and the two side streams, left and right paths. The recirculation zone begins from the side walls of the housing. Another observation is that the minimum speed of the stream can be close to zero. Figure 10 indicates that the kinetic energy of the air is not affected by the height of the house and is principally in the stream above the housing.

The three-dimensional flow pattern is shown in Figure 11 and 12. The experimental method, which used the smoke machine, preferentially described laminar flow regions. In the physical experiment, the turbulent flow pattern quickly dissipates particles from the oil combustion. The visualization allowed us to identify regions of turbulent flow around the design and show that the mixing process occurs more intensively.

Therefore, we suggest that the laminar flow pattern occurs under controlled conditions within the wind tunnel and can be considered an ideal profile, as shown in Figure 11. In this study, the mixing process occurs between four main streams that form around the model. This process affects the convection and the thermal comfort inside the building.

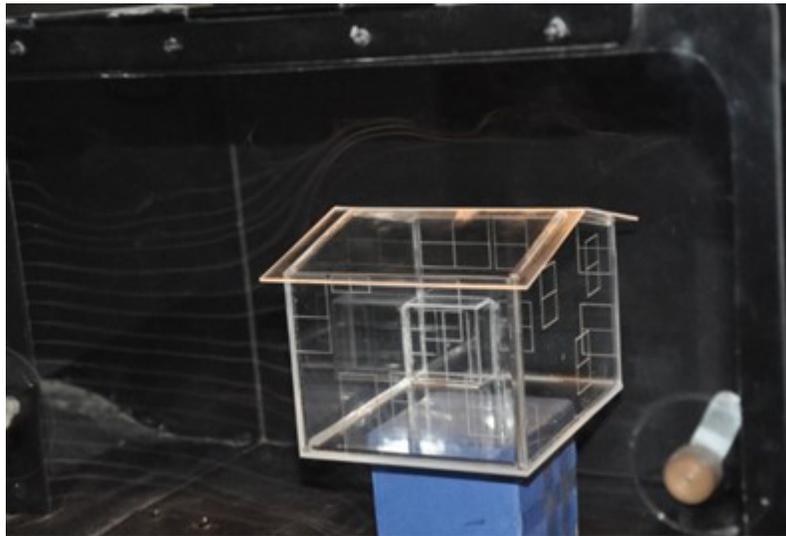


Figure 11. Inlet flow profile for the scaled physical model.

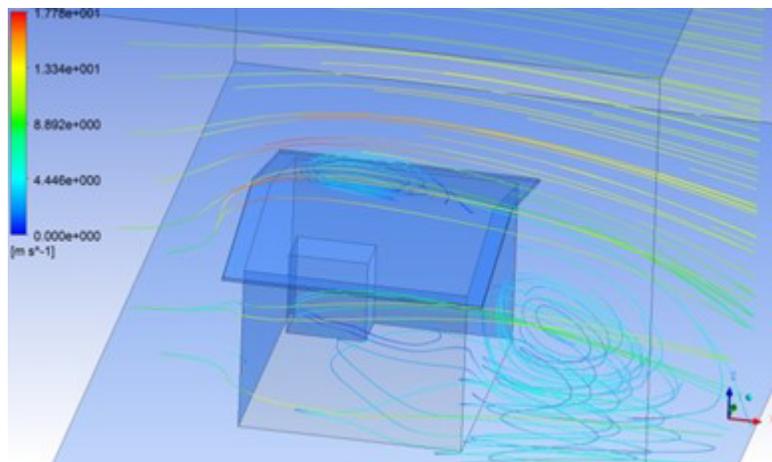


Figure 12. Numerical simulation results for the inlet flow profile.

Once validated, the numerical simulations can be useful tools that allow one to know and interpret the three-dimensional nature of the phenomenon and its complexity. Numerical simulations passed through a refinement mesh process and a convergence analysis was performed. The results show that there is no symmetry in the flow pattern.

This phenomenon occurs in the upper cover and in the turbulence zone at the front of the housing. As shown in Figure 12, recirculation zones can be clearly identified because the air speed is closed to zero, forming a volume with the same direction of swirl. The flow condition on the surfaces is close to zero because of the boundary condition and has no surrounded swirl.

Conclusions

the external geometry of a housing unit determines the characteristics of the flow pattern, and its surroundings on a large scale can change the surrounding environment. the bioclimatic design presents strategies with passive design elements to reduce energy consumption and to maintain a constant temperature. the use air's kinetic energy can decrease the total energy consumption in social housing. The most conservative value mentioned is five percent, this amount may seem negligible, but in social interest housing sectors, it represents meaningful savings. The proposed modifications can be made with inexpensive technology.

Acknowledgments

The work described in this paper was supported by research grants from Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) and the Research Grants of the Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. Numerical and physical simulations were performed in the Scientific Computing and Visualization Laboratory in the Systems Department of Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Statistical data were obtained from the National Geography and Statistical Institute of Mexico (INEGI).

References

- [1] INEGI, Síntesis metodológica y conceptual del Censo de Población y Vivienda 2010, in: I.N.D.E.y. Geografía (Ed.) Diseño de la muestra censal 2010, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Mexico, 2010, pp. 81.
- [2] INEGI, Electricidad, agua y suministro de gas por ductos al consumidor final. Censos Económicos 2004, in: INEGI (Ed.), INEGI, Mexico, 2006, pp. 93.
- [3] D.E. Davis, Zero-Tolerance Policing, Stealth Real Estate Development, and the Transformation of Public Space Evidence from Mexico City, *Lat Am Perspect*, 40 (2) (2013) pp. 53-76.
- [4] F. Maza, Diccionario Porrúa de Historia, Biografía y Geografía de Mexico, 6th ed., Porrúa, Mexico, 1995.
- [5] CONAVI, Código de Edificación de Vivienda, in: G. Federal (Ed.), CONAVI, Mexico, 2010.
- [6] W.B. Fitzgerald, M. Fahmy, I.J. Smith, M.A. Carruthers, B.R. Carson, Z. Sun, M.R. Bassett, An assessment of roof space solar gains in a temperate maritime climate, *Energy Buildings*, 43 (7) (2011) 1580-1588.
- [7] P. Connolly, Observing the evolution of irregular settlements Mexico City's colonias populares, 1990 to 2005, *Int Dev Plann Rev*, 31 (1) (2009) pp 1-35.
- [8] A. Chel, G.N. Tiwari, Stand-alone photovoltaic (PV) integrated with earth to air heat exchanger (EAHE) for space heating/cooling of adobe house in New Delhi (India), *Energy Convers Manage*, 51 (3) (2010) 393-409.
- [9] M.A. Tahat, H. Al-Hinai, S.D. Probert, Performance of a low-energy-consumption house experiencing a Mediterranean climate, *Appl Energy*, 71 (1) (2002) 1-13.
- [10] K. Richards, T.R. Oke, Validation and results of a scale model of dew deposition in urban environments, *Int J Climatol*, 22 (15) (2002) 1915-1933.
- [11] J.G. Tsutsumi, Effects of the wind on thermal sensation in a house with natural ventilation, *Wind Engineering into the 21st Century*, Vols 1-3, (1999) 1959-1964.
- [12] A.H. Rosenfeld, H. Akbari, S. Bretz, B.L. Fishman, D.M. Kurn, D. Sailor, H. Taha, Mitigation of Urban Heat Islands - Materials, Utility Programs, Updates, *Energy Buildings*, 22 (3) (1995) pp 255-265.
- [13] M. Dewsbury, T. Chandler, Massive timber as effective thermal mass in Australian contemporary housing, *Living and Learning: Research for a Better Built Environment*, (2015) 382-392.
- [14] A.E. Fernandez-Meza, Caracterización del túnel aerodinámico del laboratorio de bioclimática de la Universidad Autónoma Metropolitana: como herramienta para estudios de modelos arquitectónicos, *Medio Ambiente*, Universidad Autónoma Metropolitana, 2008.
- [15] I. Fluent, *Fluent 6.3 Theory Guide*, in, Ansys Inc, 2006.

[16] Y. Wang, E.S. Long, S.M. Deng, Applying passive cooling measures to a temporary disaster-relief prefabricated house to improve its indoor thermal environment in summer in the subtropics, *Energy Buildings*, 139 (2017) 456-464.

[17] Y. Wang, L. Wang, E.S. Long, S.M. Deng, An experimental study on the indoor thermal environment in prefabricated houses in the subtropics, *Energy Buildings*, 127 (2016) 529-539.

[18] V. Kapsalis, D. Karamanis, On the effect of roof added photovoltaics on building's energy demand, *Energy Buildings*, 108 (2015) 195-204.

[19] M.H. Chung, J.C. Park, M.J. Ko, Effect of the solar radiative properties of existing building roof materials on the energy use in humid continental climates, *Energy Buildings*, 102 (2015) 172-180.

[20] P.J. Rosado, D. Faulkner, D.P. Sullivan, R. Levinson, Measured temperature reductions and energy savings from a cool tile roof on a central California home, *Energy Buildings*, 80 (2014) 57-71.

