

ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DE ESTRATEGIAS PARA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN VIVIENDA, APLICANDO LA NORMATIVIDAD VIGENTE EN EL NOROESTE DE MÉXICO

Recibido 29/08/2024
Aceptado 05/11/2024

COST-BENEFIT ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY STRATEGIES FOR HOUSING, APPLYING THE CURRENT REGULATIONS IN NORTHWEST MEXICO

ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO DE ESTRATÉGIAS PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM RESIDÊNCIAS, APLICANDO AS REGULAMENTAÇÕES ATUAIS NO NOROESTE DO MÉXICO

Cecilia Galindo-Borbón

Magíster en en Ciencias Ambientales
Profesora de asignatura, Departamento de Arquitectura y Diseño
Universidad de Sonora, Hermosillo, México
<https://orcid.org/0000-0002-9637-7173>
cecilia.galindo@unison.mx (Autora de Correspondencia)

Ana Borbón-Almada

Doctora en Ciencias
Profesora de tiempo completo, Departamento de Ingeniería Civil y Minas
Universidad de Sonora, Hermosillo, México
<https://orcid.org/0000-0002-7781-2571>
ana.borbon@unison.mx

José M. Ochoa-de-la-Torre

Doctor en Arquitectura
Investigador de tiempo completo, Departamento de Arquitectura y Diseño
Universidad de Sonora, Hermosillo, México
<https://orcid.org/0000-0001-6035-1249>
josemanuel.ochoa@unison.mx

Irene Marincic-Lovriha

Doctora en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos
Profesora de tiempo completo, Departamento de Arquitectura y Diseño
Universidad de Sonora, Hermosillo, México
<https://orcid.org/0000-0002-8609-2748>
irene.marincic@unison.mx



RESUMEN

El cambio climático ha afectado de manera desproporcionada a los sectores más vulnerables, y la eficiencia energética en edificaciones emerge como clave para mitigar y adaptarse a estos efectos. En México, los climas cálidos secos predominan en el 53% del territorio, especialmente en el norte, y aunque existe normativa para la eficiencia energética en la edificación, ésta tiene un impacto limitado. El estudio evalúa los costos y beneficios de dicha normativa que considera viviendas comunes en distintos climas de un estado del norte de México donde se analizaron 180 modelos y se concluyó que cumplir con la normativa aumentaría el costo de la vivienda en 1.93%, reduciría el consumo eléctrico en 26% y disminuiría las emisiones de CO₂e en 16.95%. Estos beneficios se obtuvieron sin cambiar los sistemas constructivos más utilizados y se priorizó sistemas de sombreado. Los resultados podrían orientar a políticas públicas más adecuadas a los contextos locales.

Palabras clave

cambio climático, vivienda, energía eléctrica, normalización, consumo de energía.

ABSTRACT

Climate change has disproportionately affected the most vulnerable sectors, and energy efficiency in buildings is essential for mitigating and adapting to these effects. In Mexico, hot, dry climates predominate in 53% of the country, especially in the north, and although there are energy efficiency regulations for buildings, they have a limited impact. This study evaluates the costs and benefits of these regulations considering ordinary dwellings in different climates in a state in northern Mexico, analyzing 180 models and concluding that complying with the regulations would increase the cost of housing by 1.93%, reduce electricity consumption by 26%, and decrease CO₂e emissions by 16.95%. These benefits were obtained without changing the most commonly used construction systems, although shading systems were prioritized. The results can guide public policies that are more appropriate to local contexts.

Keywords

climate change, housing, electric power, standardization, energy consumption.

RESUMO

As mudanças climáticas afetam desproporcionalmente os setores mais vulneráveis, e a eficiência energética em edifícios surge como uma das chaves para mitigar e adaptar-se a esses efeitos. No México, os climas quentes e secos predominam em 53% do território, especialmente no norte, e, embora existam regulamentações para a eficiência energética em edifícios, elas têm impacto limitado. O estudo avalia os custos e benefícios de tais regulamentações considerando residências comuns em diferentes climas em um estado do norte do México. Ele analisou 180 modelos e concluiu que a conformidade com a norma aumentaria o custo da moradia em 1,93%, reduziria o consumo de eletricidade em 26% e reduziria as emissões de CO₂e em 16,95%. Estes benefícios foram obtidos sem alterar os sistemas de construção mais comumente usados e os sistemas de sombreamento foram priorizados. Os resultados podem orientar políticas públicas mais adequadas aos contextos locais.

Palavras-chave:

mudança climática, habitação, energia elétrica, padronização, consumo de energia

INTRODUCCIÓN

El sexto informe del IPCC (2023) señala que los efectos del cambio climático han sido más graves de lo previsto, lo que afecta a los sistemas naturales y a los sectores socioeconómicos, especialmente a los más vulnerables. Estos impactos incluyen problemas de salud física y mental, como resultado de fenómenos como olas de calor extremo, que aumentan la mortalidad y morbilidad. El informe subraya la necesidad que los gobiernos enfrenten estos desafíos mediante políticas de adaptación y resiliencia, destacándose la importancia de la diversificación energética, la descentralización de la generación y la gestión de la demanda, con un enfoque particular en la eficiencia energética de las edificaciones como clave para mitigar y adaptarse al cambio climático.

Según el último informe de la Agencia Internacional de Energía, IEA (2023), el sector de la edificación representa el 30% del consumo final total de energía en el mundo. Esto se debe principalmente a la demanda de energía para el confort térmico de los espacios, donde la calefacción es una de las primeras demandas de uso final de energía y el enfriamiento de espacios es el uso final de mayor crecimiento en las últimas décadas en donde además, las predicciones para el aumento de superficie construida a nivel mundial ronda en un 20% de 2021 al 2030, y de la que el 80% se encontraría en economías de mercados emergentes, agravado por los efectos crecientes del cambio climático (IEA, 2022).

En México el sector de la edificación representa el 18% del consumo final total de energía que considera los edificios residenciales, comerciales y públicos y, el principal energético es la electricidad (Secretaría de Energía [SENER], 2023). Sin embargo, el consumo de energía está determinado en gran medida por las características del clima que condicionan la habitabilidad al uso de sistemas de enfriamiento (A/C) y, por lo tanto, la distribución del consumo en el territorio nacional no es uniforme. En general, en el 89% del territorio mexicano predominan los climas cálidos húmedos y secos, pero particularmente los climas cálidos secos (muy seco, seco desértico, seco y semiseco) que representan el 53% de la superficie total, y se ubican en la región norte del país (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2024b).

El gasto energético en los hogares se compone de combustibles, gas y electricidad y a través de este gasto se puede describir la demanda energética que identifica la fuente de energía, así como su nivel de consumo (Rodríguez et al., 2022). Particularmente, los estados del norte son los que invierten mayor recurso económico en el gasto energético (Figura 1); y, la electricidad puede superar el 60% y hasta el 70% de ese gasto (Rodríguez et al., 2022).

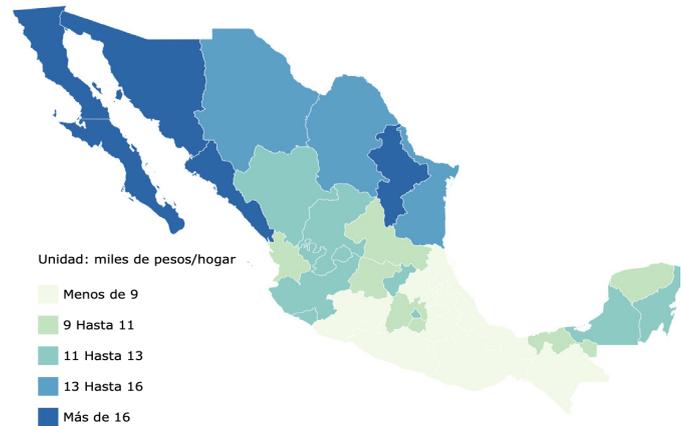


Figura 1. Gasto de energía por hogar en el territorio mexicano .
Fuente: imagen extraída Secretaría de Energía [SENER] y Comisión Nacional del Uso Eficiente de la Energía [CONUEE] (2024), 19.80 \$ MEX/dólar para agosto de 2024.

A nivel nacional, los usos finales de la electricidad en el sector residencial se componen de la siguiente forma, el enfriamiento de espacios ocupa el 30%, del total, la refrigeración de alimentos el 20%, el uso de electrodomésticos y otros enseres el 15%, entretenimiento que se refiere específicamente a la televisión con una demanda del 13%, la iluminación con el 8% y, lavado de ropa con el 6%, calentamiento de agua 5%, calefacción 2% y bombeo 1% (Contreras et al., 2022). Es necesario subrayar que estos datos son promedios nacionales, y que el porcentaje del uso final por enfriamiento de espacios sería mayor en las zonas con temperaturas elevadas. No se tiene un dato preciso, pero, en las zonas de clima tropical, se consume un 14% más de energía eléctrica que en las de clima templado, mientras que, en los estados del norte, con clima seco, este consumo es de un 29% superior al del clima templado (Rodríguez, 2018; INEGI, 2022); esta diferencia se asume que corresponde principalmente al mayor uso de energía para el enfriamiento de espacios por las condiciones de temperatura.

Habría también que considerar, que es altamente probable que la necesidad de energía por confort térmico aumente; para dimensionar la incertidumbre, según el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático (INECC, 2022) para los estados del norte de México, en un mediano plazo y en un escenario RCP4.5 de estabilización media, la anomalía en la temperatura media sería de 1.9°C y para un escenario RCP8.5 de altas emisiones sería de 2.4°C (López-Díaz et al., 2022).

Este problema se agrava al reconocer que alcanzar el confort térmico requiere recursos económicos y energéticos suficientes, sin embargo, un sector de la población se encuentra en situación de vulnerabilidad debido a su limitado acceso. En la última década ha crecido el interés por este tema, ampliándose las

investigaciones sobre el fenómeno de la pobreza energética (Siksnelyte-Butkiene et al., 2021), lo que argumenta que ésta no sólo depende del acceso a la energía, sino que también está determinada por las características del territorio, el contexto temporal y las condiciones sociotécnicas y socioculturales específicas.

En este sentido, los niveles de ingreso (García Ochoa, 2022; Méndez et al., 2021; Panca & Calatayud, 2021), los precios de la energía y los subsidios (Durán & Condori, 2021; Méndez et al., 2021) son factores importantes, pero también influyen otros elementos, como las condiciones climáticas (García Ochoa, 2022; Santillán et al., 2020), normativas para la calidad de las viviendas y sus instalaciones (García Ochoa, 2022; Hernández, Aguayo y Duque, 2018; Méndez et al., 2021; García Ochoa, Ávila-Ortega y Cravioto, 2022; Panca & Calatayud, 2021), así como la asequibilidad de tecnologías energéticas (Hernández, Aguayo y Duque, 2018; García Ochoa, 2022; García Ochoa, Ávila-Ortega y Cravioto, 2022).

En este contexto, la incertidumbre sobre la capacidad de edificios y sistemas de acondicionamiento para garantizar confort térmico, junto con las limitaciones económicas de gobiernos e individuos, plantea un reto de política pública con impacto en la salud (IEA, 2022). He aquí donde radica la importancia de esta investigación, pues se identifica a la eficiencia energética como una estrategia para proveer, en cierta medida, dichas condiciones de habitabilidad.

En México existe una estructura normativa específica para la eficiencia energética en la edificación, con una serie de Normas Oficiales Mexicanas, (NOM) que regulan diversos aspectos técnicos, como el etiquetado de aparatos de aire acondicionado, electrodomésticos, sistemas de vidrios, y la envolvente térmica de edificaciones. Sin embargo, se destaca que las normativas para la envolvente térmica, específicamente la NOM-008-ENER-2001, Eficiencia Energética En Edificaciones, Envolvente de Edificios No Residenciales y la NOM-020-ENER-2011, Eficiencia Energética En Edificaciones, Envolvente de Edificios Residenciales, establecidas para racionalizar el uso de la energía en sistemas de aire acondicionado que considera un edificio de referencia como base, no han tenido el impacto esperado a pesar de ser obligatorias. Las razones por las que dichas normativas no han impactado lo esperado se atribuye a diversidad de factores, entre ellos aspectos logísticos y técnicos.

Entre los detalles logísticos se destaca que ambas normas no se integran a los reglamentos de construcción locales así como falta de coordinación por los 3 niveles de gobierno, no existe capacidad técnica de profesionales para su implementación, no

se exige de forma obligatoria en programas operados por organismos de crédito y vivienda, o en todo caso, se procuran sólo criterios opcionales y, existe una objeción del sector de la construcción, específicamente porque implica un costo adicional (Rodríguez, 2018; Martín-Domínguez et al., 2018)

Entre los detalles técnicos de la metodología de cálculo se identifica una sobreestimación de la absorción solar de la envolvente del edificio (Martín-Domínguez et al., 2018); la omisión de la capacidad calorífica de los materiales, dado que el modelo de cálculo no considera las variaciones de temperatura ambiental a lo largo del tiempo (Huelsz et al., 2014), lo que conlleva, en esencia, a un sobredimensionamiento del aislamiento. Además, la necesidad de una actualización de datos meteorológicos para responder al fenómeno del cambio climático y, que la norma no proporciona un modelo de confort (Guízar Dena et al., 2021).

La aplicación de normativas de eficiencia energética en las edificaciones de México es ineludible e impostergable, especialmente en las viviendas de las regiones del norte del país, dadas las condiciones críticas de cambio climático, el aumento de la demanda energética y los elevados costos económicos y sociales. Ante dicha urgencia, sería importante maximizar el potencial de las normativas vigentes, donde la aplicación de esta podría generar resultados significativos, especialmente al considerar las particularidades climáticas de esta región.

Este estudio se centra en la aplicación de la metodología de la NOM-020-ENER-2011, Eficiencia Energética En Edificaciones, Envolvente de Edificios Residenciales y el objetivo es identificar combinaciones de estrategias que maximicen el impacto en la evaluación del cumplimiento normativo con la menor inversión económica, que permitan definir beneficios en términos de ahorro por gasto de energía y disminución de emisiones, así como el costo de alcanzar el nivel de cumplimiento, al menos en su nivel mínimo. Además, se consideran los diseños y sistemas constructivos más comunes en la región y, por último, los resultados que pudieran contribuir a orientar políticas públicas mejor adaptadas a los contextos locales.

METODOLOGÍA

En este ejercicio se analizaron localidades ubicadas en un estado de la región norte de México, específicamente Sonora, donde el 95% del territorio estatal es clima cálido y seco (INEGI, 2024) y al 2017, el 71% de los hogares tenían A/C (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía [CONUEE], 2024).

Tabla 1: Localidades incluidas en la NOM-020 para Sonora, tarifa eléctrica correspondiente y clima. Fuente: Elaboración de los Autores, con información de CFE (2024), NOM-020 (2011), INEGI (2024).

Localidad	Latitud	Tarifa	Descripción de la Tarifa	Clima	Escalones de consumo
Hermosillo	29.10N	1F	Servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima en verano de 33°C	Muy seco muy cálido	Primer escalón de 1 a 1,200kWh, segundo escalón de 1,201 a 2500kwh, el resto es excedente.
Obregón	27.49N	1F		Seco muy cálido	
Guaymas	27.92N	1E	Servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima en verano de 32°C	Muy seco muy cálido	Primer escalón de 1 a 300kWh, segundo de 301 a 1200 kWh, tercero de 1201 a 2500 kWh, el resto es excedente.
Navojoa	27.07N	1E		Seco muy cálido	
Nogales	31.31N	1A	Servicio doméstico para localidades con temperatura media mínima en verano de 25°C	Semiseco templado	

Este estudio consideró el análisis de 9 modelos de vivienda en las 4 orientaciones y a la vez en 5 tipos de clima en el Estado, los que dieron un total de 180 modelos analizados. Se realizó una evaluación inicial sin considerar condiciones de eficiencia y, con base en los resultados, se implementaron estrategias para alcanzar el nivel de eficiencia deseado cuantificándose los costos y posibles ahorros.

Para el análisis, se utilizó la NOM-020-ENER-2011. Eficiencia Energética En Edificaciones, Envolvente de Edificios Residenciales (2011) que en adelante llamaremos NOM-020, la que se aplica en las viviendas localizadas en ciudades cuyo suministro de energía eléctrica cuenta con las siguientes tarifas eléctricas: 1C, 1D, 1E y 1F (Resolución de la NOM-020-ENER-2011, 2016).

Estas tarifas las establece la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2024) y se definen según una clasificación de temperatura media mínima en verano; las tarifas van de la 1, 1A y hasta la 1F, y una tarifa de doméstica de alto consumo (DAC). La tarifa 1F es la que corresponde a la temperatura media mínima más alta y aplica al subsidio más alto para la temporada de verano. Los subsidios se estructuran en escalones de consumo y cada uno de estos presenta un incremento en el costo por kWh. Derivado de las altas temperaturas registradas en el 2023, los usuarios de energía eléctrica en el Estado de Sonora registraron consumos por mucho, superiores a los de otras regiones del país, lo que orilló a una condición extraordinaria de reclamo social; en este contexto se elaboró el Convenio de colaboración para apoyo tarifario para el Estado de Sonora (2024), donde se detalla un subsidio mayor que beneficia a todo el Estado, abarca los meses de abril a octubre, considera ajustes en los escalones de consumo, homologan las tarifas 1F y 1E y se mejoran las condiciones para el resto de las tarifas. Ver Tabla 1.

La NOM-020 incluye en sus tablas valores para el cálculo del flujo de calor, a través de la envolvente para

ciudades específicas, y en el caso de Sonora, considera sólo 5 localidades; Hermosillo y Ciudad Obregón que les corresponde tarifa 1F, Guaymas y Navojoa con tarifa 1E, y Nogales con la tarifa 1A, ver Tabla 1. Y, aunque la resolución de la NOM-020 indica que Nogales no es sujeto de la verificación de la norma, se realizará el análisis con el objetivo de ampliar las posibles observaciones.

Algunas de las características representativas del diseño de la vivienda económica en el clima cálido seco, son por lo general únicas en el terreno y se desplantan en uno de los límites de la propiedad lo que provoca que la vivienda no comparta muros, además de no contar con sistemas de aislamiento y, aunque pueden variar en su distribución, se conforman por un área común (estancia, comedor y cocina), una o varias recámaras y baño, además las fachadas no consideran protección solar (Romero Moreno et al., 2020) y la mayor proporción de ventanas están ubicadas en las fachadas principal y posterior. En términos de área de construcción, el 58% de la vivienda en el estado de Sonora está entre los 46 m² y los 150 m² (INEGI, 2020) y referente a los sistemas constructivos más utilizados, el 92% de las viviendas en el estado tienen muros de ladrillo, block, cemento o concreto (INEGI, 2022), particularmente muros de bloque de concreto de 0.12m de espesor (Romero Moreno et al., 2020); finalmente, las losas de techo de concreto o viguetas con bovedilla se presentan en un 72% (INEGI, 2022) donde particularmente predomina losa de vigueta y bovedilla de 0.15m de espesor (Romero Moreno et al., 2020).

Para este análisis, los 9 proyectos de modelos analizados de vivienda, se seleccionaron, y consideraron las características descritas en el párrafo anterior. La información de los proyectos fue proporcionada por diferentes empresas desarrolladoras de vivienda que se mantendrán anónimas. Estos modelos de 1 y 2 niveles van de los 43m² a los 126 m². En la Tabla 2 se detalla la información de cada modelo, que incluye, entre otros datos, la proporción de acristalamiento (%) de las viviendas

que corresponde a la proporción de ventanas respecto al total de superficie de los muros de la envolvente, además, se incluye en la tabla una nomenclatura para identificar a cada modelo en próximas figuras.

El método de cálculo de la NOM-020 estima la ganancia de calor por conducción y radiación del edificio proyectado y la compara con un edificio de referencia; para cumplir con la normativa las ganancias de calor del edificio proyectado debe ser igual o menor a las del edificio de referencia. Los resultados se presentan como porcentaje de ahorro, que resulta de la diferencia de la carga térmica (W) entre el edificio proyectado y el edificio de referencia. Para el cumplimiento se deberá alcanzar, al menos 0% de ahorro o más. Un número negativo representa gasto y no cumplimiento de la norma.

En la Tabla 3, se detallan los sistemas constructivos utilizados en la evaluación inicial. Respecto a la losa de piso, según la NOM-020, la porción de la envolvente que está directamente sobre la tierra se considera una ganancia de calor de cero, por lo tanto, no se incluyó.

Los valores de conductividad de cada material se tomaron de las tablas de anexos disponibles en la NOM-020 (2011) y NMX-C-460 (2009) y los valores que no estaban disponibles en estos listados, se tomaron de la ficha técnica del producto comercial, ver Tabla 3.

Los valores de referencia U establecidos por la normatividad mexicana pueden implicar un nivel elevado de aislamiento térmico. Esto se traduce en la necesidad de utilizar materiales con muy baja conductividad térmica, como los aislantes, para cumplir con los requerimientos. Sin embargo, y según la metodología de la norma, es posible optimizar el comportamiento térmico de la envolvente mediante la adopción de diferentes estrategias constructivas, como el uso de materiales ligeros, nuevas geometrías y soluciones innovadoras. Además, combinar estos enfoques con tecnologías de vidrios eficientes y sistemas de sombreado permite reducir la demanda de aislamiento. Asimismo, es fundamental contar con información más precisa sobre los valores de conductividad térmica de los materiales producidos localmente, lo que facilitaría la adecuación de las soluciones constructivas a las condiciones específicas de la región.

En el primer análisis, los resultados describen el nivel de cumplimiento del estado actual de las viviendas, es decir, sin estrategias adicionales para el cumplimiento de la NOM-020. Los resultados se describen relacionando algunas características del diseño como la proporción de acristalamiento y la orientación, así como el impacto del clima con los resultados de la NOM-020.

En un segundo análisis se aplican estrategias de eficiencia energética que impactan en el cálculo de la NOM. Las estrategias se aplicaron a aquellas viviendas que no

Tabla 2: Características de modelos analizados; 9 modelos en 4 orientaciones en los 5 tipos de clima disponibles en la NOM-020, con un total de 180 modelos. Fuente: Elaboración de los Autores.

Número de niveles	Área de construcción (m2)	Proporción de acristalamiento (%) y sin sombreados	Nomenclatura
1	43.00	12.08	1N_43
1	54.00	9.43	1N_54
1	61.00	9.21	1N_61
1	66.00	8.60	1N_66
1	78.00	5.65	1N_78
2	97.00	6.62	2N_97
2	104.00	8.45	2N_104
2	113.00	8.19	2N_113
2	126.00	7.40	2N_126

Tabla 3: Descripción de los sistemas constructivos y valores utilizados para el cálculo de la evaluación inicial. Fuente: Elaboración de los Autores.

Sistema	Descripción	Conductividad (λ) W/mK	Fuente de los valores de λ	Espesor (m) según proyecto
Muros de block de concreto hueco	Mortero cemento arena	0.17	NMX-460	0.015
	Bloque de concreto con 2 o 3 huecos	1.11	NMX-460	0.120
Losa de vigueta y bovedilla	Concreto armado	1.74	NOM-020	0.040
	Poliestireno expandido de densidad nominal 12 kg/m3 (Bovedilla de poliestireno)	0.04	Ficha técnica de producto comercial	0.090
	Vigueta de concreto armado	1.74	NOM-020	0.090
Ventanas sin sombreado	Aplanado de yeso	0.372	NOM-020	0.01
	Vidrio sencillo, coeficiente de sombra (CS) 1.00	0.93	NOM-020	0.006

Tabla 4: Descripción de los sistemas constructivos y valores utilizados para el cálculo de la evaluación con estrategias de mejora. Fuente: Elaboración de los Autores.

Sistema Mejorado	Descripción	Conductividad (λ) W/mK	Fuente de los valores de λ	Espesor (m) según proyecto
Muros de block de concreto hueco	Mortero cemento arena (en el exterior)	0.17	NMX-460	0.015
	Poliestireno expandido de densidad nominal 12 kg/m ³ (Placa exterior)	0.04	Ficha técnica de producto comercial	0.025
	Bloque de concreto con 2 o 3 huecos	1.11	NMX-460	0.120
	Mortero cemento arena (en el interior)	0.17	NMX-460	0.015
Losa de vigueta y bovedilla	Concreto armado (capa de compresión)	1.74	NOM-020	0.040
	Poliestireno expandido de densidad nominal 12 kg/m ³ (Bovedilla de poliestireno)	0.04	Ficha técnica de producto comercial	0.090
	Concreto armado (Vigueta)	1.74	NOM-020	0.090
	Aplanado de yeso (interior)	0.372	NOM-020	0.01
Ventana sencilla con película	Vidrio sencillo con película de control solar con un coeficiente de sombra (CS) 0.40	0.93	NOM-020	0.006

cumplieron en el primer análisis. La intención fue lograr cumplir con la NOM-020, al menos en su nivel mínimo. Los criterios para la selección de las estrategias consideran no modificar el diseño original, han de ser materiales comunes disponibles del mercado y deberán representar el menor costo posible. Para determinar dichos costos se realizó un análisis de precios unitarios que consideraron material, mano de obra y equipo con costos vigentes al 2024, además, se determinó un costo directo total de la vivienda mediante un análisis paramétrico de las partidas del proyecto y el costo estimado por m² de la vivienda económica en el 2024; con esta información se estimó el sobre costo económico del cumplimiento de la norma.

Las estrategias utilizadas se detallan a continuación:

- Sombreado horizontal de ventanas; todos los casos donde el proyecto no se cumplió con la normativa, se implementó el sombreado horizontal de ventanas como primera estrategia. El criterio para definir la longitud del elemento fue considerar la latitud de la ciudad como lo indica la tabla 1; se consideró también un período de sobrecalentamiento que abarca de mayo a octubre según las bases de datos climatológicas disponibles, así como la dimensión vertical de la ventana. Lo que resulta en un sistema de sombreado ideal, que protege de la radiación en los períodos críticos, pero también permite el calentamiento durante épocas más frías.

Si no se llega al cumplimiento de la norma con los sistemas de sombreado, se adiciona aislamiento en muros o mejoramiento de la calidad de las ventanas.

- Aislamiento en uno o dos muros con 0.025m de poliestireno expandido en el exterior. El criterio de la definición del muro a aislar fue la siguiente: si la fachada principal es norte o sur, se aisló el muro oeste. Si la fachada principal es este u oeste, se aisló muro sur.

En algunos casos se requirió asilar un segundo muro, adicionando el sur u oeste según corresponda. En la Tabla 4 se muestra la configuración de los sistemas constructivos mejorados.

- Mejora de ventanas. la estrategia consiste en mejorar las ventanas con alguna de las siguientes dos opciones: Si la vivienda mide menos de 100 m² se utiliza una película de control solar con al menos un valor de 0.4 del coeficiente de sombreado (CS) o, si la vivienda mide más de 100 m², se incluye un sistema de doble vidrio con película Low-E Doble y coeficiente de sombra (CS) 0.64. El criterio para una u otra opción depende del costo de la estrategia vs el costo de la vivienda, con la intención de no incidir excesivamente en el costo final. En la Tabla 4 se muestra la configuración de los sistemas constructivos mejorados.

En los casos críticos se utilizó el aislamiento en muros como la mejora de la calidad de ventanas. Un caso crítico se refiere a aquellos modelos que requieren todas las estrategias juntas para alcanzar el nivel mínimo de la norma.

Para calcular los consumos de energía en kWh, se tomaron los resultados de la carga térmica y se consideró el uso del A/C de abril a octubre correspondiente al período de subsidio definido en el Convenio de colaboración para apoyo tarifario para Sonora, (2024) y, un uso de 11 horas diarias que corresponde al promedio diario de A/C en la vivienda en el estado (INEGI, 2018).

Para definir el costo de la energía se consideró el consumo calculado por A/C más la proporción de consumo eléctrico por otros dispositivos descritos en la introducción, además del esquema tarifario vigente con subsidio según el Convenio de colaboración para apoyo tarifario para el Estado de Sonora, (2024)

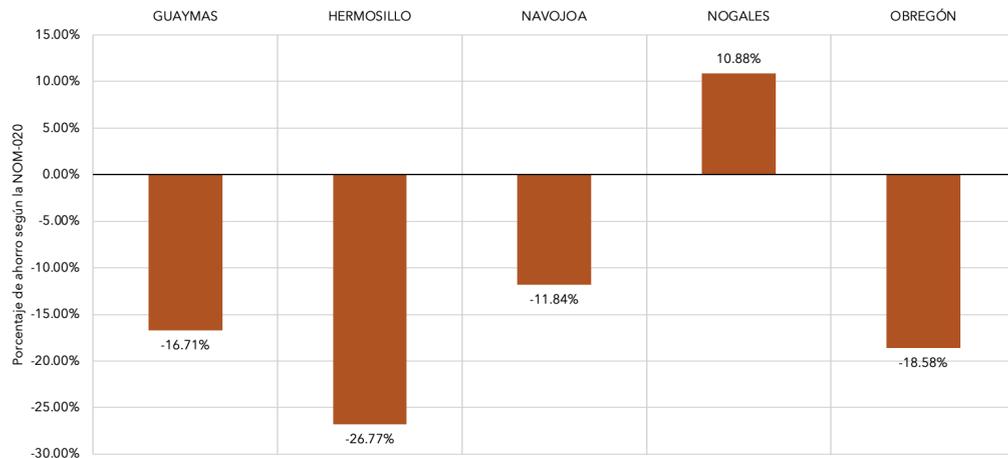


Figura 2. Promedio de ahorro de todos los modelos por ciudad en todas sus orientaciones según la NOM-020, sin estrategias de eficiencia energética. Fuente: Elaboración de los Autores.

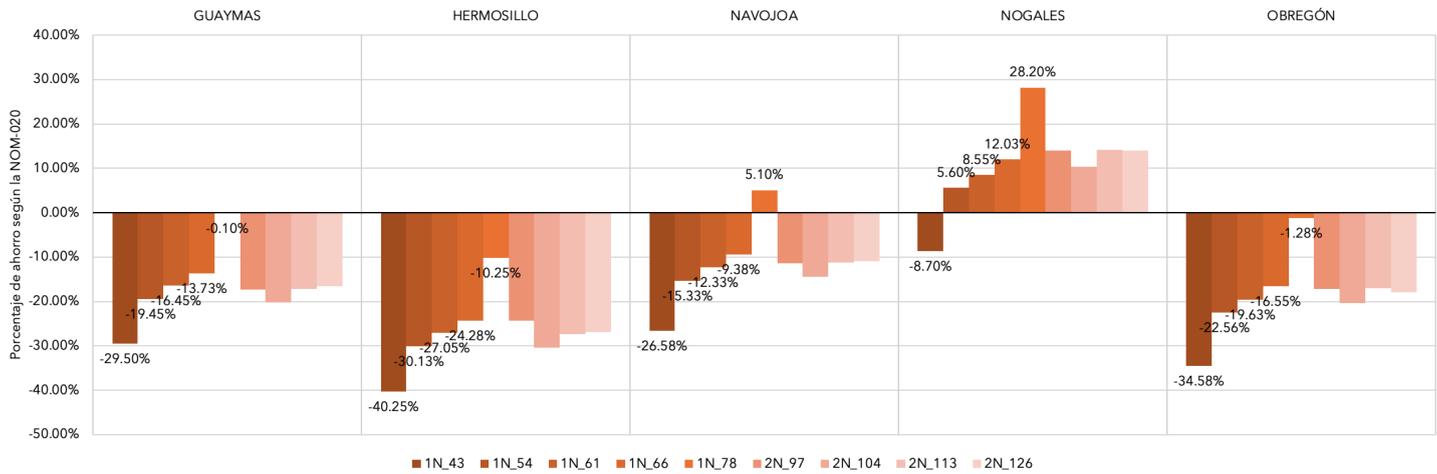


Figura 3. Promedio de ahorro por cada modelo en todas sus orientaciones por ciudad según la NOM-020, sin estrategias de eficiencia energética. Fuente: Elaboración de los Autores.

Finalmente, se hace un estimado del ahorro potencial en emisiones de CO₂e en que se considera el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional que representa el cálculo de las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero (GEI) por consumo de electricidad correspondiente al año 2023 (SEMARNAT, 2024a).

RESULTADOS

PRIMER ANÁLISIS

En la Figura 2, se observa el promedio de ahorro de todos los modelos analizados en 4 orientaciones por cada ciudad, sin considerar ningún tipo de estrategia de eficiencia energética. Los modelos que presentan mayor gasto o que están más lejos de cumplir con la NOM-020 son los localizados en Hermosillo con -26.77%, seguido de Obregón, Guaymas y Navojoa con -18.58%, -16.71%

y -11.84% respectivamente. En el caso de Nogales, el promedio de los modelos cumple con la NOM-020 con un nivel de ahorro promedio de 10.88%.

En la Figura 3 se presenta el promedio de ahorro por modelo en sus 4 orientaciones por ciudad, lo que evidencia el impacto de las variaciones particulares de diseño de cada modelo. En Guaymas, Hermosillo y Obregón todos los porcentajes son negativos y el modelo de menor ahorro es el 1N_46 que corresponde al de menor cantidad de m² y mayor porcentaje de acristalamiento, el que llega hasta el -40.25% de ahorro en Hermosillo. En Nogales todos los modelos en promedio tienen un porcentaje positivo, pero el modelo 1N_46 sigue siendo negativo con -8.70%. En Navojoa todos los modelos presentan en promedio ahorros negativos a excepción del 1N_78 con un 5.10%, de hecho, en todas las localidades, este modelo es el mejor evaluado, ya sea con un porcentaje negativo más cercano a cero, o bien, con un porcentaje de ahorro de hasta el 28.20% en Nogales.

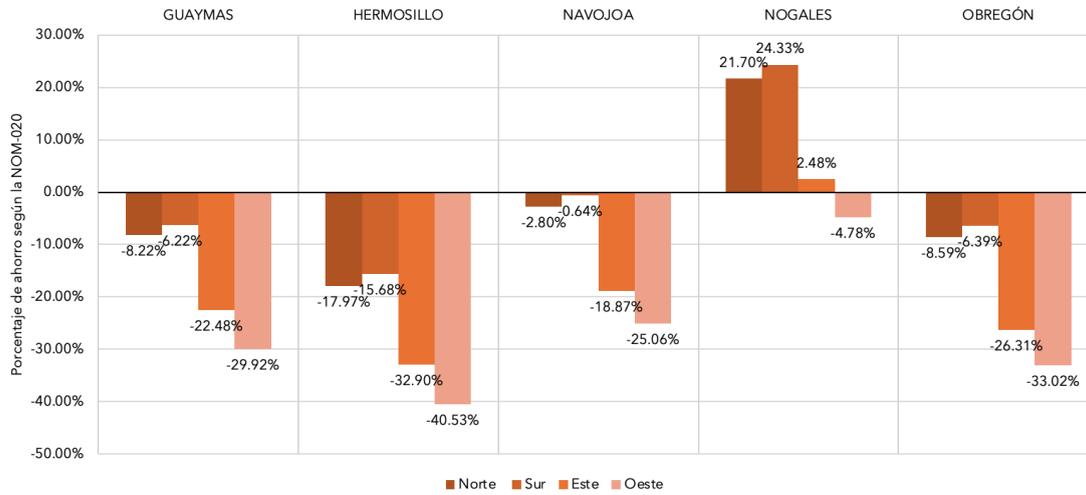


Figura 4. Promedio de ahorro de todos los modelos por orientación por ciudad según la NOM-020, sin estrategias de eficiencia energética. Fuente: Elaboración de los Autores.

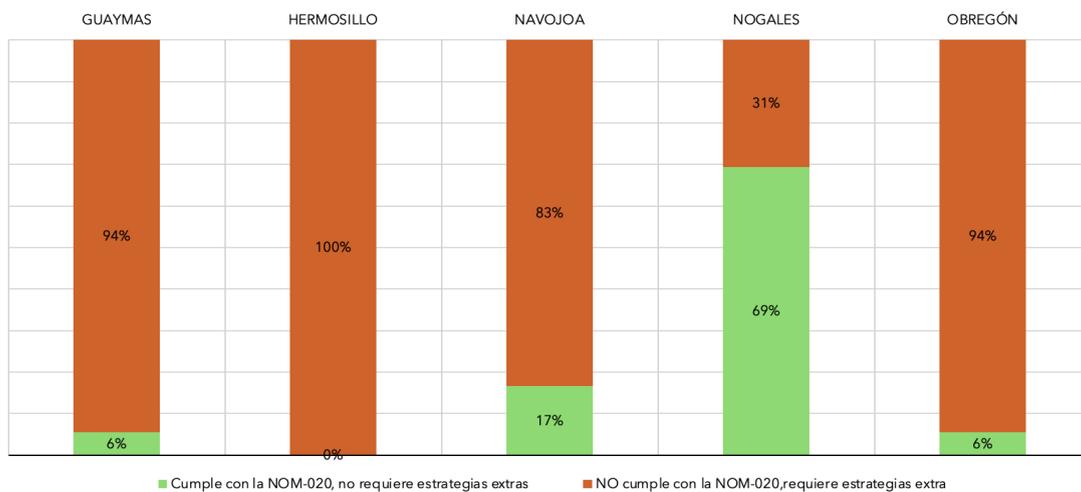


Figura 5. Porcentaje de casos por ciudad que requieren de estrategias adicionales para cumplir con la NOM-020. Fuente: Elaboración de los Autores.

En la Figura 4, se muestran los promedios de ahorro de todos los modelos analizados por orientación por ciudad, lo que nos permite visualizar el impacto que tiene la orientación en cualquier modelo. Las orientaciones más desfavorables son evidentemente este y oeste con valores negativos en casi todas las ciudades, lo que alcanza hasta un -40.53% en orientación oeste en Hermosillo. Las orientaciones norte y sur también son negativas en casi todas las ciudades, pero más cerca del ahorro que las anteriores. La excepción es Nogales con valores positivos en norte, sur y este, manteniéndose negativa la orientación oeste con un -4.78%.

Finalmente, en la Figura 5 se presenta el porcentaje de casos que requerirían de estrategias de eficiencia energética por ciudad. Es decir, de todos los modelos analizados en Guaymas, Navojoa y Obregón, el 94%, 83% y 94% respectivamente necesitan de estrategias de

eficiencia energética para el cumplimiento de la NOM-020; mientras que en Hermosillo el 100% de las viviendas lo requieren y en Nogales solo el 31%.

SEGUNDO ANÁLISIS

La Figura 6 muestra el promedio de ahorro de todos los modelos en 4 orientaciones por ciudad, con y sin estrategias. El impacto más grande fue en la ciudad de Hermosillo, donde el porcentaje promedio de ahorro pasó de -26.77% a 6.39% con 33.16 puntos porcentuales, seguido de Obregón con una diferencia de 25.29, Guaymas con 21.5 y Navojoa con 18.78 puntos porcentuales y, finalmente Nogales, que, aunque el promedio de ahorro era positivo con el 10.88%, aumentó al 17.39% de ahorro, lo que representa 6.51 puntos porcentuales.

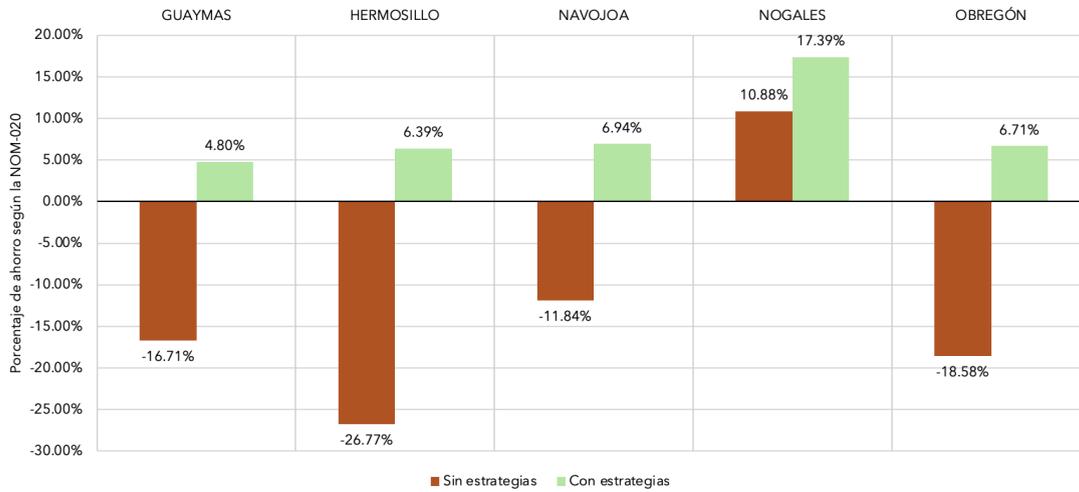


Figura 6. Comparación del promedio de ahorro de los modelos por ciudad según la NOM-020, con y sin estrategias de eficiencia energética. Fuente: Elaboración de los Autores.

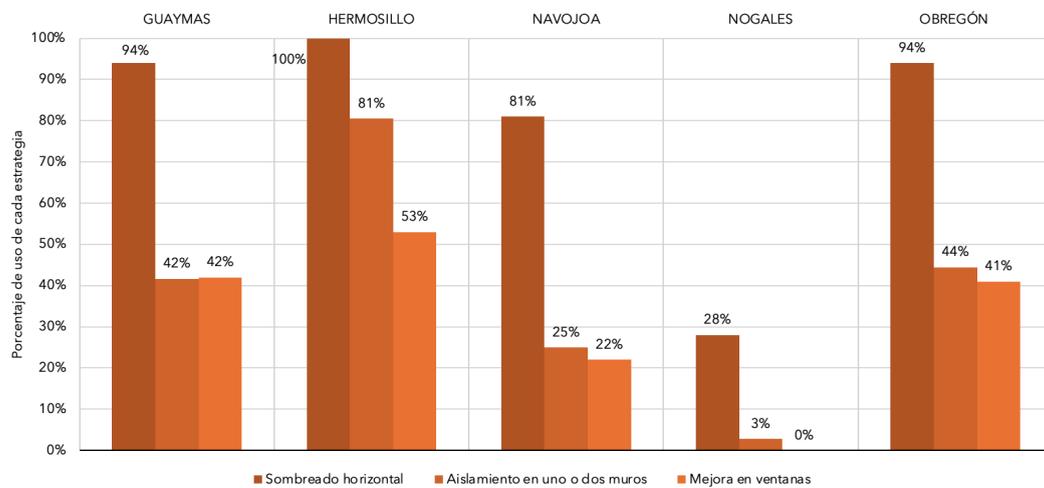


Figura 7: Porcentaje de uso estrategias implementadas para cumplir con la NOM-020 por ciudad. Fuente: Elaboración de los Autores.

Para lograr el cumplimiento de la NOM-020 con los niveles de ahorro graficados en la Figura 6, en la Figura 7 se muestra el porcentaje de uso de cada estrategia utilizada por ciudad. Es decir, el porcentaje de cada estrategia representa la proporción de veces que se utilizó la estrategia en particular, relativo al número de modelos analizados. Para cumplir con la NOM-020, en Hermosillo al 100% de las viviendas se les colocó sombreado horizontal, el 81% requirió aislamiento en al menos un muro y el 53% de los modelos se les mejoró la calidad de la ventana ya sea con película o ventana de doble vidrio. Obregón y Guaymas son muy similares, donde alrededor del 94% se le incluyó sombreado, y alrededor del 40% de los modelos requirió aislamiento y o mejora en ventanas. En el caso de Navojoa, el 81% requirió sombreado, mientras que sólo alrededor del 20% de los modelos requirió de aislamiento en muros y o mejora de ventanas.

Finalmente, en Nogales la estrategia de sombreado se aplicó al 28%, sólo el 3% requirió de aislamiento y no se utilizó la estrategia de mejorar ventanas.

COSTO DE IMPLEMENTACION DE LAS ESTRATEGIAS PARA EL CUMPLIMIENTO DE LA NOM-020

La implementación de las estrategias antes descritas generó el aumento de los costos directos de la vivienda según se muestran en la Figura 8. Hermosillo es la ciudad con el mayor sobrecosto para lograr el cumplimiento de la NOM-020, con un 2.95% en promedio, seguido de Obregón y Guaymas con sobrecostos promedio similares de 2.23% y 2.17% respectivamente, en Navojoa el sobrecosto promedio representa el 1.61% y finalmente en Nogales el 0.68% de sobrecosto promedio.

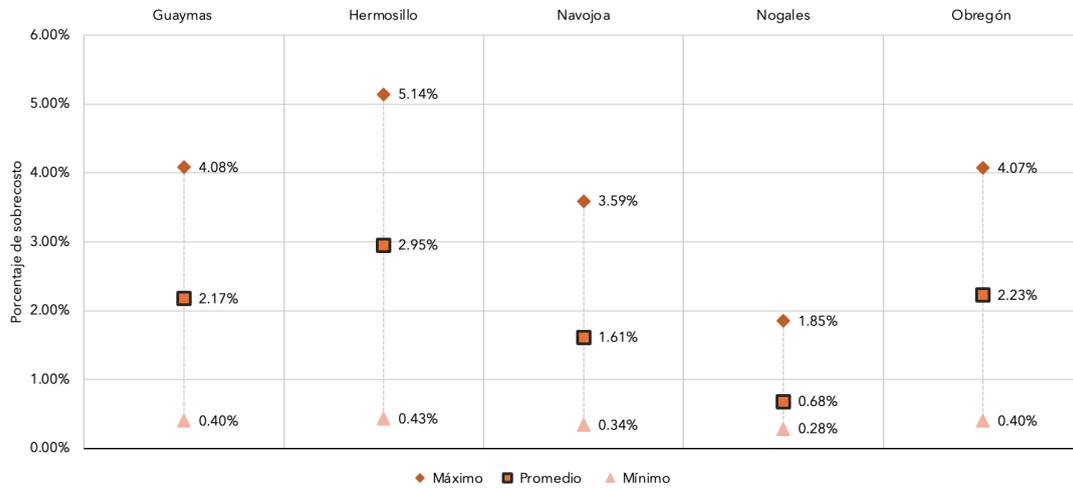


Figura 8: Sobrecostos por implementación de estrategias para cumplimiento de la NOM-020 por ciudad. Fuente: Elaboración de los Autores.

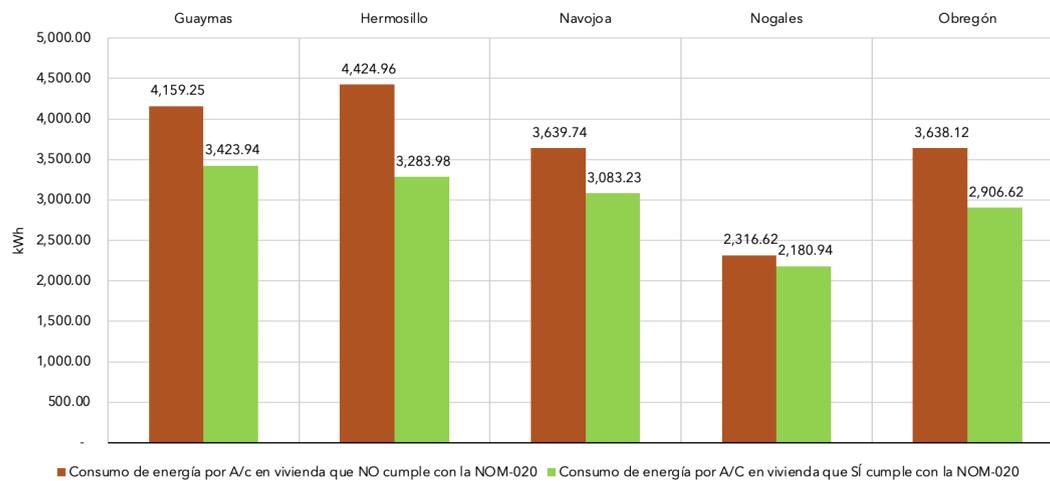


Figura 9: Promedio estimado de consumo de energía por A/C en kWh de todos los modelos por ciudad que no cumplen con la NOM-020 contra los consumos de energía estimados los que sí cumplen con la NOM-020. Fuente: Elaboración de los Autores.

ESTIMACIÓN DE AHORROS

De la diferencia del primer y segundo análisis se generan las estimaciones de los posibles ahorros en consumo y costos por energía eléctrica, así como reducciones de los GEI en CO₂e.

En la Figura 9, se presenta el promedio estimado de consumo de energía en kWh de todas las viviendas por ciudad que no cumple con la NOM-020 contra los consumos de energía estimados de la vivienda que sí cumple con la NOM-020. Estos valores de consumo corresponden al período de los meses de abril a octubre y con un uso promedio del A/C de 11 horas diarias (INEGI, 2018). El cálculo se limita sólo al consumo por el uso de A/C, es decir, no considera el consumo de energía por otros dispositivos. El impacto mayor es en Hermosillo con un 25.43%

de disminución de consumo de energía, seguido por Obregón y Guaymas con 20.22% y 17.53% respectivamente; el caso con menor impacto es Nogales con el 6.04%.

En la Figura 10, se presenta la estimación del gasto total por consumo de energía de la vivienda que no cumple con la NOM-020 contra el gasto total de la vivienda que sí cumple con la NOM-020. Para el cálculo se estimó que el uso de aire acondicionado, cómo se describió en la introducción, representa el 60% del consumo total de energía. Los cálculos contemplan el subsidio conforme al esquema tarifario vigente de la CFE (Convenio de Colaboración Para Apoyo Tarifario Para El Estado de Sonora, 2024) y corresponden al gasto acumulado durante la temporada de abril a octubre. Según los resultados, en Hermosillo se destinarían en promedio \$20,168.95

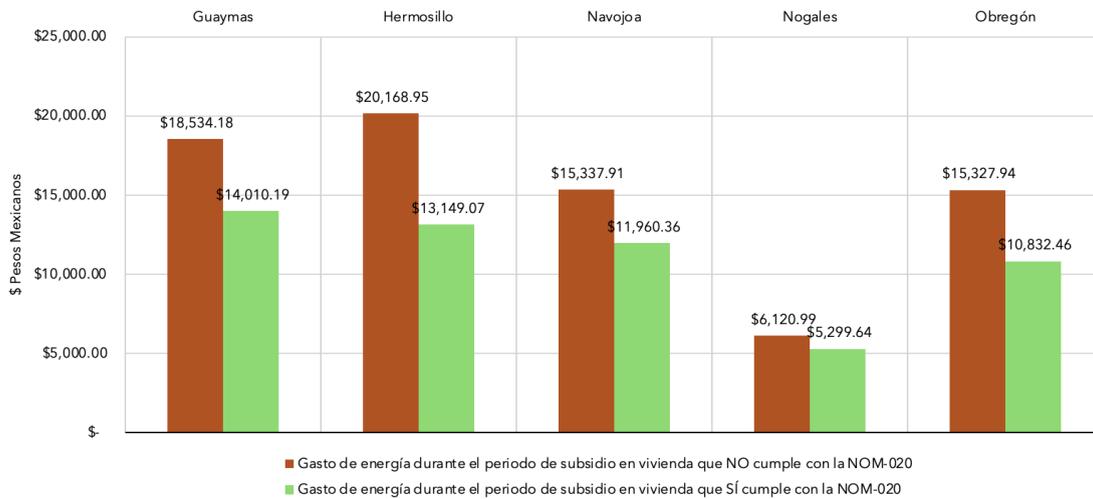


Figura 10: Promedio estimado de gasto en energía de abril a octubre en \$ pesos mexicanos de todas las viviendas por ciudad que no cumple con la NOM-020 contra el gasto en energía de la vivienda que sí cumple con la NOM-020. 19.80 \$ MEX/dólar para agosto de 2024. Fuente: Elaboración de los Autores.

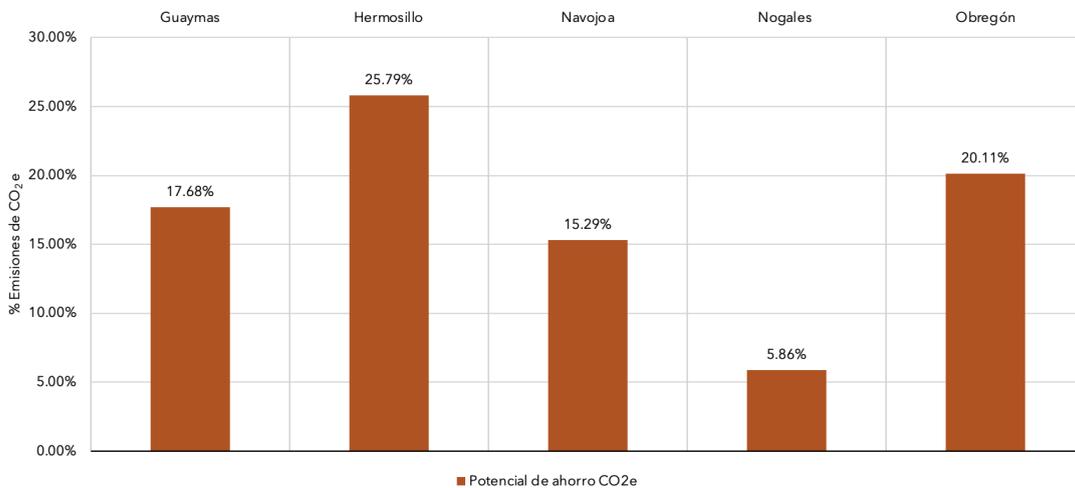


Figura 11. Potencial ahorro de CO2e por temporada de A/C de la vivienda que cumple con la NOM-020 por ciudad. Fuente: Elaboración de los Autores.

pesos mexicanos por la temporada subsidiada en la vivienda que no cumple, contra \$13,149.07 pesos mexicanos en la vivienda que sí cumple con la NOM-020 que representa un 35.32% de ahorro. En Obregón el ahorro promedio fue de 30.95%, Guaymas del 25.10%, Navojoa del 24.27% y Nogales del 15.80%. Vale la pena subrayar que el porcentaje de subsidio pudiera alcanzar hasta el 75% si se compara con la tarifa regular y que ese porcentaje varía porque depende del nivel de consumo.

Finalmente, en la Figura 11 se presenta el potencial de ahorro estimado de CO₂e de la vivienda que cumple con la NOM-020 por la temporada de uso de A/C con los siguientes valores: Hermosillo 25.79%, Guaymas 17.68%, Navojoa 15.29%, Nogales 5.86% y con Obregón 20.11%.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este estudio analiza modelos de viviendas ubicadas en un contexto específico, que considera condiciones climáticas particulares, características constructivas propias de la región y un esquema tarifario de energía particular. Estos factores varían considerablemente entre regiones y, en consecuencia, la pobreza energética depende no sólo de la disponibilidad y el costo de la energía, sino también de las limitaciones estructurales y culturales que condicionan su uso eficiente y seguro en cada contexto.

Este estudio consideró viviendas de 43, 54, 61, 66, 78, 97, 104, 113 y 126 m², con el objetivo de abarcar una variedad de áreas según los datos del INEGI, (2020) y, toma como línea base la losa de vigueta y bovedilla, dada su predominancia en la región (Romero Moreno

et al., 2020). Además, el estudio prioriza estrategias de sombreado, limita el aislamiento a 1 o 2 muros a un máximo de 1 pulgada y utiliza precios de construcción actualizados. Estas características, junto con el esquema tarifario especial para el Estado, representan las principales diferencias respecto al análisis realizado por la CONUEE, (2017), sin hallarse otro estudio comparable.

En este estudio se argumenta que, aunque se ha documentado que la normatividad vigente requiere de mejoras significativas en la metodología de cálculo, de aplicarse el día de hoy al menos en su nivel mínimo se obtendrían beneficios y que es posible alcanzar el rango de eficiencia energética especificado en la norma mediante la combinación de diversas estrategias.

Dado que se utilizaron los mismos modelos para todas las ciudades analizadas, en la Figura 2 se muestra el impacto del clima en el nivel de eficiencia de acuerdo con el método de cálculo, donde Hermosillo es el caso más crítico. El caso de Nogales sugiere que, en promedio, las viviendas en su estado inicial sí cumplen con el nivel de eficiencia; este cumplimiento correspondería sólo a la eficiencia por aire acondicionado, pero, no hay forma de evaluar las condiciones de eficiencia en el período con temperaturas bajas. En la Figura 3, el modelo 1N_43 corresponde al de menor área y mayor porcentaje de acristalamiento siendo el peor evaluado en todas las ciudades incluso en Nogales con porcentajes negativos. Aunque la NOM-020 no aplicaría en Nogales según la resolución de la NOM-020, (2016), el caso del modelo 1N_43 ejemplifica que existe un segmento de viviendas que requeriría estrategias de eficiencia también para verano, especialmente aquellas más vulnerables.

Por el otro lado, en la misma Figura 3, el modelo 1N_97 es el de mejor evaluación dado que cumple en Navojoa y Nogales y en el resto de las ciudades, aunque presenta un valor negativo, los valores son más cercanos al cero. Lo que se observa de lo anterior es que este modelo es el que corresponde al de menor proporción de acristalamiento, ver Tabla 2.

Cuando se trata de orientación y, como era de esperarse, las viviendas que orientan su fachada principal al este u oeste son las más críticas, pero se observa un cambio significativo cuando los mismos modelos se orientan al norte o al sur; por ejemplo, en Hermosillo, los modelos orientados con la fachada principal al oeste tienen un -40.53% en promedio, pero los mismos modelos orientados al sur logran un promedio de -15.68, obteniendo una diferencia de 24.85 puntos porcentuales, ver Figura 4. Cabe aclarar que algunos de los modelos analizados tenían más proporción de ventanas en la fachada posterior, por consiguiente, cuando se evalúan las viviendas en orientación sur para fachada principal, obtienen mejor evaluación que la

norte. Por lo tanto, una estrategia muy importante para cumplir con la normatividad sería modificar diseños para disminuir al máximo las superficies transparentes en las orientaciones desfavorables, independientemente donde se coloque la fachada principal.

Para Nogales, y como ya se había mencionado, la NOM-020 no sería obligatoria, pero aun así el 31% de las viviendas que se analizaron requirieron de mejoras (Figura 5), donde la mayoría de los casos se solventó con sistemas de sombreado y en muy pocos casos se utilizó aislamiento en muros (Figura 7) lo que representó un sobre costo promedio de 0.68% (Figura 8).

En el caso de Navojoa, el 83% de los modelos analizados requirió de estrategias (Figura 5) donde la mayoría de los casos se solventó con sistemas de sombreado y alrededor del 20% requeriría aislamiento y mejora de ventanas (Figura 7) lo que expresa un sobre costo promedio de 1.61% (Figura 8).

Guaymas y Obregón requirieron mejoras en el 94% de los casos evaluados (Figura 5), las estrategias para lograrlo incluyen sombreados en todos los modelos mejorados y, alrededor del 40% de los casos requirió aislamiento en uno o dos muros y mejorar las características de las ventanas (Figura 7) lo que representaría en promedio un sobre costo de alrededor del 2% por vivienda (Figura 8).

Finalmente, el caso más crítico es Hermosillo, donde todos los modelos evaluados requirieron de estrategias; al 100% se les aplicó sombreado, el 81% de los casos requirió de aislamiento ya sea en uno o en dos muros y, el 53% de los casos requirió mejora de ventanas. Esta ciudad representa el sobre costo promedio más grande con el 2.95%, pero también representa el de mayor ahorro en consumo y gasto de energía (Figura 10 y Figura 11). Habría que considerar, además, que Hermosillo es la ciudad más poblada del estado de Sonora, por lo que el ahorro de energía al aplicar la norma tendría potencialmente más impacto que en otras ciudades.

Es importante destacar el impacto del esquema tarifario en el gasto energético, ya que el subsidio puede cubrir hasta el 75% del total de la factura, dependiendo del nivel de consumo donde el costo del kWh excedente puede ser hasta cinco veces mayor que el del primer nivel. Aunque esta medida no es sostenible a largo plazo para el erario ni para el medio ambiente, resulta efectiva y beneficia a una gran parte de la población. Sin este apoyo gubernamental, los costos estimados de energía serían inasequibles para la mayoría de los hogares. En ausencia de eficiencia energética en las viviendas, los subsidios energéticos han funcionado como una solución temporal para aliviar esta carga económica.

CONCLUSIONES

Cumplir con el nivel mínimo de la NOM-020 en el Estado de Sonora representaría en promedio un sobre costo del 1.93% en la construcción, beneficiándose con un potencial de ahorro económico del 26% por energía eléctrica por temporada de abril a octubre y, una disminución del 16.95% en emisiones de CO₂e. Lo anterior se logró sin necesidad de cambiar los sistemas constructivos comúnmente utilizados en la vivienda de la región o empleándose aislamiento excesivo, además de que se dio prioridad a los sistemas de sombreado y el aislamiento se limitó a 1 pulgada en un muro, máximo 2 muros.

Los casos más críticos corresponden a viviendas con menor superficie construida, debido a que el porcentaje de acristalamiento resulta mayor e impacta de forma considerable en el cálculo, especialmente si las ventanas están colocadas en orientaciones críticas sobre todo en climas extremos, como el de Hermosillo. Por otro lado, se identificaron modelos que requerían mejoras adicionales en climas menos cálidos como el caso de Nogales, aunque éstas podrían haberse evitado si desde la etapa de diseño se hubiera considerado una orientación y protección de ventanas adecuado para la temporada caliente. En ningún caso se sabe cómo es la eficiencia de la envolvente durante la temporada fría. Implementar estrategias de eficiencia para "corregir" estos modelos impacta considerablemente el costo de la vivienda por la relación del costo de inversión versus el costo de la vivienda.

Además, con los datos analizados se plantean las siguientes configuraciones apropiadas para cada localidad analizada:

- Para Nogales, el sombreado de ventanas durante la temporada más caliente puede ser eficaz para cumplir con la normativa, así como evitar las ventanas en orientación oeste, o en su caso, colocar las ventanas más pequeñas en dicha orientación.
- Para Navojoa, además de la estrategia de sombreado en la temporada más caliente, es importante evitar ventanas en orientaciones este y oeste, o en su caso, colocar las ventanas más pequeñas en dichas orientaciones y, la estrategia de aislamiento en muros se requiere en algunos casos.
- Para Guaymas y Obregón, además de la estrategia de sombreado en la temporada más caliente, es relevante el aislamiento en uno o dos muros y o la mejora en la calidad de ventanas, dependiendo del diseño específico de la vivienda. Es importante evitar, en la medida de lo posible, las ventanas este y oeste, o en su caso, las más pequeñas en dicha orientación.
- Finalmente, para el caso de Hermosillo, es esencial la estrategia de sombreado en la temporada más caliente, la gran mayoría de los casos requiere aislamiento en uno o dos muros y la mejora en la

calidad de ventanas tiene un impacto considerable dependiendo del diseño específico de la vivienda. Es muy importante evitar, en la medida de lo posible, las ventanas este y oeste, pero particularmente en el oeste.

Se sabe que la habitabilidad de los espacios se garantiza mediante un marco normativo que integra reglamentos de construcción y normas de eficiencia energética alineados en sus objetivos y adaptados al contexto específico, exigiendo a desarrolladores y constructores el cumplimiento de estándares mínimos de calidad, accesibilidad y sustentabilidad en un contexto de cambio climático; pero en la realidad no es así. En este sentido, sería recomendable que los municipios incluyeran en los reglamentos de construcción una serie de buenas prácticas para el diseño local que considera las condiciones de temperatura específicos, proporciones de acristalamiento mínimo y máximo por orientación sin dejar de lado el tema de ventilación e iluminación natural. Además, se podría también establecer en los reglamentos que los sistemas constructivos base aquí analizados, o similares, se consideren como un nivel mínimo de características constructivas en la edificación para vivienda urbana.

Si bien es necesario mejorar el método de cálculo vigente de la NOM-020, así como considerar las capacidades de implementación del municipio y de los profesionales de la arquitectura y construcción, es fundamental que su aplicación inicie de inmediato. Aplicar la normativa vigente representa una oportunidad para mejorar las condiciones de habitabilidad comparada con las actuales, y mientras tanto, continuar el trabajo en el perfeccionamiento de la normativa vigente.

En investigaciones futuras, sería fundamental desarrollar proyectos más precisos sobre los valores de conductividad térmica de los materiales producidos localmente, para facilitar la adecuación de las soluciones constructivas a las condiciones específicas de la región. Asimismo, dado que el esquema tarifario se basa en niveles de consumo, sería relevante desarrollar estrategias innovadoras que permitan a los usuarios monitorear y gestionar su consumo de manera que maximicen los beneficios de esta estructura tarifaria.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, C.M.G.B., A.C.B.A., J.M.O.de la T., I.M.L.; Curación de datos, C.M.G.B.; Análisis formal, C.M.G.B., A.C.B.A., J.M.O.de la T., I.M.L.; Adquisición de financiación, J.M.O.de la T.; Investigación, C.M.G.B.; Metodología, C.M.G.B., A.C.B.A., J.M.O.de la T., I.M.L.; Administración de proyecto, J.M.O.de la T.; Software, C.M.G.B.; Supervisión, A.C.B.A., J.M.O.de la T., I.M.L;

Validación, C.M.G.B.; Visualización, C.M.G.B.; Escritura – borrador original, C.M.G.B.; Escritura – revisión y edición, Cecilia María C.M.G.B., A.C.B.A., J.M.O.de la T., I.M.L.

AGRADECIMIENTOS

Artículo derivado del Proyecto financiado por la Universidad de Sonora clave USO318009160 “Beneficios del cumplimiento de la NOM-020-ENER-2011 en clima cálido seco”

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Comisión Federal de Electricidad (CFE). (1 de Agosto de 2024). *Esquema tarifario vigente*. <https://App.Cfe.Mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Casa.AspX>
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2017). *Costos y beneficios de la Norma Oficial Mexicana para envolvente de edificaciones residenciales (NOM-020-ENER)*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/234755/Impacto_NOM-020-junio-2017-FINAL.pdf
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2024, August 1). *Porcentaje de hogares con aire acondicionado*. Indicadores estatales de eficiencia energética. <https://www.biee-conuee.net/datamapper/indicadores-para-todos-los-estados/#tasa-equipamiento-aire-acondicionado.html>
- Contreras, M., Serrano-Medrano, M., y Masera, O. (2022). *Patrones de consumo energético en el sector residencial de México: un análisis desde la perspectiva de usos finales*. Taller hojarasca. https://conahcyt.mx/wp-content/uploads/pronaces/micrositios/energia_y_cambio_climatico/energia/cuadernos_tematicos/Cuaderno_Tematico_I_Pronaces_ECC_ISBN_final.pdf
- Convenio de Colaboración Para Apoyo Tarifario Para El Estado de Sonora (2024). http://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2023/12/asun_4672056_20231204_1701195008.pdf
- Durán, R. J., y Condori, M. A. (2021). Alcance de la Tarifa Social sobre los hogares en situación de pobreza energética de la Argentina urbana en el periodo 2016–2018. *Estudios Socioterritoriales, Revista de Geografía*, 29(075), 1–28. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/170441>
- García Ochoa, R. (Coord.). (2022). *Pobreza energética. Visiones de América Latina*. El Colegio de la Frontera Norte y El Colegio de Michoacán. <https://libreria.colef.mx/detalle.aspx?id=7919>
- García Ochoa, R. G., Avila-Ortega, D. I., & Cravioto, J. (2022). Energy services' access deprivation in Mexico: A geographic, climatic and social perspective. *Energy Policy*, 164, 112822. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112822>
- Guízar Dena, A. J., Pascual, M. Á., y Fernández Bandera, C. (2021). Building Energy Model for Mexican Energy Standard Verification Using Physics-Based Open Studio SGSAVE Software Simulation. *Sustainability*, 13(3), 1521. <https://doi.org/10.3390/su13031521>
- Hernández, M. F., Aguayo, L.F., y Duque, H. (2018). Índice de pobreza energética multidimensional por regiones para Colombia. *Economía Coyuntural*, 3(3), 35–72. http://www.scielo.org/bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2415-06222018000300003&nrm=iso
- Huelsz, G., Barrios, G., y Rojas, J. (2014). Differences on Results from Steady-state and Time-dependent Wall/roof Heat Transfer Models in Mexican Climates. *Energy Procedia*, 57, 1825–1833. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.046>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2022). *Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático*. Proyecciones de Cambio Climático y Fichas Climáticas Por Estado y Municipios Más Vulnerables . <https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). *Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI)*. <https://www.Inegi.Org.Mx/Programas/Encevi/2018/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Encuesta Nacional de Vivienda. ENVI 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/envi/2020/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). *Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares. ENIGH 2022*. <https://www.inegi.org.mx/programas/enigh/nc/2022/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024, August 1). *Geografía y Medio Ambiente. Climatología*. <https://www.Inegi.Org.Mx/Temas/Climatologia/#mapas>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- International Energy Agency (IEA). (2022). *World Energy Outlook 2022*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- International Energy Agency (IEA). (2023). *World Energy Outlook 2023*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- López-Díaz, F., Nava Assad, Y. S., Rojas Barajas, M., y González Terrazas, D. I. (2022). Guía de Escenarios de Cambio Climático para Tomadores de Decisiones. Instituto Nacional de Ecología al Cambio Climático (INECC). <http://140.84.163.2:8080/xmlui/handle/publicaciones/395>
- Martin-Dominguez, I. R., Rodriguez-Muñoz, N. A., Romero-Perez, C. K., Najera-Trejo, M., y Ortega-Avila, N. (2018). Analysis of the Methodologic Assumptions of the NOM-020-ENER-2011—Mexican Residential Building Standard. *Environments*, 5(11), 118. <https://doi.org/10.3390/environments5110118>

Méndez, F. M., Rosa, P. C., & Castelao Caruana, M. E. (2021). Pobreza energética en la Argentina actual. Revisiones y aportes metodológicos para su medición cuantitativa y cualitativa. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 32(62). <https://doi.org/10.33255/3262/748>

NMX-C-460-ONNCCE-2009, Pub. L. No. NMX-C-460-ONNCCE-2009, Diario Oficial de la Federación (2009). https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5145106&fecha=03/06/2010#gsc.tab=0

NOM-008-ENER-2001. Eficiencia Energética En Edificaciones, Envolvente de Edificios No Residenciales., Pub. L. No. NOM-008-ENER-2001, Diario Oficial de la Federación (DOF) (2001). https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=767644&fecha=25/04/2001#gsc.tab=0

NOM-020-ENER-2011. Eficiencia Energética En Edificaciones, Envolvente de Edificios Residenciales., Pub. L. No. NOM-020-ENER-2011, Diario Oficial de la Federación (DOF) (2011). https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5203931&fecha=09/08/2011#gsc.tab=0

Panca, C.-O., y Calatayud, A.-P. (2021). Determinantes socioeconómicos y transición de la pobreza energética de los hogares en la sierra rural del Perú, periodo 2010-2019. *Semestre Económico*, 10(2), 72–85. <https://doi.org/10.26867/se.2021.v10i2.121>

RESOLUCIÓN Por La Que Se Modifican Los Valores de Coeficiente Global de Transferencia de Calor (K) de La Tabla 1, Se Agregan Definiciones y Se Acota La Verificación de La Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011, Eficiencia Energética En Edificaciones.- Envolvente de Edificios Para Uso Habitacional, Publicada El 9 de Agosto de 2011., Pub. L. No. NOM-020-ENER-2011, Diario Oficial de la Federación DOF (2016). https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6154/sener11_C/sener11_C.html

Rodríguez, O. de B., (2018). *Energía y Edificaciones en México: Importancia y políticas públicas resentes y futuras*. Cuaderno de la CONUEE No.10. <https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuadernoNo.10.pdf>

Rodríguez, O. de B., Navarrete, J., & Hernández, P. (2022). Pobreza energética en México y efectos de política pública en eficiencia energética de 1996 a 2016. In R. García Ochoa (Ed.), *Pobreza energética. Visiones de América Latina* (1st ed., pp. 1–270). Coordinación de Publicaciones de El Colegio de la Frontera Norte.

Romero Moreno, R. A., Bojórquez Morales, G., Vázquez Tépo, J. E., González Cruz, E. M., Ochoa de la Torre, J. M., Reséndiz Pacheco, O., Gómez Azpeitia, L. G., Pérez Sánchez, M. M., y Tejeda Martínez, A. (2020). Caracterización de la vivienda económica en México en R. A. Romero Moreno y J. M. Ochoa de la Torre (Eds.), *Confort térmico y ahorro de energía en la vivienda económica en México: regiones de clima cálido seco y húmedo* (1st ed., pp. 1–359). Universidad de Sonora y Universidad Autónoma de Baja California.

Santillán, O. S., Cedano, K. G., y Martínez, M. (2020). Analysis of energy poverty in 7 Latin American countries using multidimensional energy poverty index. *Energies*, 13(7), 1608. <https://doi.org/10.3390/en13071608>

Secretaría de Energía (SENER). (2023). *Balace Nacional de Energía 2022*. <https://www.gob.mx/sener/articulos/balace-nacional-de-energia-296106>

Secretaría de Energía (SENER) y Comisión Nacional del Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2024, February 3). *Indicadores estatales de eficiencia energética. Gastos en energía por hogar*. Gastos En Energía Por Hogar. <https://www.biee-conuee.net/datamapper/#gastos-energia-por-hogar.html>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2024a, February 29). *Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional, 2023*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/data/file/896217/aviso_fesen_2023.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2024b, July 15). *Atlas Digital Geográfico*. Atlas Digital Geográfico. https://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_climas.html

Siksnyte-Butkiene, I., Streimikiene, D., Lekavicius, V., y Balezentis, T. (2021). Energy poverty indicators: A systematic literature review and comprehensive analysis of integrity. *Sustainable Cities and Society*, 67, 102756. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102756>