

Proyección electrificada del consumo energético residencial: México y la meta global de temperatura de 1.5° C

Electrified Projection of Residential Energy Consumption: Mexico and the Global Temperature Goal of 1.5° C

DOI: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i12.218>

CHRISTIAN HERNÁNDEZ CÁRDENAS

Universidad de Guadalajara, México / ORCID: 0000-0001-5073-2865

Correo electrónico: christian.hc84@gmail.com

DAVID CARLOS ÁVILA RAMÍREZ

Universidad de Guadalajara, México / ORCID: 0000-0002-8563-1578.

Correo electrónico: david22_2000@hotmail.com

Recepción: 05 de febrero de 2022. Aceptación: 14 de mayo de 2022.

RESUMEN

Los gobiernos nacionales concuerdan en mantener el calentamiento global por debajo de 1.5° C para evitar los efectos adversos del cambio climático. Sin embargo, sus promesas de reducción de emisiones de la COP26 rebasan en 60% este objetivo. El 65% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) se producen por el consumo doméstico, siendo el consumo energético residencial uno de los mayores emisores. El objetivo es analizar las tendencias del consumo energético residencial en México y compararlas con dos escenarios de electrificación energética residencial, compatibles con el presupuesto de 1.5° C. Se proyectó un escenario Business As Usual (BAU) analizando el consumo energético residencial del periodo 2005-2019, y comparando sus emisiones de GEI con el presupuesto de 1.5° C de la trayectoria Low Energy Demand (LED). La electrificación de los otros dos escenarios se calculó convirtiendo a energía eléctrica el consumo

de los energéticos proyectados en el escenario BAU, asegurando que el factor de emisiones del sistema eléctrico nacional (SEN) fuera compatible con la trayectoria LED. Los resultados indican que las tendencias actuales excederían el presupuesto a partir del año 2033, superándolo en 374% al final del siglo. Mientras que los escenarios de electrificación necesitarían que el factor de emisiones del SEN decreciera exponencialmente de 0.494 tCO₂e/MWh actuales a 0.108 tCO₂e/MWh en 2100. Estos resultados hacen evidente la necesidad de introducir el tema del presupuesto de emisiones de 1.5° C a la discusión de la iniciativa de reforma eléctrica, para garantizar que las políticas energéticas de México estén en concordancia con los acuerdos internacionales en la materia.

Palabras clave: consumo eléctrico residencial, Business As Usual (BAU), energías renovables, presupuesto de emisiones para 1.5° C, México.

ABSTRACT

National governments agree to keep global warming below 1.5° C to avoid the adverse effects of climate change. However, its promises to reduce emissions at COP26 exceed this objective by 60%. The 65% of global GHG emissions are produced by household consumption, with residential energy consumption being one of the largest emitters. The objective is to analyze the trends of residential energy consumption in Mexico, and compare them with two residential energy electrification scenarios, compatibles with the 1.5° C budget. A Business As Usual (BAU) scenario was projected by analyzing residential energy consumption for the 2005-2019 years, and comparing its GHG emissions with the 1.5° C budget of the Low Energy Demand (LED) trajectory. The electrification of the other two scenarios was calculated by converting the energy consumption projected in the BAU scenario to electrical energy, ensuring that the emissions factor of the national electricity system (SEN) was compatible with the LED trajectory. The results indicate that current trends would exceed the budget as of 2033, exceeding it by 374% at the end of the century. While the electrification scenarios would require the SEN emissions factor to decrease exponentially from the current 0.494 tCO₂e/MWh to 0.108 tCO₂e/MWh in 2100. These results make evident the need to introduce the issue of the 1.5° C emissions budget to the discussion of the electricity reform initiative, to ensure that Mexico's energy policies are in accordance with international agreements on the matter.

Keywords: residential electricity consumption, Business As Usual (BAU), renewable energies, emissions budget for 1.5° C, Mexico.

INTRODUCCIÓN

Los científicos climáticos han advertido que las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) producidas a partir de la Revolución Industrial han provocado un calentamiento

global de más de 1.0° C que debería frenarse en la primera mitad de este siglo, porque de lo contrario, el cambio climático asociado tendrá graves repercusiones para la mayoría de las especies que habitamos el planeta, poniendo en riesgo muchos de los sistemas socioecológicos en los que se basa nuestra civilización (The Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2018). Las consecuencias de este cambio climático acelerado incluyen: el derretimiento de la criosfera que tiene el potencial de aumentar el nivel del mar en más de 10 metros, inundando numerosas ciudades costeras; las olas de calor en los océanos que acabarían con los ecosistemas tropicales de corales y el sustento de millones de personas; las olas de calor continentales que provocarían la pérdida de los bosques tropicales y boreales del planeta, convirtiéndolos en emisores de GEI en lugar de sumideros (Lenton et al., 2019). El mayor riesgo del calentamiento global es cruzar el umbral de 2.0° C, a partir del cual los efectos adversos del cambio climático se podrían retroalimentar a sí mismos, llevando al planeta a un estado de invernadero, donde la temperatura no se podría reducir incluso si las emisiones antropogénicas de GEI lo hicieran (Steffen et al., 2018).

Además, se estima que de no reducir el calentamiento global, en 50 años un tercio de la población humana vivirá en territorios con una temperatura media anual de hasta 18° C por arriba del nicho ambiental que ha hecho posible la civilización en los últimos 6,000 años, afectando la producción de alimentos y posiblemente forzando migraciones masivas hacia territorios más favorables (Xu et al., 2020). En este sentido, los gobiernos nacionales reconocen que el calentamiento global debería ser limitado por debajo de 1.5° C para evitar los peores efectos y riesgos del cambio climático (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [CMNUCC], 2015). Sin embargo, este objetivo de temperatura se queda en el discurso, como lo demuestran las últimas promesas de reducción de emisiones de GEI presentadas en la COP26, que llevarían al planeta a un calentamiento global de 2.4° C (Sheather, 2021).

El consumo de los hogares a nivel global durante 2007 representó el 65% del total de emisiones de GEI, siendo la electricidad generada con carbón y la quema directa de combustibles en las viviendas unas de las principales fuentes de emisiones (Ivanova et al., 2016). En México, estudios anteriores muestran que el mismo año las emisiones de GEI producidas por la energía utilizada en las viviendas representaron cerca del 22% del total de las emisiones de los hogares (Vita, 2019). En el caso de la Ciudad de México, el consumo de electricidad y quema de combustibles en las viviendas durante 2008 generó una huella de 555 kgCO₂e/cap.-año, 48% correspondiente a la quema de combustibles y 52% a la producción de electricidad (Cruz, 2016). Generar estrategias para reducir estos niveles de emisiones es crucial para la acción climática, dado que esta huella de GEI consumiría el 79% del presupuesto anual de emisiones que una persona podría emitir en el año 2050 para conseguir el objetivo de temperatura de 1.5° C (Akenji et al., 2019). En tal sentido, varias ciudades de Estados Unidos se han adherido al movimiento conocido como *Electrify everything*, que busca prohibir la quema de gas para la cocción de alimentos y la calefacción de las viviendas, y en su lugar promueve el uso de la electricidad, cuya intensidad de emisiones se ha reducido en los últimos años, facilitando la descarbonización del consumo energético residencial (Davis, 2021). De igual forma, Ecuador ha impulsado desde 2014 un programa nacional para cambiar las estufas de gas LP (GLP) por estufas de inducción magnética, debido a que esta tecnología ha demostrado ser muy eficiente (Gould et al., 2018).

Además de generar emisiones de GEI, la quema de combustibles en las viviendas, en especial la leña, contamina el aire que respiran sus habitantes, provocando a nivel global más de cuatro millones de muertes prematuras al año (Hernández-Garduño et al., 2017). Aunque la leña es un material renovable y las emisiones de GEI que produce su quema son previamente secuestradas durante el crecimiento del árbol, se han encontrado indicios en varios estados de México

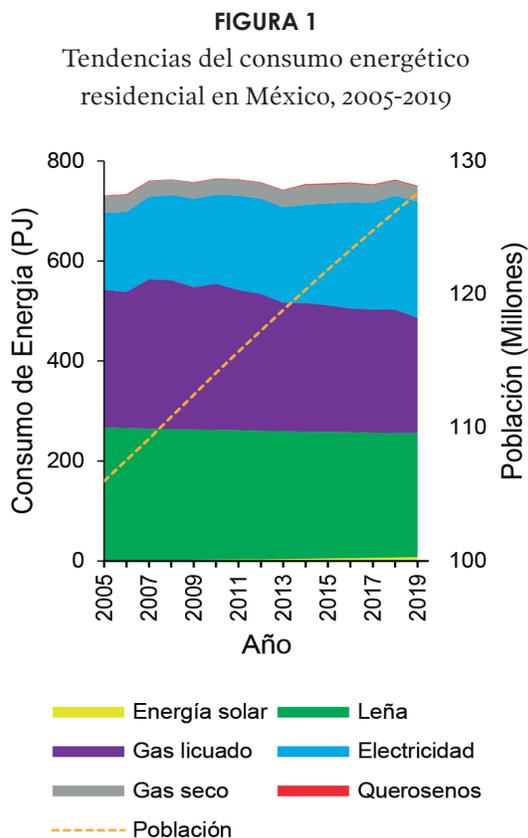
que muestran una extracción mayor al ritmo de regeneración de la misma, lo que contribuye a la reducción del secuestro de carbono necesario para luchar contra el cambio climático (Lagunes Díaz et al., 2015). En México el uso de leña como combustible en las viviendas se ha reducido de 1990 a 2013 un 53%, en parte por la transición hacia el GLP y los programas gubernamentales de estufas ahorradoras de leña; sin embargo, en las áreas rurales esta transición ha sido mucho menor debido a la escasa accesibilidad al GLP y la identidad cultural de muchas comunidades alrededor de la cocción de alimentos con leña (Hernández-Garduño et al., 2017; Lagunes Díaz et al., 2015).

El objetivo de este artículo es analizar las tendencias del consumo energético residencial en México para generar un escenario *Business as Usual* (BAU), y compararlo con dos escenarios de electrificación energética residencial, compatibles con la meta de temperatura de 1.5° C. Estos escenarios pueden contribuir proactivamente en la discusión de la propuesta de reforma constitucional en materia de energía eléctrica que el actual Gobierno de México está impulsando. Estos debates son relevantes debido a que análisis recientes indican que el decreto emitido y suspendido por el Poder Judicial en el mes de julio de 2021, que pretendía priorizar la generación eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) por encima de las energías renovables, en conjunto con el uso del combustóleo que Petróleos Mexicanos (Pemex) no puede vender, aumentarían hacia el año 2050 las emisiones de GEI de la generación eléctrica en 125% respecto a las tendencias actuales, además de que en ambos casos las emisiones del sector superarían las promesas de reducción de emisiones presentadas por México en el Acuerdo de París (Gutiérrez-Meave et al., 2021).

MATERIALES Y MÉTODOS

ESCENARIO BAU DEL CONSUMO ENERGÉTICO RESIDENCIAL EN MÉXICO

Se utilizaron los datos abiertos del Sistema de Información Energética (Secretaría de Energía [Sener], 2020) para analizar las tendencias del consumo energético residencial en México de 2005 a 2019, y proponer métodos de pronóstico adecuados para cada tipo de energía (energía solar, leña, GLP, querosenos, gas seco y electricidad) para el periodo 2020 a 2100. Durante el periodo analizado la energía eléctrica mostró una clara línea de tendencia ascendente. Los querosenos y el gas seco presentaron líneas de tendencia ascendente, pero con mínimos. La leña tuvo un decrecimiento constante. La energía solar presentó un crecimiento que tiende a incrementarse hacia el final del periodo. El GLP mostró altibajos, pero con una línea de tendencia descendente. En la figura 1 se muestran las últimas tendencias del consumo energético residencial en México.



Fuente: elaborado con datos de Sener (2020).

Kaytez et al. (2015) encontraron que la capacidad eléctrica instalada, el número de suscriptores, la generación eléctrica bruta y la población total muestran buenos resultados al ser utilizadas

como variables independientes en los pronósticos de consumo eléctricos. Sin embargo, su análisis sólo compara los resultados de los modelos de pronóstico con los datos reales de consumo eléctrico del periodo donde se conocían esas variables. En el caso de México, para el periodo 2020-2100 la única de dichas variables para la cual existe un pronóstico es la población total estimada. La variable de población se obtuvo directamente de la proyección de variante media del crecimiento poblacional de México, la cual refleja la incertidumbre de los niveles futuros de mortalidad y fecundidad, utilizando la variabilidad histórica de cada variable basada en la experiencia nacional (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2019).

Debido al incremento del consumo eléctrico residencial observado en el periodo 2005-2019, y su aparente relación con el incremento de la población (figura 1), se decidió pronosticar el consumo de la energía eléctrica mediante un modelo de regresión lineal que considera como variable independiente el total de población estimada para cada año durante el periodo 2020-2100.

Para la leña se utilizó un modelo de regresión lineal empleando la variable año como independiente, con el supuesto de que su uso seguirá disminuyendo con el tiempo, como lo muestran las tendencias observadas (figura 1), gracias al cambio tecnológico (Hernández-Garduño et al., 2017; Lagunes Díaz et al., 2015).

En el caso de la energía solar se decidió usar un modelo de regresión lineal con dos variables independientes, el año y la población. De esta forma se puede proyectar un crecimiento con incrementos anuales similares a la tendencia mostrada en el periodo 2014-2019 (figura 1).

La disminución observada en el consumo del gas LP puede atribuirse al incremento en el uso energía solar, específicamente la tecnología de calentadores solares para el agua (figura 1). En este sentido, para proyectar el comportamiento del consumo doméstico de gas LP se utilizó un modelo de regresión logarítmica empleando como variable independiente la energía solar, con el objetivo de mostrar un decrecimiento inicial que tienda a estabilizarse con el tiempo.

Por otra parte, para proyectar el gas seco, también conocido como gas natural, se decidió utilizar un modelo de regresión lineal utilizando como variable independiente el total de población estimada para cada año. Con este modelo el consumo del gas seco no disminuye con el tiempo, a diferencia del modelo utilizado para el gas LP. El objetivo es proyectar un mayor porcentaje de uso del gas seco en relación con el gas LP, como lo proponen los escenarios de las últimas propuestas de acción climática en México (Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara [Imeplan], 2020), y como se observa en la tendencia del periodo 2005-2019 (figura 1).

Por último, la proyección de los querosenos también utiliza un modelo de regresión lineal con la estimación de población como variable independiente. De esta forma, se puede proyectar un consumo estable como el observado en el periodo 2005-2019 (figura 1). Cabe mencionar que el uso de querosenos obedece principalmente a las necesidades de calefacción en climas fríos, y no se cuenta con las estimaciones climáticas del periodo 2020-2100 para añadir esta variable a la proyección. Sin embargo, a pesar de esta limitante es preciso mencionar que los querosenos apenas representaron el 0.21% de la energía utilizada por

los hogares durante el periodo 2005-2019 (figura 1), y no se espera que su uso aumente significativamente. La tabla 1 muestra los parámetros de los modelos.

COMPARACIÓN DE EMISIONES DE GEI DEL ESCENARIO BAU Y EL PRESUPUESTO DE EMISIONES PARA 1.5° C

El impacto per cápita de emisiones de GEI (tCO₂e/cap.-año) del consumo energético residencial en México se obtuvo multiplicando el pronóstico del consumo de cada tipo de energía por el factor de emisiones correspondiente (Bustamante y Rampone, 2013; Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2014), y dividiendo la suma anual de emisiones entre la población de la trayectoria LED de cada año del periodo 2020 a 2100 (Huppmann et al., 2019). Las emisiones de GEI producidas por la quema de la leña no fueron incluidas porque la evidencia sugiere que la mayoría de la leña utilizada en los hogares de México se obtiene sin superar su capacidad de regeneración (Lagunes Díaz et al., 2015). De igual forma las emisiones de GEI de la energía solar tampoco se incluyeron, bajo el supuesto de que se trata de energía solar térmica utilizada por calentadores solares que no generan emisiones directas.

TABLA 1
Parámetros de los modelos de pronóstico de consumo energético

Variable dependiente	Variable independiente	Valor		Constante		R ²	Pr1	Pr2
Electricidad	Población	3.407 (0.144)	**	-208.145 (16.933)	**	0.977	Na	Na
Queroseno	Población	0.035 (0.016)	*	-2.535 (1.933)		0.261	Na	Na
Gas seco	Población	0.097 (0.119)		-21.928 (13.921)		0.049	Na	Na
Leña	Año	-1.307 (0.010)	**	2,885.925 (19.829)	**	0.999	Na	Na
Energía solar	Población	-1.585 (0.335)	**	-5,751.396 (1,008.122)	**	0.991	Na	Na
	Año	2.953 (0.521)	**					
GLP	Energía solar	Ln		Na	Na	Na	-26.944 (5.109)	299.746 (6.859)

Nota: Ln = logaritmo natural. Na = no aplica. ** p<0.001. *p<0.05.
Fuente: Elaboración propia con datos de Sener (2020).

Para obtener el presupuesto per cápita de emisiones de GEI del consumo energético es necesario realizar varios cálculos (Akenji et al., 2019). Primero, se decidió utilizar como base la trayectoria global de emisiones low energy demand (LED) (Grubler et al., 2018b; Huppmann et al., 2019), porque presenta un presupuesto remanente de emisiones compatible con la meta de temperatura de 1.5° C, sin considerar el uso de tecnologías de bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS), las cuales aún no tienen un nivel de madurez tecnológica adecuado para desplegarse a escala global, y por el contrario sólo depende de la forestación como método de secuestro de carbono (The Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2018). Enseguida, el presupuesto per cápita total de emisiones de GEI de la trayectoria LED se obtuvo dividiendo el total de emisiones antrópico-utilitarias entre la población mundial estimada para cada año (Huppmann et al., 2019). Las emisiones antrópico-utilitarias (tCO₂e) de GEI se obtuvieron multiplicando las variables de emisiones de CO₂, N₂O, CH₄, SF₆, PFC y HFC, por su potencial de calentamiento global a cien años (GWP100) (The Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2007).

Posteriormente, el presupuesto per cápita de emisiones de GEI del consumo energético residencial se obtuvo multiplicando el presupuesto per cápita total por los siguientes factores: 1) 65% de participación de los hogares en el total de emisiones de GEI; 2) 22% de participación de la categoría vivienda en el impacto total de los hogares mexicanos, y 3) 90% de supuesto de participación de la energía en el total de la categoría de vivienda (Vita, 2019). Por último, el secuestro de carbono per cápita de la trayectoria LED se calculó dividiendo la variable de agricultura, silvicultura y otros usos de suelo (AFOLU) entre la población estimada de cada año (Huppmann et al., 2019).

ESCENARIOS DE ELECTRIFICACIÓN ENERGÉTICA RESIDENCIAL COMPATIBLES CON 1.5° C

Se realizaron dos escenarios de electrificación energética residencial. En ambos escenarios el

pronóstico del consumo energético (PJ) de gas seco se convirtió a su equivalente de GLP, multiplicándolo por un factor de conversión energético obtenido dividiendo el promedio nacional del poder calorífico (PJ) del gas seco entre el análogo del GLP (INECC, 2014). Posteriormente, ambos montos se sumaron a un solo pronóstico de consumo de GLP (kg/año), y el total se transformó a energía eléctrica (kWh/año), multiplicándolo por un factor de conversión de poder calorífico aprovechado (FPCA) de una estufa de GLP a una de inducción. De igual forma, el pronóstico del consumo del queroseno (lt/año) se transformó a energía eléctrica (kWh/año), multiplicándolo por un FPCA de un calentador de queroseno a uno eléctrico.

La diferencia entre ambos escenarios está en los supuestos utilizados para ajustar el consumo de leña. En el escenario 1 el pronóstico del consumo de leña (kg/año) se redujo, multiplicándolo por un FPCA de un fogón abierto a una estufa ahorradora de leña de bajo poder. Para el escenario 2 el pronóstico de consumo de leña (kg/año) se eliminó, multiplicándolo por un FPCA de un fogón abierto a una estufa de inducción.

Para calcular los FPCA se realizaron los siguientes pasos: 1) se obtuvieron los valores de energía primaria (MJ) por lt/queroseno (Bustamante y Rampone, 2013), kg/GLP, kg/madera (INECC, 2014) y kWh (Smil, 2016); 2) se obtuvieron los valores de eficiencia térmica (MJ) por lt/queroseno en un calentador de queroseno, kWh en un calentador eléctrico (Matson, 1983), kg/GLP en una estufa de GLP, kWh en una estufa de inducción (Tiandho et al., 2021), kg/madera en un fogón abierto y kg/madera en una estufa ahorradora de leña de bajo poder (Berrueta, 2007); 3) los valores de poder calorífico aprovechado de cada dispositivo se calcularon multiplicando los valores de energía primaria de su tipo de energético por los valores de eficiencia térmica correspondientes, y 4) finalmente, los FPCA se obtuvieron dividiendo el poder calorífico aprovechado del energético a convertir entre el poder calorífico aprovechado del energético objetivo. En la tabla 2 se muestran los valores utilizados para obtener los FPCA.

TABLA 2
Valores utilizados para obtener los FPCA

Dispositivo	Unidad	Energía primaria (MJ/unidad)	Eficiencia térmica	Poder calorífico aprovechado (MJ/unidad)
Fogón abierto	kg/leña	22.41	0.11	2.47
Estufa Patsari (bajo poder)	kg/leña	22.41	0.30	6.72
Estufa de GLP	kg/GLP	46.16	0.39	17.79
Estufa de inducción	kWh	3.60	0.74	2.67
Calentador de queroseno	lt/queroseno	36.16	0.90	32.54
Calentador eléctrico	kWh	3.60	1.00	3.60

Fuente: elaboración propia con datos de Berrueta (2007), Bustamante y Rampone (2013), INECC (2014), Matson (1983), Smil (2016) y Tiandho et al. (2021).

Posteriormente se realizó una proyección de los factores de emisiones (tCO_2e/MWh) del sistema eléctrico nacional (SEN), para garantizar que el impacto anual de emisiones de GEI del consumo energético residencial de ambos escenarios estuviera por debajo del presupuesto per cápita de emisiones compatible con 1.5° C. Esta proyección se calculó con dos modelos de regresión no lineales, utilizando un modelo de crecimiento exponencial ($pr1 * \exp(pr2 * X1)$) para el periodo 2020 a 2051, y un modelo de decaimiento en una fase ($pr1 * \exp(-pr2 * X1) + pr3$) para el periodo 2051 a 2100. La combinación de estos modelos permite proyectar una curva similar a la mostrada por las trayectorias de reducción de emisiones compatibles con 1.5° C más conocidas. En estas trayectorias se caracterizan por una reducción intensa de las emisiones hasta la mitad del siglo XXI, las cuales posteriormente se estabilizan hacia el año 2100 (IPCC, 2018). En la tabla 3 se muestran los parámetros de ambos modelos.

TABLA 3

Parámetros de los modelos de proyección del factor de emisiones del SEN

Variable dependiente	Variable independiente	Pr1	Pr2	Pr3
Factor de emisiones	Año	3.236e+27 (0.000)	-0.032 (0.000)	Na
Factor de emisiones	Año	5.477e+42 (0.000)	0.049 (0.000)	0.100 (0.002)

Fuente: elaboración propia.

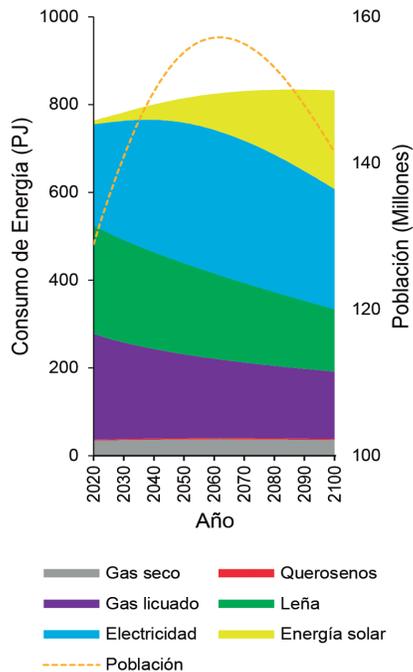
Finalmente, se propuso una mezcla energética que permitiera tener el factor de emisiones del SEN más bajo de la proyección. Para lograr el factor de emisiones objetivo se utilizó como punto de partida la capacidad instalada de las energías nucleoelectrónica, hidroeléctrica y la misma capacidad total instalada (MW) en 2021 (Sener, 2021b). Para completar el total de capacidad instalada se propusieron distintas cantidades de energía eoloelectrónica, gas natural y energía solar con baterías de litio. El factor de emisiones del SEN objetivo se obtuvo sumando los valores de las capacidades instaladas (MW) propuestas, multiplicados por los factores de emisiones (tCO_2e/MW) correspondientes (Bieker, 2021; Krebs et al., 2020).

RESULTADOS

El escenario BAU indica que el consumo energético residencial de México crecerá de 764 PJ en 2020 hasta los 833 PJ en 2100, con un pico máximo de 834 PJ en la década de 2080. La electricidad llegaría a un pico de 327 PJ en 2062. Por su parte, la energía solar térmica crecería exponencialmente hasta los 225 PJ al final del siglo. El gas seco y los querosenos se mantendrían estables. Mientras que los consumos de GLP y la leña disminuirían 36 y 42%, respectivamente. En la figura 2 se muestra el consumo energético residencial del escenario BAU.

FIGURA 2

Consumo energético residencial del escenario BAU



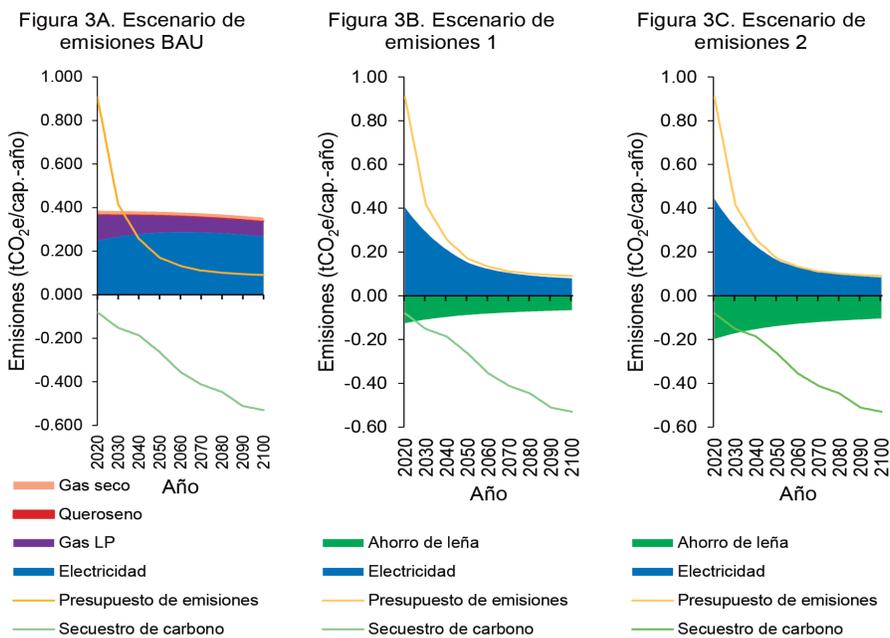
Fuente: elaboración propia a partir de datos del Sistema de Información Energética y la ONU (ONU, 2019; Sener, 2020).

El presupuesto per cápita de emisiones de GEI del consumo energético residencial de la trayectoria LED asciende en 2020 a 0.91 tCO₂e/cap.-año. La mayor reducción se presenta en la década de 2020 a 2030 con una disminución del 54% sin que el escenario BAU lo rebase. No obstante, las emisiones de GEI del escenario BAU excederían el presupuesto a partir del año 2033, superándolo en 374% al final del siglo.

Por su parte, las emisiones de los dos escenarios de electrificación se mantienen por debajo del presupuesto de la trayectoria LED, con una diferencia marginal entre ambos si el consumo de leña se reduce por el uso de estufas ahorradoras de leña, o si se elimina al migrar a estufas de inducción. El secuestro de carbono logrado por el escenario 1 cubriría el monto per cápita necesario solamente hasta 2024, mientras que el escenario 2 lo haría ocho años más. Para el año 2100 el secuestro de carbono logrado por la disminución en el consumo de leña representaría el 12% en el escenario 1 y 20% en el escenario 2, respecto al total necesario. La figura 3 muestra los tres escenarios de emisiones.

FIGURA 3

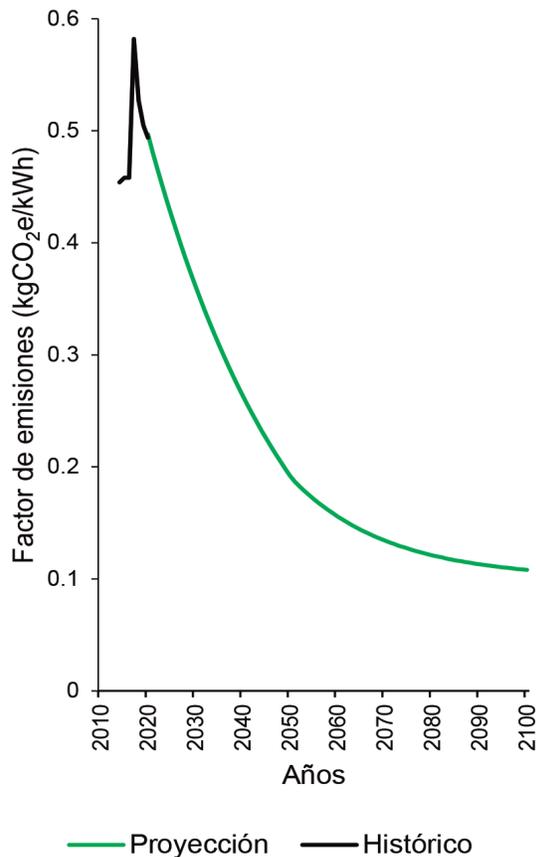
Escenarios de emisiones de GEI del consumo energético residencial



Fuente: elaborado con datos de Berrueta (2007), Bustamante y Rampone (2013), Grubler et al. (2018a), Huppmann et al. (2019), INECC (2014), Matson (1983), ONU (2019), Sener (2020), Smil (2016) y Tiandho et al. (2021).

FIGURA 4

Proyección del factor de emisiones del SEN



Fuente: elaboración propia con datos de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2021).

Los primeros tres reportes del factor de emisiones emitidos por la Semarnat (2021) en 2014, 2015 y 2016 con un promedio de 0.457 tCO₂e/MWh, abarcaban únicamente las emisiones indirectas

de GEI del consumo eléctrico cuando el proveedor era la CFE. A partir de 2017 se incluyeron las emisiones de todo el SEN, y el factor subió a 0.582 tCO₂e/MWh. Sin embargo, desde entonces este factor ha mostrado una tendencia a la baja, ubicándose en 0.494 tCO₂e/MWh para 2020. Esta tendencia es compatible con el decrecimiento exponencial utilizado para proyectar el factor de emisiones del SEN necesario para mantener las emisiones de GEI del consumo energético residencial por debajo del presupuesto de 1.5° C. La figura 4 muestra la evolución histórica y la proyección del factor de emisiones del SEN.

El último factor de emisiones del SEN proyectado para el año 2100 es de 0.108 tCO₂e/MWh. Los dos principales energéticos propuestos para alcanzar este factor son la energía solar fotovoltaica con almacenamiento en baterías de litio y la eoloeléctrica con un poco más de dos tercios de la mezcla energética requerida. La otra tercera parte necesaria para completar la mezcla incluye la energía nucleoelectrica e hidroeléctrica con la misma capacidad instalada actual, más un 15% de generación a partir de gas natural. En la tabla 4 se presentan los detalles de la mezcla energética propuesta.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La proyección de emisiones de GEI del escenario BAU coincide con investigaciones recientes que sugieren la necesidad de aumentar los esfuer-

TABLA 4

Mezcla energética objetivo para el factor de emisiones del SEN

Tipo de energía	Capacidad instalada (MW)	Participación	Factor de emisiones (kgCO ₂ e/MWh)	Emisiones (tCO ₂ e)
Nucleoelectrica	1,608.00	1.77%	0.016	25.73
Hidroeléctrica	12,670.97	13.95%	0.004	50.68
Eoloeléctrica	30,000.00	33.03%	0.012	360.00
Solar con baterías	32,600.00	35.90%	0.088	2,868.80
Gas natural	13,938.96	15.35%	0.469	6,537.37
Total	90,817.93	100.00%		9,842.59
Factor de emisiones (tCO ₂ e/MWh)				0.108

Fuente: Elaboración propia con datos de (Bieker, 2021; Krebs et al., 2020).

zos para reducir las emisiones de GEI del sector energético de México si el país quiere cumplir con la meta de 1.5° C del Acuerdo de París (Gutiérrez-Meave et al., 2021). Este esfuerzo debería tratarse de forma urgente porque de seguir con la tendencia actual de consumo energético residencial las emisiones de GEI superarían el presupuesto de 1.5° C en menos de 12 años. En este sentido, preocupa que la actual política en materia de energía eléctrica impulsada por el gobierno de México parece ir en la dirección contraria, al promover una política pública pro-combustibles fósiles, que para 2050 superaría en 52% las 300 MtCO₂e declaradas en la promesa de reducción de emisiones presentada en el Acuerdo de París (Gutiérrez-Meave et al., 2021).

La iniciativa de reforma constitucional en materia eléctrica presentada por el Gobierno de México argumenta que la reforma de 2013 pretendía provocar la desaparición de las empresas energéticas estatales, debilitando la seguridad energética, el SEN y la seguridad nacional, y en su lugar propone que “corresponde exclusivamente a la nación el área estratégica de la electricidad, consistente en generar, conducir, transformar, distribuir y abastecer energía eléctrica” (Cámara de Diputados, 2021). Su principal argumento es que la CFE no puede usar la energía de sus centrales porque está obligada a comprar primero la energía producida con energías renovables, pagando el precio ofertado más alto a todos los participantes de las subastas, incluso si éstos ofertaron un precio más bajo. Además, menciona que la reforma de 2013 provocó una sobreoferta de generación en su mayoría de energías renovables, y que de aprobarse todos los permisos pendientes se triplicaría la demanda requerida, considerando un 20% de capacidad de reserva. Si bien este mecanismo de pago provoca pérdidas económicas al erario, que probablemente llevarían a la desaparición de la generación eléctrica de CFE, quedando reducida a coordinar solamente la transmisión, lo cierto es que de aprobarse todos los permisos pendientes se podría acelerar la reducción del factor de emisiones del SEN, acercándolo a la compatibilidad con el presupuesto de 1.5° C.

En este sentido, la capacidad instalada de energías limpias de la CFE supone un 48% del total; sin embargo, la energía hidroeléctrica y nuclear no han aumentado su capacidad desde 2018, siendo sólo la energía geotermoeléctrica la que tuvo un aumento del 6% en 2020 (Secretaría de Energía [Sener], 2021a). Además, en los últimos tres años la capacidad instalada de la energía eoloelectrica y la solar fotovoltaica han crecido entre 2018 y 2021 en 82 y 283%, respectivamente, casi en su totalidad a través de los generadores privados (Sener, 2021b, 2021a). Como resultado, al 30 de abril de 2021 el 91 y 99% de la capacidad instalada de las energías eoloelectrica y fotovoltaica pertenecían a los generadores privados, respectivamente (Sener, 2021a). De mantenerse esa tendencia lineal, la energía solar alcanzaría los 32,600 MW de la mezcla energética propuesta en 2035, y la energía eoloelectrica alcanzaría los 30,000 MW en 2037. Por su parte, la iniciativa de reforma eléctrica propone que la CFE tome el control de la transición energética, modernizando los equipos generadores de las hidroeléctricas y construyendo una planta fotovoltaica en Sonora (Iniciativa de Decreto por el que se reforman los artículos 25, 27 y 28 de la Constitución Política de Los Estados Unidos Mexicanos, 2021). Sin embargo, es claro que estas acciones serían insuficientes para reducir el factor de emisiones en compatibilidad con la meta de temperatura de 1.5° C (figura 4).

Otro argumento no menos importante de la iniciativa de forma eléctrica es la crítica al carácter intermitente de las energías renovables, que producen picos de energía durante las horas de más sol y viento, los cuales de ser introducidos completamente al SEN podrían provocar su colapso (Cámara de Diputados, 2021). Desde la perspectiva de esta investigación, la intermitencia se podría mitigar con una mezcla energética como la de la tabla 4. En esta propuesta, una tercera parte de la electricidad sería proporcionada por sistemas fotovoltaicos respaldados con baterías de litio que permiten almacenar los picos de energía para utilizarse cuando no hay luz solar. La segunda tercera parte proporcionada por la energía eoloelectrica podría ser compensada con

generación de respaldo mediante la energía hidroeléctrica, nucleoelectrica y gas natural. Además, este problema ha sido resuelto efectivamente por otros países mediante mercados de compra venta eléctrica intradía (Karanfil y Li, 2017), así como con la puesta en operación de diversos mecanismos de almacenamiento eléctrico diferentes a las baterías, como el aire comprimido, condensadores, sistemas magnéticos, ruedas de inercia e hidrobombeo, entre otros (Akinyele y Rayudu, 2014).

De todas estas opciones la que tiene el mayor potencial para mitigar el problema de la intermitencia de las energías renovables son las centrales de hidrobombeo. Estos sistemas pueden ser de circuitos abiertos y cerrados: los sistemas de circuito abierto se ubican de forma paralela a un río del cual se bombea agua a una presa más alta, utilizando los picos de las energías eoloeléctrica o solar fotovoltaica, permitiendo liberar el agua a través de una turbina para generar electricidad cuando no hay luz solar o viento; por su parte, los sistemas de circuito cerrado no necesitan estar junto a un río, y constan de dos depósitos de agua situados a diferentes alturas, pero cumplen la misma función (Hunt et al., 2020; Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2020).

El potencial estimado anual de almacenamiento global de las centrales de hidrobombeo de circuitos abiertos es de 17'325,000 MWh, mientras que los de circuitos cerrados asciende hasta los 23,000'000,000 MWh, lo que equivale respectivamente a 79% y más de 10,000 veces la energía eléctrica consumida en el planeta durante todo el año 2017 (Hunt et al., 2020; INECC, 2020). Cabe mencionar que la anterior administración federal de la CFE ya identificó algunos sitios factibles para construir este tipo de sistemas, y que en 2015 junto con la Sener se acercaron al Banco Mundial para desarrollar un taller en la Ciudad de México, en el cual expertos de Alemania, Estados Unidos, Chile, España y Japón compartieron sus experiencias sobre esta tecnología, así como las condiciones económicas y regulatorias que han permitido la expansión de estos sistemas de almacenamiento energético en sus países (Ener-

gy Sector Management Assistance Program [ESMAP], 2015). En este sentido, el INECC (2020) ha identificado en México y Centroamérica más de 272,000 sitios donde se podrían instalar centrales de hidrobombeo de circuito cerrado con un potencial de almacenamiento de 4,200'000,000 MWh, es decir, más de 45,000 veces la capacidad instalada del SEN en 2021 (Sener, 2021b). Además, el INECC (2020) también prevé que la infraestructura actual de presas y centrales hidroeléctricas podría ser actualizada para convertirse en sistemas de centrales de hidrobombeo, sobre todo las que tienen una disposición en cascada, como los ríos San Juan, Tula y Grijalba.

Como se puede apreciar, este tipo de sistemas de almacenamiento energético tiene el potencial de solucionar el problema de la intermitencia de las energías eoloeléctrica y solar fotovoltaica denunciado en la iniciativa de reforma eléctrica, y más aún, es compatible con el discurso federal de renovación de las centrales de energía hidroeléctrica. La iniciativa de reforma eléctrica en su apartado de transición energética menciona que se ha instruido a la CFE a renovar el equipo y maquinaria de 10 centrales hidroeléctricas, y además el mismo presidente Andrés Manuel López Obrador ha mencionado en reuniones bilaterales con Estados Unidos que su gobierno cumplirá las metas de reducción de emisiones modernizando las centrales hidroeléctricas para aumentar la producción de energía eléctrica (Carrillo, 2021; Cámara de Diputados, 2021).

En este sentido, la discusión sobre cualquier propuesta de mejora del SEN debería incluir de forma urgente la proyección del factor de emisión de emisiones en compatibilidad con el objetivo de temperatura de 1.5° C mediante un plan detallado de reemplazo de las centrales de generación eléctrica convencionales por las de energía limpias necesarias, así como la implementación de medios de almacenamiento de energía para mitigar el problema de la intermitencia. De igual forma, dadas las denuncias realizadas en la iniciativa de reforma eléctrica sobre el mecanismo de pago que afecta al erario, la reforma del mercado eléctrico debería considerar la confor-

mación de un mercado que no dañe las finanzas públicas, pero que a la vez impulse la generación con energías limpias y la utilización de dispositivos de almacenamiento.

Finalmente, también es necesario destacar que independientemente de las decisiones que se tomen a nivel gubernamental federal, desde el ámbito residencial se puede contribuir con un consumo energético residencial compatible con el objetivo de temperatura de 1.5° C. Esto se lograría generando in-situ la electricidad mediante sistemas fotovoltaicos con almacenamiento en baterías de litio, para evitar contribuir al problema de la intermitencia. Como se explica en la tabla 4, este sistema de generación tiene un factor de emisiones de 0.088 tCO₂e/MWh (Krebs et al., 2020), el cual es incluso menor que el de la mezcla energética propuesta. Para esto, también sería necesario reemplazar los dispositivos de GLP con sistemas eléctricos y solares térmicos. En tal sentido, los gobiernos locales pueden contribuir emitiendo reglamentos locales que obliguen a no instalar dispositivos de GLP o gas seco en las viviendas nuevas para poder otorgar las licencias de habitabilidad, como ya se hace en diversas ciudades de Estados Unidos y en Ecuador (Davis, 2021; Gould et al., 2018). Adicionalmente, valdría la pena analizar si mediante estos reglamentos se pudiera obligar a las viviendas nuevas en áreas residenciales de alto poder adquisitivo a instalar sistemas fotovoltaicos con baterías de litio. Por último, considerando que el 72% de los subsidios eléctricos otorgados por la CFE corresponden al sector residencial (Márquez de la Cruz et al., 2016), una forma de incrementar rápidamente la electrificación residencial y la capacidad instalada de los sistemas fotovoltaicos con baterías podría ser el financiamiento de éstos a través del cobro del servicio eléctrico. De esta manera se podría aumentar el acceso a la energía de los hogares más alejados de los proveedores energéticos, el gasto público que actualmente se destina al subsidio se convertiría en una inversión a mediano plazo para la CFE, y al mismo tiempo se reducirían las emisiones del consumo eléctrico residencial a niveles compatibles con 1.5° C.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akenji, L., Lettenmeier, M., Toivio, V., Koide, R., y Amellina, A. (2019). 1.5-Degree Lifestyles: Targets and Options for Reducing Lifestyle Carbon Footprints. Technical Report. Institute for Global Environmental Strategies. <https://www.iges.or.jp/en/pub/15-degrees-lifestyles-2019/en>
- Akinyele, D. O., y Rayudu, R. K. (2014). Review of energy storage technologies for sustainable power networks. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, núm. 8, pp. 74-91. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.07.004>
- Berrueta, V. (2007). Evaluación energética del desempeño de dispositivos para la cocción con leña. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de México. <https://ru.dgb.unam.mx/handle/dgbunam/teso1000627381>
- Bieker, G. (2021, julio). A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars. <https://theicct.org/publications/global-LCA-passenger-cars-jul2021>
- Bustamante, O., y Rampone, G. (2013). Huella de carbono del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Oficina Española de Cambio Climático. https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/publicaciones/documentos-de-interes/huella_carbono_2012_tcm30-178331.pdf
- Cámara de Diputados. (2021). Iniciativa de Decreto por el que se reforman los artículos 25, 27 y 28 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. <http://gaceta.diputados.gob.mx/pdf/65/2021/oct/20211001-I.pdf#page=2>
- Carrillo, E. (2021). Cumpliremos metas de energías limpias con hidroeléctricas, dice AMLO ante John Kerry. *Forbes*. <https://www.forbes.com.mx/politica-cumpliremos-metas-de-energias-limpias-con-hidroelectricas-amlo/>
- Cruz, I. (2016). Emisiones de CO₂ en hogares urbanos. El caso del Distrito Federal. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 31(1): 115-142. <https://doi.org/10.24201/edu.v31i1.1505>
- Davis, L. (2021). What Matters for Electrification? Evidence from 70 Years of U. S. Home Heating Choices. *NBER*. <https://doi.org/10.3386/w28324>
- Energy Sector Management Assistance Program. (2015). Mexico's Power Sector Transition: Pumped Storage Hydropower to Facilitate Re-

- newable Energy Integration. <https://esmap.org/node/71023>
- Gould, C. F., Schlesinger, S., Toasa, A. O., Thurber, M., Waters, W. F., Graham, J. P., y Jack, D. W. (2018). Government policy, clean fuel access, and persistent fuel stacking in Ecuador. *Energy for Sustainable Development*, núm. 46, pp. 111-122. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.05.009>
- Grubler, A., Wilson, C., Bento, N., Boza-Kiss, B., Krey, V., McCollum, D. L., Rao, N. D., Riahi, K., Rogelj, J., De Stercke, S., Cullen, J., Frank, S., Fricko, O., Guo, F., Gidden, M., Havlík, P., Huppmann, D., Kiesewetter, G., Rafaj, P., ... y Valin, H. (2018a). A low energy demand scenario for meeting the 1.5° C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nature Energy*, 3(6): 515-527. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6>
- . (2018b). A low energy demand scenario for meeting the 1.5° C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nature Energy*, 3(6): 515-527. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6>
- Gutiérrez-Meave, R., Rosellón, J., y Sarmiento, L. (2021). The effect of changing marginal-cost to physical-order dispatch in the power sector. *Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW)* <http://hdl.handle.net/10419/235763>
- Hernández-Garduño, E., Gómez-García, E., y Campos-Gómez, S. (2017). Prevalence trends of wood use as the main cooking fuel in Mexico, 1990-2013. *Salud Pública de México*, 59(1): 68. <https://doi.org/10.21149/7770>
- Hunt, J. D., Byers, E., Wada, Y., Parkinson, S., Gernaat, D. E. H. J., Langan, S., van Vuuren, D. P., y Riahi, K. (2020). Global resource potential of seasonal pumped hydropower storage for energy and water storage. *Nature Communications*, 11(1): 947. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14555-y>
- Huppmann, D., Kriegler, E., Krey, V., Riahi, K., Rogelj, J., Calvin, K., Humpenoeder, F., Popp, A., Rose, S. K., Weyant, J., Bauer, N., Bertram, C., Bosetti, V., Doelman, J., Drouet, L., Emmerling, J., Frank, S., Fujimori, S., Gernaat, D., ... y Zhang, R. (2019, agosto 8). IAMC 1.5° C Scenario Explorer and Data hosted by IIASA (Version release 2.0) [Data set]. Integrated Assessment Modeling Consortium/International Institute for Applied Systems Analysis. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3363345>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2014). Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/cgcc-dbc_2014_fe_tipos_combustibles_fosiles.pdf
- . (2020). Potential of storage technologies in Mexico. https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/potential_of_storage_technologies_in_mexico.pdf
- Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara. (s/f). Plan de Acción Climática del Área Metropolitana de Guadalajara. <https://drive.google.com/file/d/1f-tegzzaa-lthdq8cjwn62wdahstazpp6/view>
- Ivanova, D., Stadler, K., Steen-Olsen, K., Wood, R., Vita, G., Tukker, A., y Hertwich, E. G. (2016). Environmental Impact Assessment of Household Consumption. *Journal of Industrial Ecology*, 20(3): 526-536. <https://doi.org/10.1111/jiec.12371>
- Karanfil, F., y Li, Y. (2017). The Role of Continuous Intraday Electricity Markets: The Integration of Large-Share Wind Power Generation in Denmark. *The Energy Journal*, 38(2): 107-130. <https://doi.org/10.5547/01956574.38.2.fkar>
- Kaytez, F., Taplamacioglu, M. C., Cam, E., y Hardalac, F. (2015). Forecasting electricity consumption: A comparison of regression analysis, neural networks and least squares support vector machines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, núm. 67, pp. 431-438. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.036>
- Krebs, L., Frischknecht, R., y Stolz, P. (2020). Environmental Life Cycle Assessment of Residential PV and Battery Storage Systems 2020 PVPS Task 12 PV Sustainability. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/07/iea_pvps_task12_lca_pvandstorage.pdf
- Lagunes Díaz, E., González Ávila, M. E., y Ortega Rubio, A. (2015). Transición de leña a gas licuado a presión (GLP) en el sur de México, oportunidad para la mitigación del cambio climático en la región menos desarrollada del país. *Acta Universitaria*, 25(6): 30-42. <https://doi.org/10.15174/au.2015.853>
- Lenton, T. M., Rockström, J., Gaffney, O., Rahmstorf, S., Richardson, K., Steffen, W., y Schellhuber, H. J. (2019). Climate tipping points — too

- risky to bet against. *Nature*, 575(7784): 592-595. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-03595-0>
- Márquez de la Cruz, G., Andrade Vallejo, M. A., y Peña Cruz, M. D. P. (2016). Reforma energética en México: Los subsidios eléctricos y su impacto en las finanzas públicas. *Oikos*, 19(40): 151. <http://ediciones.ucsh.cl/index.php/Oikos/article/view/977>
- Matson, W. (1983). Kerosene Space Heaters, octubre. <https://ir.library.oregonstate.edu/downloads/ht24wk03r>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (2015). Acuerdo de París Naciones Unidas 2015. https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/spanish_paris_agreement.pdf
- . (2019). World Population Prospects 2019. (Online Edition. Rev. 1). <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>
- Secretaría de Energía. (2020). Balance nacional de energía: Principales indicadores energéticos y de hidrocarburos. <https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/balance-nacional-de-energia-principales-indicadores-energeticos-y-de-hidrocarburos>
- . (2021a). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2021-2035. <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-para-el-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional>
- . (2021b). Sistema de Información Energética. https://sie.energia.gob.mx/bdcontroller.do?action=cuadro&cveca=dips_se_c33_esp
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021). Registro Nacional de Emisiones. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/registro-nacional-de-emisiones-rene>
- Sheather, J. (2021). The conflicts that killed COP26. *BMJ*, núm. 2798. <https://doi.org/10.1136/bmj.n2798>
- Smil, V. (2016). Examining energy transitions: A dozen insights based on performance. *Energy Research & Social Science*, núm. 22, pp. 194-197. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.017>
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T. M., Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C. P., Barnosky, A. D., Cornell, S. E., Crucifix, M., Donges, J. F., Fetzer, I., Lade, S. J., Scheffer, M., Winkelmann, R., y Schellnhuber, H. J. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33): 8252-8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>
- The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, y H. L. Miller (eds.)). Cambridge United Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>
- . (2018). Global Warming of 1.5° C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Tiandho, Y., Indriawati, A., Putri, A. K., y Afriani, F. (2021). Induction stoves: An option for clean and efficient cooking in Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1034(1): 012068. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1034/1/012068>
- Vita, G. (2019). Energía y carbono en el consumo de los hogares mexicanos: Una perspectiva integrada del metabolismo socioeconómico y necesidades humanas fundamentales. En: W. Tijerina, G. Vita, y J. Berlanga (eds.), *Perspectivas globales para la transición energética de México* (pp. 67-76). UANL-Fondo Editorial de Nuevo León. <https://ssrn.com/abstract=3497822>
- Xu, C., Kohler, T. A., Lenton, T. M., Svenning, J.-C., y Scheffer, M. (2020). Future of the human climate niche. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(21): 11350-11355. <https://doi.org/10.1073/pnas.1910114117>