

3. Confort térmico nocturno en viviendas de la ciudad de Villahermosa, Tabasco, ante escenarios de cambio climático



CHRISTOPHER LIONEL HEARD*

SAZCHA MARCELO OLIVERA VILLARROEL**

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.319.03>

Resumen

El estudio analiza el comportamiento de los habitantes de una vivienda típica en Villahermosa, Tabasco, México, frente al aumento de las temperaturas nocturnas. Para ello, se realizan simulaciones en una casa de dos pisos, con viviendas contiguas. En esta región, el clima actual exige el uso de aire acondicionado en las casas unifamiliares. Durante los meses más cálidos, que van de mediados de febrero a mediados de junio, la estrategia habitual es mantener el aire acondicionado encendido a una temperatura estable, sin aumentar la potencia de los equipos. La simulación parte del supuesto de que la temperatura interior nocturna de las viviendas es de 25°C, mientras que la temperatura exterior es superior a la interior, lo que obliga a tener el aire acondicionado funcionando. Para llevar a cabo este estudio, se utilizará el programa ESP-r, una herramienta que permite determinar tanto el confort térmico dentro de la vivienda, como la cantidad de energía consumida para lograrlo, incluyendo la potencia de los sistemas de aire acondicionado

* Doctor en Ingeniería del Medio Ambiente en Edificios. Profesor-investigador de tiempo completo, titular "C" en la Universidad Autónoma Metropolitana, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2207-0512>

** Doctor en Economía con especialidad en Economía de los Recursos Naturales. Profesor titular "C" Departamento de Teoría y Procesos del Diseño de la División de Ciencias de la Comunicación y Diseño en la Universidad Autónoma Metropolitana, México: <https://orcid.org/0000-0003-1864-7374>

actuales. Según los modelos y escenarios desarrollados, es probable que el crecimiento de esta región conlleve un aumento significativo en el uso de aires acondicionados en las viviendas unifamiliares, sobre todo, en horarios nocturnos. Esto, a su vez, se traducirá en un incremento considerable en la demanda y el consumo de energía eléctrica en la región de Tabasco. Esta situación plantea la necesidad de realizar una inversión sustancial en la infraestructura de transmisión y distribución de energía eléctrica en la región. Será necesario transportar energía desde fuentes más lejanas para satisfacer la creciente demanda. El año típico de referencia utilizado en este análisis fue desarrollado por WhiteBox Technologies, basándose en datos históricos horarios recopilados entre 1975 y 1989.

Palabras clave: *cambio climático, confort térmico, aire acondicionado, vivienda, transmisión y distribución eléctrica.*

Introducción

Villahermosa, la ciudad clave del sureste mexicano, destaca por su posición estratégica, su pujante desarrollo económico y cultural, y su papel como centro político y administrativo del estado de Tabasco. Aunque las ciudades medianas como Villahermosa no son grandes emisores de gases de efecto invernadero, desempeñan un rol crucial en los procesos de adaptación al cambio climático global (Vollman, 2019).

Este papel crucial se debe a varios factores. En primer lugar, la creciente urbanización en la región atrae una migración interna cada vez mayor, lo que conlleva un aumento en la demanda de recursos, infraestructura y servicios. Esto a su vez genera mayores emisiones de gases de efecto invernadero a medida que la población crece y las actividades económicas se expanden. Además, la ubicación geográfica de Villahermosa, situada en una zona propensa a inundaciones y fenómenos meteorológicos extremos, la convierte en un punto vulnerable a los impactos del cambio climático (Olivera et al., 2020).

En este contexto, Villahermosa no solo se convertirá en una fuente futura de emisiones, sino también en un centro neurálgico donde se manifes-

tarán los efectos del calentamiento global, como inundaciones, sequías, olas de calor y otros peligros que se espera se intensifiquen (Satterthwaite, 2009). La ciudad enfrenta, por lo tanto, un doble desafío: mitigar sus propias emisiones y, al mismo tiempo, prepararse para afrontar los impactos del cambio climático. Esto requerirá la implementación de políticas y estrategias integrales que aborden tanto la reducción de gases de efecto invernadero como la mejora de la resiliencia urbana.

Por un lado, Villahermosa deberá implementar medidas de eficiencia energética, fomentar el uso de energías renovables, promover el transporte público y la movilidad sostenible, y adoptar prácticas de economía circular que disminuyan la huella de carbono de la ciudad. Por otro lado, deberá invertir en infraestructura resiliente, mejorar los sistemas de alerta temprana, desarrollar planes de emergencia y contingencia, y fortalecer la capacidad de respuesta de la población ante los impactos climáticos (CEPAL, 2020). Solo a través de este abordaje integral, Villahermosa podrá preservar su desarrollo y contribuir, de manera efectiva, a la adaptación regional ante los efectos del cambio climático. Esto requerirá la coordinación y el compromiso de los diferentes actores involucrados, desde el gobierno local hasta la ciudadanía y el sector privado, con el fin de construir una ciudad más sostenible, resiliente y preparada para los desafíos futuros.

El clima de la región se caracteriza por ser cálido y húmedo durante gran parte del año, con temperaturas extremas que superan los 35°C. Los máximos diarios suelen rondar alrededor de los 26°C (Información Climatológica por Estado, 2024). Esta situación climática ha generado una alta demanda de aires acondicionados domésticos para mantener el confort térmico de los habitantes. No obstante, si las temperaturas siguieran aumentando como resultado del cambio climático, la potencia requerida de estos sistemas de climatización también se incrementaría considerablemente (Heard y Olivera, 2013).

Esto supondría una carga sustancial para la infraestructura eléctrica de la región, que probablemente no podría ser satisfecha únicamente con paneles fotovoltaicos en techos y sistemas de almacenamiento de energía local. Con el fin de planificar a medio y largo plazo, es importante evaluar el efecto que tendría el aumento de la potencia de los aires acondicionados, en comparación con mantener los niveles actuales de enfriamiento, como

una alternativa para lograr el confort térmico deseado. Este análisis permitirá a los responsables de la toma de decisiones tomar medidas informadas y desarrollar estrategias adecuadas para hacer frente a los desafíos energéticos y climáticos futuros (De Buen et al., 2017).

Además, la creciente demanda de sistemas de climatización también tendrá un impacto en el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que a su vez podría exacerbar los efectos del cambio climático. Por lo tanto, es crucial explorar soluciones alternativas, como la mejora de la eficiencia energética de los edificios, la promoción de diseños arquitectónicos y urbanos más resilientes al clima, y el desarrollo de tecnologías de climatización más sostenibles, para lograr un equilibrio entre la necesidad de confort térmico y la preservación del medio ambiente (Mendoza, 2016).

El crecimiento tan significativo del uso de energía eléctrica para confort térmico tiene implicaciones de gran relevancia que lo convierten en un tema prioritario en la agenda pública. Por un lado, la infraestructura eléctrica se ha visto profundamente impactada por este fenómeno. Hoy en día, el creciente equipamiento de aparatos de climatización en los hogares y el desarrollo inmobiliario asociado al sector servicios a lo largo y ancho del país han provocado que la demanda de energía para refrigeración y climatización sea el principal factor en el consumo eléctrico nacional, no solo de manera regional o estacional, sino presente incluso en zonas y épocas tradicionalmente fuera de la época de calor y de las regiones con climas más cálidos.

Este aumento desmesurado en el consumo eléctrico para climatización ha tenido también fuertes repercusiones económicas a nivel de los hogares mexicanos. Tal como se mencionaba anteriormente, bajo una definición de pobreza energética que establece que un hogar se encuentra en esta situación cuando gasta más del 10 % de sus ingresos en energía, en México cerca del 11 % del total de los hogares, es decir, alrededor de 3.5 millones de familias, se encuentran en esta precaria situación. Esto demuestra que el impacto del uso de electricidad para confort térmico, especialmente en zonas de clima cálido, tiene un peso económico muy significativo para una proporción considerable de la población (Conuee, 2020).

Más allá de los retos en materia de infraestructura eléctrica y de las consecuencias económicas para los hogares, este fenómeno también plantea importantes desafíos ambientales. El aumento en el consumo energético

destinado a la climatización conlleva un incremento sustancial en las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual contribuye al agravamiento del cambio climático. Esto demanda el diseño e implementación urgente de políticas públicas integrales que promuevan la eficiencia energética, el uso de tecnologías limpias y el desarrollo de alternativas sostenibles para el acondicionamiento térmico de edificaciones.

El problema de la pobreza energética en México es un asunto complejo que tiene implicaciones en diversos ámbitos. La situación es particularmente grave en la frontera norte del país, donde cerca del 18 % de los hogares tienen gastos energéticos que superan el 10 % de sus ingresos, lo cual se debe a la necesidad de mantener el confort térmico en climas cálidos (Conuee, 2020).

Este fenómeno representa una carga significativa para las finanzas públicas, ya que los subsidios al consumo de electricidad para el confort térmico de estos usuarios ascienden a más de 40 000 millones de pesos anuales. Se estima que, solo por este concepto, el erario tiene que asumir un gasto adicional de 400 millones de pesos cada año. Además, el consumo energético asociado a la climatización de edificios residenciales y comerciales en México tiene un impacto considerable en el medio ambiente. Se calcula que las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de esta actividad superan los 75 millones de toneladas de CO₂ al año, lo que representa aproximadamente el 12 % del total de emisiones del país. Peor aún, se proyecta que esta cifra podría incrementarse hasta 6.7 veces para el año 2050 si no se adoptan medidas para abordar este problema (Semarnat, 2022).

Es evidente que la pobreza y el consumo energéticos para confort térmico en México tienen implicaciones sociales, económicas y ambientales que requieren una atención urgente por parte de las autoridades y la sociedad en general. Desarrollar políticas y estrategias integrales que aborden estas cuestiones, de manera efectiva y sostenible, se convierte en una prioridad crucial para el bienestar y el desarrollo del país.

El presente trabajo se centra en la necesidad de modelar y desarrollar escenarios de simulación que permitan analizar los incrementos en la potencia de uso de aires acondicionados domésticos y sus efectos en la demanda eléctrica de la ciudad de Villahermosa. Para llevar a cabo este estudio, se

utilizó el programa ESP-r, una herramienta que posibilita determinar tanto el confort térmico dentro de la vivienda como la cantidad de energía consumida para lograrlo, incluyendo la potencia de uso de los actuales sistemas de aire acondicionado.

La importancia de este análisis radica en la creciente dependencia de la población hacia los sistemas de climatización, especialmente en regiones con climas cálidos. El uso masivo de aires acondicionados ha generado un aumento significativo en la demanda eléctrica, lo que puede repercutir en la estabilidad y eficiencia del sistema energético de la ciudad. Mediante la simulación de diferentes escenarios, se puede evaluar el impacto de estos incrementos en la potencia de uso de los aires acondicionados y plantear estrategias para mitigar el impacto en la red eléctrica. Además, esta investigación también se enfoca en analizar la relación entre el confort térmico de los ocupantes y el consumo energético de los sistemas de climatización. Esto permitirá identificar oportunidades de mejora en la eficiencia de los equipos y en las prácticas de uso, con el fin de reducir el consumo de energía sin comprometer el bienestar de los habitantes.

Material y métodos

Para desarrollar estos modelos de simulación es crucial generar dos enfoques principales en la creación de escenarios. Por un lado, la simulación del clima futuro y, por otro, la simulación del comportamiento de los edificios a partir de esos escenarios climáticos. Dado que la simulación térmica detallada de edificios requiere datos meteorológicos locales a nivel horario, con parámetros como temperatura, humedad, radiación solar y viento, no se pueden usar directamente los resultados de los modelos regionales de cambio climático, ya que carecen de algunas de las variables necesarias para el proceso de simulación.

Tradicionalmente, la simulación térmica de edificios ha utilizado años representativos de datos horarios derivados de periodos de entre diez y treinta años de mediciones. Una metodología ampliamente aplicada es la construcción de un Año Meteorológico Típico (TMY, por sus siglas en inglés), que se ensambla a partir de meses de datos medidos que se acercan al

comportamiento promedio mensual del periodo total. En el marco de este proyecto, se desarrolló el archivo TMY para Villahermosa, el cual sirvió como base para elaborar los años meteorológicos típicos futuros.

Desafortunadamente, México no cuenta con un modelo probabilístico para generar proyecciones climáticas futuras como el que existe en el Reino Unido (Harris et al., 2014). Ante esta limitación, la opción más viable es generar archivos de datos climáticos futuros mediante el ajuste de información histórica (por ejemplo, Años Meteorológicos Típicos o TMY, por sus siglas en inglés) en función de los resultados de modelos regionales de cambio climático.

Existen diversos métodos para llevar a cabo estos ajustes, entre los cuales se encuentra el utilizado para el estándar CIBSE TM49 (Eames, 2016; M. Eames, comunicación personal, 2019). Este método ha sido programado para trabajar con el conjunto de datos CMIP5, publicado por el Programa Mundial de Investigación del Clima (CMIP5-home, 2022). Actualmente, hay una amplia variedad de enfoques para ajustar los datos TMY y generar estimaciones del comportamiento térmico futuro de los edificios. En este sentido, se puede desarrollar un conjunto de bases de datos ajustadas y ordenadas de acuerdo con el cambio previsto para un parámetro meteorológico específico, como la temperatura.

Esto permitiría realizar una serie de simulaciones térmicas de edificios, y producir un rango de posibles impactos del cambio climático sobre el uso de energía o el confort térmico interior. Aquí está una versión más fluida y atractiva del texto original: la probabilidad relativa de cada escenario y su asignación pueden ser, en ocasiones, algo arbitrarias. Una manera alternativa de abordar este desafío sería reducir la cantidad de simulaciones, buscando criterios para seleccionar uno o dos modelos regionales de cambio climático y eligiendo los escenarios más apropiados para la región de estudio.

En este sentido, el trabajo de Sheffield et al. (2013) resulta de gran interés. Estos investigadores evaluaron los resultados obtenidos en los experimentos de simulación climática a escala regional para Norteamérica, incluyendo Centroamérica y México, llevados a cabo en el marco del CMIP5. Su análisis nos brinda una valiosa perspectiva sobre cómo abordar, de manera más eficiente y pertinente, los desafíos de la modelización climática regional. Al reducir la cantidad de simulaciones y enfocándose en los modelos y escenarios más

relevantes para una región en particular, se puede, obtener proyecciones más precisas y confiables, facilitando la toma de decisiones informadas en materia de adaptación y mitigación del cambio climático. Este enfoque más selectivo y estratégico representa una alternativa prometedora a los enfoques tradicionales, que a menudo se caracterizan por una proliferación de simulaciones y un grado considerable de arbitrariedad en la asignación de probabilidades.

Los modelos de cambio climático regional han demostrado que el modelo MIRCO5 (Watanabe et al., 2010) es el más adecuado para reproducir el comportamiento histórico (*hindcasting*) en Centroamérica y México. Por eso, se decidió utilizar los resultados mensuales promedio del escenario MIRCO5 rcp45 r1itp1 entre 2006 y 2100 para generar Años Típicos Meteorológicos (TMY) para los años 2020, 2030 y cada década posterior hasta 2100.

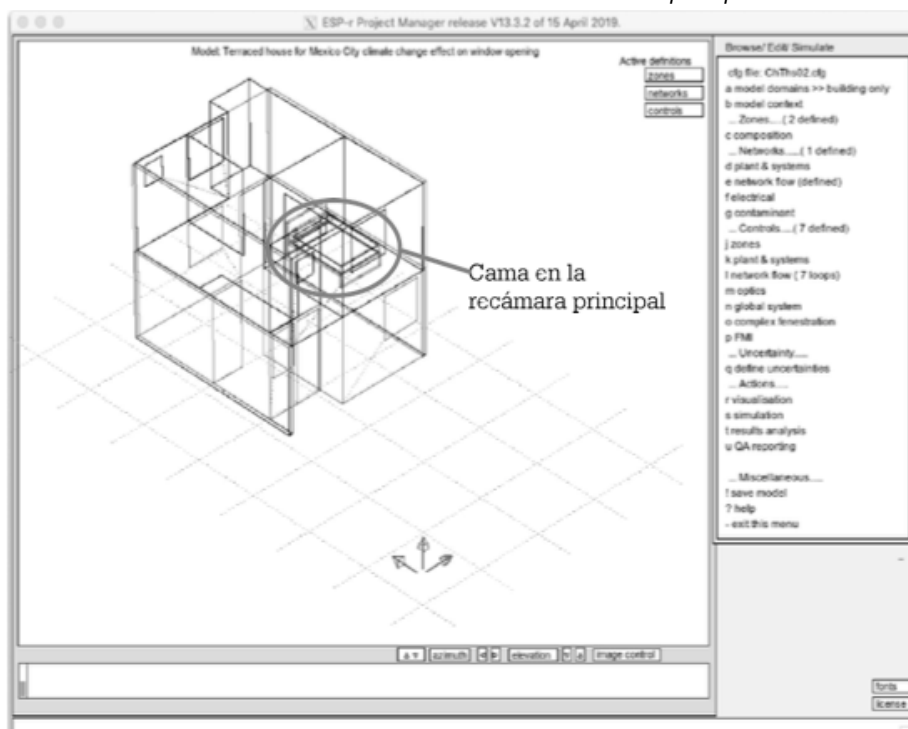
En la zona urbana de Villahermosa, el tipo de vivienda más común es la casa de dos pisos, con casas similares a los lados. Se ha considerado que, en el futuro, estas casas usarán iluminación LED y refrigeradores de consumo estándar, ya que es probable que no se utilicen tecnologías menos eficientes que las actuales. Este enfoque permite obtener una visión realista del consumo energético futuro de las viviendas típicas de la región, teniendo en cuenta las proyecciones climáticas más precisas disponibles. De esta manera, se puede planificar mejor la infraestructura energética y las medidas de eficiencia que se necesitarán para satisfacer la demanda a largo plazo.

En el caso de Villahermosa, ubicada a los 17.59° de latitud norte, la situación presenta algunos desafíos interesantes. Durante el verano, la fachada orientada hacia el norte recibe insolación directa al mediodía, mientras que las fachadas sin sombra orientadas hacia el oeste reciben una cantidad considerable de radiación solar directa por la tarde.

Un análisis de la disposición de las calles en Villahermosa revela que muchas de las manzanas en las zonas residenciales tienen calles con ejes norte-sur, lo que resulta en fachadas orientadas hacia el Este u Oeste. Este patrón plantea consideraciones importantes a la hora de diseñar viviendas eficientes desde el punto de vista energético. La orientación de las edificaciones y la distribución de las calles son factores clave que deben tenerse en cuenta para optimizar el aprovechamiento de la luz solar y minimizar los efectos negativos de la radiación directa, especialmente en climas cálidos como el de Villahermosa. Un enfoque integral que considere estos aspectos

puede contribuir a mejorar el confort y la eficiencia energética de las construcciones en esta localidad (figura 3.1).

Figura 3.1. Casa representativa con cama y sensor de ambiente de temperatura de radiación encima de la almohada en la recámara principal



Fuente: elaboración propia.

Modelo de simulación

La simulación mediante el programa ESP-r es apropiada para situaciones donde la temperatura de la edificación se controla principalmente a través del uso de sistemas de aire acondicionado o calefacción, y no de forma natural. Este programa permite controlar, de manera aproximada, la temperatura interior mediante estrategias como la apertura de ventanas, debido a su sistema de uso de volúmenes finitos y conservación de energía (ESP-r Overview, 2022).

La simulación considera que las propiedades de los materiales de construcción, como la densidad, conductividad y capacidad térmicas, se mantienen constantes a lo largo de ésta. Esto simplifica el modelo, pero puede introducir cierta incertidumbre si estos parámetros varían significativamente en función de las condiciones. Para modelar el flujo de aire a través de grietas y escapes alrededor de ventanas y puertas, el programa utiliza la ecuación 1. Esta ecuación considera factores como la diferencia de presión a través de la abertura y el coeficiente de descarga. Adicionalmente, las ventanas abiertas se modelan como orificios utilizando la ecuación 2, que relaciona el caudal de aire con la diferencia de presión.

La simulación utiliza datos meteorológicos horarios, y realiza cuatro pasos de tiempo por hora, tanto para la simulación térmica como para el flujo de aire. Esto permite capturar con mayor detalle la dinámica de los intercambios de calor y las variaciones de las condiciones exteriores a lo largo del día. En general, el conjunto de programas ESP-r tiene capacidades y limitaciones bien documentadas, las cuales se pueden encontrar en la reseña realizada por Hand J. (ESP-r Overview, 2022). Estos antecedentes son importantes para entender el alcance y las restricciones del modelo de simulación utilizado.

$$\dot{m} = \rho k \Delta P^x \quad (\text{kg/s})$$

donde

$$x = 0.5 + 0.5 \exp(-500 W)$$

$$k = L 9.7 (0.0092)^x / 1000 \quad (\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{Pa}^x)$$

W = ancho **de la** grieta (mm)

L = largo **de la** grieta (m)

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{2 \rho \Delta P} \quad (\text{kg/s})$$

donde

$$C_d = \text{factor de descarga} = 0.65$$

A = área abierta (m²)

El uso generalizado de aires acondicionados ha incrementado significativamente el consumo eléctrico en las zonas residenciales de Villahermosa y otras ciudades cálidas de México. En las últimas décadas, el consumo se ha disparado, llegando a ser 6.6 veces mayor en las áreas de climas cálidos, en contraste con un aumento de solo 3.2 veces en las zonas templadas. Este incremento en el consumo eléctrico se debe, principalmente, a la creciente necesidad de mantener temperaturas frescas y confortables en el interior de las viviendas durante los meses más calurosos del año (Baez, 2020).

La mayoría de las viviendas en Villahermosa carecen de un diseño adecuado para soportar las altas temperaturas y ser energéticamente eficientes, lo que conlleva a un uso excesivo e ineficiente de los aires acondicionados. Muchas de estas casas y apartamentos fueron construidos sin tener en cuenta principios de arquitectura bioclimática, como la orientación de las ventanas, la incorporación de aislamiento térmico o la utilización de materiales autóctonos que ayuden a regular la temperatura interior. Esto genera un aumento considerable en la demanda eléctrica y un mayor impacto ambiental, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de las plantas de generación eléctrica (De Buen et al., 2018).

Si bien se han implementado normativas de eficiencia energética para los equipos de aire acondicionado, lo que ha ayudado a mitigar el crecimiento del consumo eléctrico, aún existe un gran potencial para mejorar la eficiencia energética de las propias viviendas y reemplazar los equipos antiguos por modelos más eficientes. Además, es crucial promover entre la población la importancia de adoptar hábitos de ahorro energético, como mantener una temperatura adecuada en los aires acondicionados y evitar un uso excesivo de estos.

La guía de la Conavi sobre el uso eficiente de la energía en el hogar subraya la importancia de adquirir aires acondicionados eficientes como una medida clave para ahorrar energía. Además, destaca la relevancia del diseño bioclimático de las viviendas para reducir la necesidad de estos equipos. Esto incluye la incorporación de elementos arquitectónicos como toldos, voladizos, vegetación y ventilación natural, que permiten mantener temperaturas más agradables sin depender tanto de los aires acondicionados.

Modelando el confort térmico en el dormitorio principal

A la hora de determinar los niveles de vestimenta y actividad de los ocupantes de los dormitorios, nos basamos en los trabajos de Lai et al. (2018) y Lin y Deng (2008a). Lin y Deng (2008a) desarrollaron un modelo de confort térmico específico para recámaras en climas subtropicales, incluyendo medidas de aislamiento para ropa de cama y pijamas (ecuación 3). Por lo que, para evaluar el confort térmico de la vivienda, se utilizó el “Voto Medio Estimado” (PMV, por sus siglas en inglés), definido por Fanger (ASHRAE, 2021). El PMV es una escala que mide la satisfacción de un grupo de personas con las condiciones térmicas que experimentan, en una escala que va de -3 (frío) a +3 (caliente), pasando por neutro (0).

Además, consideramos la “unidad clo” como medida de la resistencia térmica de la ropa, el concepto de “clo” es una unidad de medida clave para comprender el aislamiento térmico proporcionado por la ropa que llevamos puesta. Esta escala nos permite cuantificar con precisión el nivel de confort que nos brindan nuestras prendas en diferentes entornos. Por ejemplo, estar completamente desnudos: en ese caso, tendríamos 0 clo de aislamiento. Por el contrario, un atuendo típico de hombre, con camisa, pantalones, ropa interior, calcetines y zapatos, se ubica en 1 clo. Una indumentaria muy abrigada, como ropa de lana, abrigo y sombrero, alcanza valores entre 3 y 4 clo.

Por otro lado, la ropa ligera de verano se encuentra en torno a los 0.5 clo, mientras que un uniforme militar de invierno llega a 1.5 clo. Como puedes ver, la escala de clo nos permite cuantificar con precisión el nivel de aislamiento de nuestras prendas, lo cual es fundamental para evaluar el confort térmico en distintos ambientes. Esta unidad de medida se ha convertido en una herramienta indispensable para ingenieros, diseñadores y expertos en climatización, quienes la utilizan para optimizar las condiciones de bienestar de las personas en espacios interiores o exteriores. Comprender el clo de nuestra ropa nos ayuda a tomar decisiones más informadas sobre qué vestir en función de las circunstancias. En el estudio 1 clo equivale a 0.155 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$) (ASHRAE, 2021).

Asimismo se considera que todos los seres vivos consumen energía para mantener sus funciones vitales. A esta cantidad de energía que gasta un organismo en un período de tiempo determinado se le conoce como *tasa metabólica*. Puede medirse en unidades como Joules, calorías o kilocalorías por unidad de tiempo, o bien en función del oxígeno que consume o el dióxido de carbono que produce.

La tasa metabólica basal (TMB) o tasa metabólica estándar (TMS) es la medición de la tasa metabólica de un animal en reposo, tranquilo y sin estrés, cuando no está activamente digiriendo alimentos. Según la teoría metabólica de la ecología, la tasa metabólica de un organismo está relacionada con su tamaño corporal y temperatura. Específicamente, se ha observado que la tasa metabólica total (B) se relaciona con la masa corporal (M) siguiendo la ley de Kleiber: $B = B_0 * M^b$, donde B_0 es una constante y b un exponente cercano a $3/4$. Además, la tasa metabólica aumenta a medida que lo hace la temperatura corporal, siguiendo el factor de Boltzmann: $B = B_0 * e^{(-E/kT)}$, donde E es la energía de activación, T la temperatura absoluta y k la constante de Boltzmann.

De acuerdo con la norma ASHRAE de 2021, esta medida permite comparar la tasa metabólica de organismos de diferente tamaño y temperatura. En el caso del estudio, la tasa metabólica se define en términos de producción de calor por unidad de área de la piel, donde 1 met equivale a $58W/m^2$ (ASHRAE, 2021). Con estos parámetros, pudimos modelar de manera más precisa el confort térmico de la vivienda y las necesidades de sus ocupantes.

$$PMV = 0.0998 \left\{ 40 - \frac{1}{R_t} \left[\left(34.6 - \frac{4.7 \bar{t}_r + h_c t_a}{4.7 + h_c} \right) + 0.3762(5.52 - p_a) \right] \right\} - 0.0998 [0.056(34 - t_a) + 0.692(5.87 - p_a)] \quad (3)$$

Es importante tener en cuenta que los valores de confort térmico en las viviendas modeladas dependen en gran medida de las costumbres y preferencias individuales de los residentes. Por lo tanto, los valores absolutos de PMV (Predicted Mean Vote) no necesariamente reflejan la realidad típica de estas viviendas. Sin embargo, es probable que durante el resto del siglo se produzcan cambios significativos en la distribución de PMV, lo que podría

ser un indicador de las consecuencias del cambio climático en México, especialmente en términos del potencial de un mayor confort térmico y un uso más extendido del aire acondicionado en los hogares.

En el caso de los residentes que duermen en los pisos superiores de una vivienda representativa, se han considerado dos escenarios diferentes. En el primero, los ocupantes llevan un pijama ligero con una sábana de algodón ligera, doblada para exponer el 52 % del cuerpo (1.8 clo), mientras que en el segundo escenario se encuentran completamente cubiertos con ropa (2.7 clo). En ambos casos, se asume un nivel de actividad de 0.7 met.

Para el dormitorio principal, se ha colocado un sensor de temperatura de radiación ambiente ligeramente por encima de la superficie de la almohada, con el fin de registrar las condiciones térmicas del espacio de descanso. Por otro lado, se supone que el espacio de la planta baja de la vivienda se ocupa durante un breve período de tiempo por la mañana en los días laborables, y durante todo el día los fines de semana y festivos.

Esta distribución del uso del espacio es relevante para comprender las dinámicas de confort térmico y el potencial de ahorro energético en la vivienda. Aquí una versión más elaborada del pasaje original: Durante la noche, cuando las personas pasan la mayor parte de su tiempo en el hogar, se vuelve fundamental garantizar condiciones de confort adecuadas.

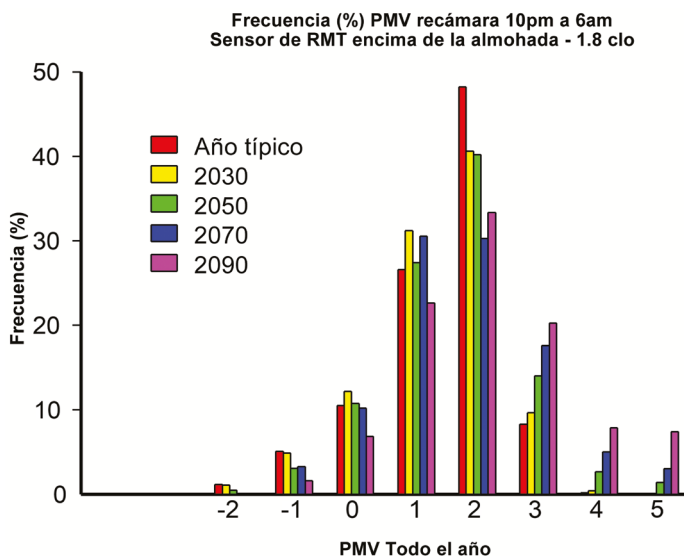
Es en este momento del día cuando las necesidades de climatización se hacen más evidentes y relevantes para el bienestar de los ocupantes. Dado que la vivienda unifamiliar se utiliza primordialmente durante las horas nocturnas, se considera que las condiciones de confort en ese período serían el principal factor motivacional para la adquisición e implementación de unidades de aire acondicionado.

Esto se debe a que, por lo general, es durante la noche cuando las personas buscan descansar, relajarse y disfrutar del hogar, por lo que contar con un ambiente térmicamente confortable se vuelve una prioridad. Más allá del uso diurno, las exigencias de climatización se intensifican en la noche, cuando las personas permanecen por períodos prolongados en la vivienda. Por ello, se entiende que la necesidad de garantizar un clima interior agradable y acorde a las preferencias de los ocupantes durante la noche sería el principal incentivo para la adquisición y uso de unidades de aire acondicionado en las casas unifamiliares.

Resultados

La gráfica 3.1 muestra los valores del PMV de confort térmico para la recámara principal, usando la estrategia propuesta de poner el ventilador a potencias mínimas. Aunque los resultados indican que se obtienen temperaturas templadas, se debe incrementar la potencia de aire acondicionado para finales de siglo para lograr condiciones de confort. Sin embargo, en las ocasiones cuando las condiciones de confort son de incomodidad por calor sería muy difícil reducir el arropamiento a un nivel mucho menor de 1.8 clo. Se puede suponer que bajo tales condiciones el uso de ventiladores y aire acondicionado sería contemplado con una mayor potencia, sobre todo si dichas condiciones ocurren en periodos de mayor duración.

Gráfica 3.1. PMV frecuencia entre 22:00 y 06:00 para una recámara con ventana de febrero 15 a junio 15, y 1.8 clo de arropamiento. Sensor de temperatura medio radiante sobre la almohada de la cama



Fuente: elaboración propia.

La sensación de mayor incomodidad por altas temperaturas en la parte final del siglo será más común. El modelo climático predice un incremento de temperaturas en la década actual, pero posteriormente, la frecuencia de

temperaturas templadas a calorosas incrementa de manera significativa. Acercándose el final del siglo se puede apreciar que se predicen rachas con incomodidad por calor mucho más severas, especialmente para vivienda con una orientación desfavorable.

La orientación de la casa sí tiene un impacto sobre la percepción de altos índices de PMV en la recámara. No obstante, esto es una característica del diseño específico de la casa. En este caso, la disposición de una ventana con orientación al Este, sin sombreado, externo acumularía en junio radiación solar directa de manera importante, en particular cuando la luz solar cae sobre el piso antes de medio-día y, por lo tanto, almacenaría calor para su posterior liberación. Durante junio usualmente inicia la estación de lluvias, y las tardes frecuentemente son nubladas, lo cual reduce la radiación solar entrando a una ventana con orientación hacia el Oeste. Las diferencias en las frecuencias de PMV para las cuatro orientaciones de la casa típica muestran la necesidad para los diseñadores de realizar simulaciones detallados para sus proyectos específicos con datos de escenarios climáticos futuros (Heard et al., 2013).

Esto permitiría a los diseñadores ganar una perspicacia en relación con la resiliencia o no de su propuesta de diseño. Sin embargo, los cambios de las distribuciones de las percepciones de PMV son similar para las cuatro orientaciones simuladas. En términos absolutos se encuentra que los PMV indicados caen dentro de los rangos de confort. Tomando en cuenta la estrategia optimista del uso de aire acondicionado en potencia mínima, y considerando que los supuestos de uso de ropa de cama son racionales y que la casa simulada no es particularmente propicia a sobrecalentamiento, es probable que, en la práctica, eventos de calor extremo fomentarán la compra de unidades de aire acondicionado para quienes aún no tengan este dispositivo, y una vez instalados su uso típico se vuelve habitual y a mayores potencias por las rachas de calor previstas.

La tabla 3.1 muestra una clara tendencia: a medida que aumenta la potencia del equipo de enfriamiento, también se incrementa el precio que el usuario final debe pagar. Esto se debe a que equipos más potentes requieren un mayor consumo de energía eléctrica, lo cual conlleva mayores costos de operación para el usuario. Asimismo, cuantas más horas requiera el equipo estar encendido, mayor será el consumo eléctrico y, por ende, el gasto mensual en la factura de luz.

Tabla 3.1. *Consumo de energía eléctrica y potencia de electrodomésticos*

Electrodoméstico	Potencia W	Potencia (KW)	Tiempo de uso	Horas mes	Precio consumo básico	Precio consumo intermedio	Precio consumo excedente
Ventilador de techo (CB)	103	0.103	8	240	\$29.56	\$35.99	\$105.30
Ventilador de torre (CB)	50	0.05	8	240	\$14.35	\$17.47	\$51.11
Ventilador de piso	90	0.09	8	240	\$25.83	\$31.45	\$92.01
Aire acondicionado de ventana	1700	1.7	8	240	\$487.95	\$593.97	\$1,737.88
Mini Split	1600	1.6	8	240	\$459.25	\$559.03	\$1,635.66
Clima portátil	1400	1.4	8	240	\$401.84	\$489.15	\$1,431.20

Fuente: SENER (2016), actualizado por Selectra (2024).

Es importante destacar que la tabla 3.1 únicamente refleja el promedio de horas de uso en una ciudad típica de México. Este dato puede variar significativamente dependiendo de factores como el clima de la región, los hábitos de uso de los consumidores y la eficiencia energética de los propios equipos de aire acondicionado. Por ejemplo, en zonas con climas más cálidos y húmedos, probablemente los usuarios requieran mantener encendidos los equipos por un mayor número de horas al día, aumentando así su consumo eléctrico. Del mismo modo, aquellos usuarios que estén más conscientes del impacto ambiental y económico del uso excesivo de aire acondicionado tenderán a optimizar los tiempos de uso, buscando un mayor balance entre confort y ahorro.

Al analizar esta información, se evidencia la necesidad de encontrar un equilibrio entre la capacidad de los equipos de aire acondicionado y su consumo energético. Seleccionar la potencia adecuada, así como optimizar los tiempos de uso, puede resultar clave para controlar tanto los costos como el impacto ambiental. Sin embargo, este balance debe considerar también otros factores como el nivel de abrigo o vestimenta (expresado en clo) y la actividad metabólica de los ocupantes (expresada en PVM), los cuales influyen directamente en las necesidades de enfriamiento. De esta manera, se podrá lograr un ambiente interior confortable, eficiente y sostenible en el tiempo.

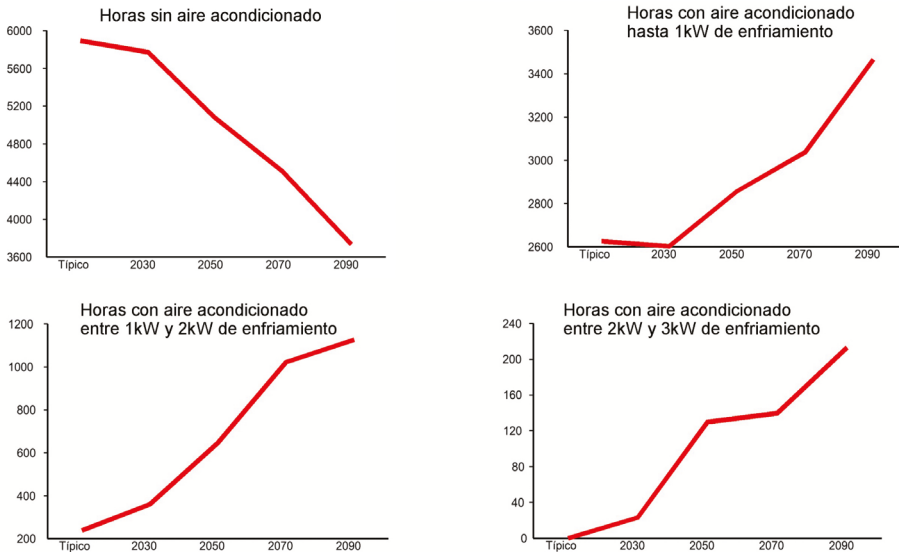
Mientras que en la gráfica 3.2 se muestra la cantidad de horas de uso del aire acondicionado en función de su potencia de refrigeración, la cual va

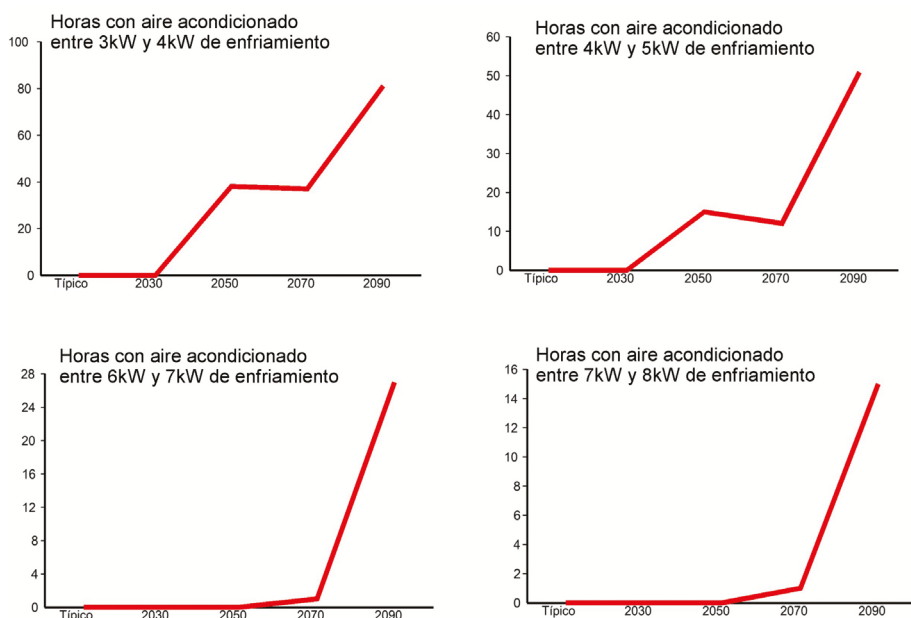
desde el apagado hasta los 8 kW, aumentando de 1 en 1 kW. Al analizar el uso típico actual y los escenarios de cambio climático para 2030, 2050, 2070 y 2090, observamos un incremento constante en las horas de uso del aire acondicionado.

Particularmente en los escenarios futuros para finales de siglo, veremos que será necesario encender el aire acondicionado incluso en horas de la mañana y en momentos del día en los que actualmente no suele ser necesario. Esto se debe a que los aumentos proyectados en las temperaturas y los niveles de humedad harán que los espacios interiores se vuelvan cada vez más calurosos e incómodos, incluso durante las primeras horas del día, obligando a los usuarios a utilizar los equipos de aire acondicionado por períodos más prolongados.

Además, se aprecia que el equipo se encenderá a niveles de potencia cada vez más cercanos a sus límites de diseño, es decir, por encima de los 5 kW. Esto implica que, a medida que los equipos actuales lleguen al final de su vida útil, tenderán a ser reemplazados por modelos de mayor capacidad de refrigeración, capaces de hacer frente a las condiciones climáticas más exigentes.

Gráfica 3.2. Horas de uso y no uso de aire acondicionado según potencia de enfriamiento





Fuente: elaboración propia.

La tabla 3.2 revela un preocupante incremento en el uso de aire acondicionado a medida que avanza el cambio climático. Actualmente, el aire acondicionado se utiliza durante 7.68 horas típicamente por la noche, es decir, el 32.70 % del día. Sin embargo, se prevé que para finales de siglo esta cifra aumente casi un 57.32 %, llegando a 13.75 horas de funcionamiento diario. Esto significa que prácticamente la mitad del día el aire acondicionado estará en pleno funcionamiento. Como se observa en la figura 3.1, este aumento en el uso del aire acondicionado también conllevará un incremento notable en el consumo energético de estos equipos.

Tabla 3.2. Horas de uso y no uso de aire acondicionado, expresado en porcentajes

Uso de aire acondicionado	Año típico	2030	2050	2070	2090
Horas sin necesidad de aire acondicionado	67.30 %	65.91 %	57.86 %	51.36 %	42.68 %
Horas con necesidad de aire acondicionado	32.70 %	34.09 %	42.14 %	48.64 %	57.32 %

Fuente: elaboración propia.

Discusión y conclusiones

La combinación de los diferentes escenarios de cambio climático y la simulación de una vivienda típica con uso de aire acondicionado, propuesta en este estudio, muestra el impacto potencial del cambio climático sobre las condiciones interiores de confort térmico en las viviendas de Villahermosa. Es crucial considerar el confort térmico nocturno, ya que es el periodo más importante para brindar una buena calidad de sueño y el momento en el que los ocupantes pasan más tiempo en sus hogares. Por lo tanto, el confort térmico en los dormitorios se considera el factor decisivo más importante a la hora de adquirir y utilizar unidades de aire acondicionado.

Si bien los valores específicos del índice PMV (Voto Medio Previsto) para una vivienda y sus ocupantes individuales pueden diferir de los resultados presentados aquí, este estudio logró su objetivo de evaluar los cambios potenciales del clima, el PMV y el uso de aire acondicionado a lo largo del siglo. Es evidente que simular una gama más amplia de tipos de vivienda, niveles de aislamiento, vestimenta y actividad de los ocupantes sería de gran utilidad para obtener resultados aún más representativos de la realidad.

Los hallazgos de este estudio generan razones para preocuparse por la percepción de incomodidad térmica, sobre todo en el horario nocturno que podría llevar a los habitantes a instalar aire acondicionado doméstico de manera cada vez más generalizada en las extensas áreas urbanas. Este aumento en el uso de sistemas de climatización, si bien puede mejorar las condiciones de confort interior, también conlleva implicaciones en términos de mayor demanda energética, emisiones de gases de efecto invernadero y costos económicos para los hogares. Por lo tanto, es crucial explorar soluciones de diseño y estrategias de adaptación que permitan mitigar los efectos del cambio climático y lograr condiciones de confort térmico interior de manera más sostenible.

El incremento en el uso de aire acondicionado doméstico, debido a las altas temperaturas, tendrá un impacto significativo en las inversiones requeridas para la transmisión y distribución de energía eléctrica en áreas urbanas como Villahermosa. A medida que las temperaturas extremas se vuelvan más frecuentes e intensas, se producirán eventos de sobrecalentamiento que conllevarán consecuencias importantes para la salud pública y requerirán

respuestas urgentes por parte de los gobiernos locales. Este cambio en los hábitos de consumo y en la demanda de equipos más potentes tendrá importantes implicaciones en términos de consumo energético, costos operativos y la necesidad de una mayor inversión en infraestructura eléctrica para satisfacer la creciente demanda de energía.

Es fundamental desarrollar programas integrales para prevenir los efectos adversos del cambio climático en la habitabilidad de las viviendas en Villahermosa. Estos programas deberán abordar no solo el aumento en el consumo de energía eléctrica, sino también garantizar el confort térmico y la protección de la salud de los habitantes. Esto implicará la implementación de medidas de eficiencia energética, el uso de materiales y diseños constructivos adaptados al clima, y el desarrollo de soluciones de enfriamiento pasivo y basadas en energías renovables.

Es importante destacar que los resultados del estudio actual se basan en las proyecciones de un solo modelo regional de clima futuro, el cual ha demostrado una buena capacidad para representar las condiciones históricas (*hindcasting*). Si bien este modelo indica que los cambios serán de una magnitud considerable, existe cierta incertidumbre sobre la exactitud de estas proyecciones. Para tener una mejor comprensión de los posibles escenarios climáticos futuros, sería deseable realizar estudios que incorporen los resultados de una gama más amplia de modelos regionales de cambio climático.

A pesar de esta incertidumbre, los hallazgos presentados en este estudio son suficientes para concluir que es necesario adaptar el diseño de edificios y viviendas unifamiliares en Villahermosa. Esto implicará la adopción de estrategias de diseño bioclimático, la selección de materiales y soluciones constructivas más resilientes al clima, y la integración de sistemas de enfriamiento eficientes y sostenibles. Estas medidas son fundamentales para garantizar la habitabilidad de las viviendas, reducir el consumo energético y proteger la salud de los residentes ante los desafíos que plantea el cambio climático en la región.

Sería valioso ampliar y expandir este tipo de estudio a otras áreas urbanas con climas tropicales a lo largo de la República mexicana. Analizar y comparar las características y condiciones específicas de diferentes ciudades y regiones con este tipo de clima en todo el país nos permitiría obtener una imagen más integral y enriquecedora. Al examinar a detalle las particulari-

dades de cada localidad, podríamos identificar patrones, retos y oportunidades comunes, así como las diferencias que puedan existir.

Esto nos ayudaría a desarrollar soluciones más acertadas y adaptadas a las necesidades de las distintas comunidades, en lugar de aplicar enfoques genéricos. Un análisis comparativo a escala nacional sin duda aportaría una valiosa perspectiva para entender mejor la dinámica de los entornos urbanos tropicales mexicanos, y para diseñar estrategias de desarrollo más eficaces y sostenibles. Vale la pena invertir esfuerzos en esta línea de investigación tan relevante para el futuro de nuestras ciudades.

Por ejemplo, se podría estudiar cómo varían los patrones de desarrollo urbano, las dinámicas sociodemográficas, los desafíos ambientales y las soluciones de infraestructura en ciudades como Cancún, Acapulco, Veracruz, Tampico o Mérida, entre otras. Esto permitiría obtener una visión más integral y detallada de la realidad urbana en los entornos cálidos y húmedos de México. Asimismo, sería relevante involucrar a autoridades locales, expertos en planificación y desarrollo, así como a la propia ciudadanía, con el fin de comprender mejor las necesidades, percepciones y aspiraciones de quienes habitan estas regiones tropicales. De este modo, se podrían formular estrategias más efectivas y adaptadas a las particularidades de cada contexto urbano.

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo se benefició de la infraestructura y los recursos provenientes de dos importantes proyectos de investigación. Por un lado, el proyecto “Cambio climático y su impacto sobre el diseño de vivienda y edificios, y las necesidades de modificación de las NOM-020-ENER-2011 y NOM-008-ENER-2001” (No. 246157), financiado por el Fondo Sectorial Conacyt-SENER-Sustentabilidad Energética. Y por el otro, el proyecto “El diseño ante el cambio climático: Divulgación, normatividad e información climatológica”, desarrollado por la División de Ciencias de la Comunicación y Diseño de la Unidad Cuajimalpa de la Universidad Autónoma Metropolitana. El acceso a esta infraestructura y recursos ha sido clave para el desarrollo del presente trabajo.

Referencias

- Andersen, R., Fabi, V., Toftum, J., Corgnati, S. P., y Olesen, B. W. (2013). Window opening behavior modeled from measurements in Danish dwellings. *Building and Environment*, 69, 101-113. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.07.005>
- ASHRAE. (2021). Handbook Fundamentals (SI Edition, capítulo 9). <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook>
- CMIP5-home. (2022). LInl.Gov. Recuperado el 11 de agosto de 2018, de <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/>
- Baez García, W. G. (2020). Desempeño de Modelos de confort térmico en vivienda de interés social ubicada en clima cálido de México. <https://rinacional.tecnm.mx/js-pui/handle/TecNM/1436>
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2020) En México, las políticas públicas de eficiencia energética han logrado abaratar los servicios energéticos. CONUEE. <https://www.gob.mx/conuee/es/articulos/en-mexico-las-politicas-publicas-de-eficiencia-energetica-han-logrado-abaratar-los-servicios-energeticos?idiom=es>
- De Buen O., Navarrete J., y Jaime, E. (2017). Resultados relevantes relativos a eficiencia energética del Módulo Hogares y Medio Ambiente de la Encuesta Nacional de los Hogares de INEGI, 2015. En C. N. p. e. U. E. d. I. Energía (Ed.), Cuadernos: 8. CDMX: Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. <https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuaderno5nvciclo.pdf>
- Eames, M. (2019). Letter to Christopher Heard.
- (2016). An update of the UK's design summer years: Probabilistic design summer years for enhanced overheating risk analysis in building design. *Building Services Engineering Research and Technology*. <https://doi.org/10.1177/0143624416631131>
- ESP-r-Overview. (2022). Strath.Ac.Uk. Recuperado de Spring 1, 2019, http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r_overview.htm
- Font, J. G. (2018). Ciudades adaptativas y resilientes ante el cambio climático. Estrategias locales para contribuir a la sostenibilidad urbana. *Revista Aragonesa de Administración Pública*, 52, 102-158.
- Harris, C. N. P., Quinn, A. D., y Bridgeman, J. (2014). The use of probabilistic weather generator information for climate change adaptation in the UK water sector: Climate change adaptation in the water sector using weather generators. *Meteorological Applications*, 21(2), 129-140. <https://doi.org/10.1002/met.1335>
- Heard, C. L., y Olivera Villarroel, S. M. (2013). Evaluación económica de la resistencia térmica de la vivienda de interés social en las ciudades tropicales de México. *Acta Universitaria*, 23(4), 17-29. <https://doi.org/10.15174/au.2013.458>
- Información Climatológica por Estado. (2024.). Gob.Mx. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado>
- Jones, R. V., Fuertes, A., Gregori, E., y Giretti, A. (2017). Stochastic behavioural models of occupants' main bedroom window operation for UK residential buildings. *Building and Environment*, 118, 144-158. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.033>

- Lai, D., Jia, S., Qi, Y., y Liu, J. (2018). Window-opening behavior in Chinese residential buildings across different climate zones. *Building and Environment*, 142, 234-243. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.030>
- Lin, Z., y Deng, S. (2008a). A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics-developing a thermal comfort model for sleeping environments. *Building and Environment*, 43(1), 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.026>
- Lin, Z., y Deng, S. (2008b). A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics-Measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropics. *Building and Environment*, 43(5), 905-916. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.026>
- Markovic, R., Grintal, E., Wölki, D., Frisch, J., y Van Treeck, C. (2018). Window opening model using deep learning methods. *Building and Environment*, 145, 319-329. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.024>
- Mendoza Cárdenas, M. C. (2016). *Evaluación del impacto del uso de estrategias de climatización pasiva en el consumo de energía eléctrica de dispositivos de acondicionamiento de aire en viviendas en Monterrey* [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Nuevo León]. <http://eprints.uanl.mx/14150/>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). Plan de Acción en Enfriamiento México. Refrigerantes con Bajo Potencial de Calentamiento Global y Eficiencia Energética en Equipos de Refrigeración y Aire Acondicionado. México. Semarnat. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/775010/PAE_FINAL__1_.pdf
- Secretaría de Energía. (2016). Estudio de caracterización del uso de aire acondicionado en vivienda de interés social. Mexico: CONUEE/GIZ. http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164221/Conuee_2016_Estudio_Caracterizaci_n_Uso_Aire_Acondicionado_en_Vivienda.pdf
- Sheffield, J., Barrett, A. P., Colle, B., Nelun Fernando, D., Fu, R., Geil, K. L., Hu, Q., Kinter, J., Kumar, S., Langenbrunner, B., Lombardo, K., Long, L. N., Maloney, E., Mariotti, A., Meyerson, J. E., Mo, K. C., David Neelin, J., Nigam, S., Pan, Z., ... Yin, L. (2013). North American climate in CMIP5 experiments. Part I: Evaluation of historical simulations of continental and regional climatology. *Journal of Climate*, 26(23), 9209-9245. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00592.1>
- Vollman, F. (2019). Las ciudades, "causa y solución" del cambio climático. *Noticias ONU*. <https://news.un.org/es/story/2019/09/1462322>
- Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., y Kimoto, M. (2010). Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate*, 23(23), 6312-6335. <https://doi.org/10.1175/2010jcli3679.1>
- Weather Files for Current and Future Climate. (2022). Exeter.Ac.Uk. Recuperado el 6 de febrero de 2016, de <http://www.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/research/newsandevents/>