



Costo de políticas hacia el cumplimiento de los NDC en México: un análisis de equilibrio general

*The cost of compliance with the NDC in
Mexico: a general equilibrium approach*

María Eugenia Ibarrarán Viniegra
Universidad Iberoamericana Puebla
mariaeugenia.ibarraran@iberopuebla.mx

Alejandra Elizondo
Centro de Investigación y Docencia Económicas

Roy Boyd
University of Ohio

Resumen

México asumió compromisos de mitigación de emisiones mediante el Acuerdo de París. El cumplimiento conjunto de estas metas reducirá el efecto sobre la climatología global. Para lograrlo es necesario instrumentar acciones que, además de ser congruentes con las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC por sus siglas en inglés), contribuyan a modernizar la matriz energética del país. Este artículo explora la introducción de un impuesto al contenido de carbono de los combustibles fósiles que deberá aumentar los próximos quince años hasta 100 dólares por tonelada. Se analizan los impactos sobre el producto interno bruto (PIB) nacional, los distintos sectores productivos y grupos de ingreso a través de un modelo de equilibrio general computable de la economía mexicana. Los resultados muestran que de aplicarse varias políticas de manera conjunta es posible modificar la matriz energética y cumplir con los compromisos internacionales de mitigación, teniendo un impacto progresivo sobre el bienestar de los distintos grupos de ingreso.

Abstract

Mexico made emission mitigation commitments through the Paris Agreement. Emissions reduction, together with similar efforts of all other nations, will hopefully contribute to the mitigation of climate change. To achieve this, it is necessary to implement actions that contribute to modernizing the country's energy matrix, while being consistent with the Nationally Determined Contributions (NDC). This article explores the introduction of a tax on the carbon content of fossil fuels that will increase over the next 15 years up to \$100 per ton. The impacts on the national GDP, the different productive sectors and income groups are analyzed through a computable general equilibrium model of the Mexican economy. The results show that if several policies are applied jointly, it is possible to modify the energy matrix and comply with international mitigation commitments, having a progressive impact on the well-being of the different income groups.

Palabras Clave: mitigación, impuesto ambiental, efecto distributivo, crecimiento económico, matriz energética, México.

JEL: C68, H23, O54, Q42, Q52, Q54, Q56

Fecha de recepción: 7 de junio de 2022.

Fecha de aceptación: 18 de agosto de 2022.

1. Introducción

México lleva décadas participando en las reuniones de Naciones Unidas para hacer políticas de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero que, a su vez, se sumen a otros esfuerzos internacionales y de esta manera limitar el aumento en la temperatura global. Sin embargo, en años recientes se ha descuidado la alineación entre la política energética y la política ambiental en tanto que se han hecho inversiones muy importantes que promueven la utilización de combustibles fósiles. Esto ha llevado a que muchas voces adviertan que de aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero México estará incumpliendo con lo pactado en acuerdos internacionales.

Este artículo tiene por objetivo identificar los efectos económicos de aplicar medidas que promuevan el mayor uso de energía renovable sobre todo para la generación eléctrica, durante los próximos quince años. Para ello, se utiliza un modelo dinámico de equilibrio general computable y a partir de él se comparan diferentes escenarios que podrían acercar a México a una matriz energética más sustentable y lograr sus metas de mitigación. En el primer escenario, se propone aumentar el impuesto existente a las emisiones de CO₂ de combustibles fósiles, con algunas modificaciones, y subir este impuesto paulatinamente hasta alcanzar los 100 dólares por tonelada. Esta política se mantiene en el resto de los escenarios. En el segundo, los recursos recaudados mediante este impuesto se redistribuyen a los agentes de manera que el impuesto no implique una variación de los ingresos del gobierno, es decir, que sea neutral en cuanto a la recaudación. El tercer ejercicio consiste en financiar con los impuestos recaudados la producción de equipos para la generación eléctrica con energía renovable, por ejemplo, paneles solares y turbinas eólicas, dando lugar a encadenamientos productivos. Los resultados de cada escenario con respecto al escenario tendencial se comparan para identificar el impacto económico de estas políticas.

El artículo está dividido en cuatro secciones. En la primera se discute la participación que ha tenido México recientemente en los acuerdos internacionales para la mitigación del cambio climático, así como los compromisos realizados. Además, se presentan las principales iniciativas federales respecto al sector energético para tener claras las propuestas actuales en torno a la energía, en general, y a la electricidad, en particular. En la segunda sección se expone el modelo a utilizar, así como su fundamentación teórica. En la tercera parte se describen las simulaciones y los resultados, y en la última se presentan algunas conclusiones e implicaciones de política pública.

2. México: Acuerdos internacionales y política energética interna

Durante la COP21 celebrada en Francia, en diciembre de 2015, se estableció un acuerdo internacional conocido como el Acuerdo de París, que busca mantener el aumento de la temperatura mundial por debajo de los 2 grados centígrados. Además, busca aumentar la capacidad de los países para hacer frente a los efectos del cambio climático y lograr que se financien acciones coherentes con un nivel bajo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y una trayectoria de crecimiento sensible al clima (United Nations Climate Change, 2018).

México, el segundo país de América Latina con más emisiones, se incorporó al Acuerdo de París en abril de 2016 (Gobierno de México, 2022). Como parte de esto, cada país elaboró metas de reducción de emisiones, llamadas Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés), las cuales deben ser actualizadas cada cinco años presentando avances significativos ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Las NDC incluyen tres componentes: un inventario de emisiones de gases de efecto invernadero, una estimación de la línea base, es decir, de la trayectoria esperada de las emisiones, y rutas de descarbonización sectoriales, entendidas como el conjunto de acciones y políticas concretas que se implementarán para alcanzar el objetivo (Iniciativa Climática de México, 2021). En 2015, en las primeras NDC, los compromisos establecidos se dividieron en dos grandes rubros, dependiendo del origen de los fondos de financiamiento: los compromisos “condicionados” requerirán financiamiento económico y tecnológico externo, mientras que los “no condicionados” serán implementados con recursos propios del país. En estas circunstancias, México se comprometió a reducir en 22% las emisiones GEI y en 51% las de carbono negro en un escenario no condicionado, mientras que de manera condicionada la reducción podría alcanzar hasta del 36% en emisiones GEI y un 70% en carbono negro (Pech, 2021).

El punto de partida son las emisiones de GEI de México en la línea base. A partir de estos números se hicieron proyecciones. En 2015 se estimaron las emisiones provenientes de cada sector y su crecimiento. La estimación del crecimiento esperado de las de los principales sectores entre 2015 y 2030 se puede observar en las columnas de la izquierda de la Tabla 1. La línea base y la proyección de emisiones realizada en 2020 están a la derecha. Las estimaciones de 2020 son mayores que las de 2015. Las NDC pactadas en 2020, son de 774 mtCO₂, también mayores a las de 2015 (Climate Action Tracker, 2022).

Costo de políticas hacia el cumplimiento de los NDC en México:
un análisis de equilibrio general

Tabla 1. Línea base, emisiones y metas de mitigación no condicionadas de GEI por sector para 2015 y 2020 (MtCO₂)

	Emisiones de GEI (MtCO ₂) NDC 2015				Meta a 2030 no condicionada	Emisiones de GEI (MtCO ₂) NDC 2020				Meta a 2030 no condicionada
	Línea Base					Línea base				
	2013	2020	2025	2030		2013	2020	2025	2030	
<i>Transporte</i>	174	214	237	266	218	174	201	225	250	ND
<i>Generación de electricidad</i>	127	143	181	202	139	149	166	174	186	ND
<i>Residencial y comercial</i>	26	27	27	28	23	26	26	27	28	ND
<i>Petróleo y gas</i>	80	123	132	137	118	73	70	93	101	ND
<i>Industrial</i>	115	125	144	165	157	124	149	173	199	ND
<i>Agricultura y ganadería</i>	80	88	90	93	86	98	106	114	122	ND
<i>Residuos</i>	31	40	45	49	35	44	50	52	56	ND
<i>USCUSB</i>	32	32	32	32	-14	21	36	42	49	ND
<i>Emisiones totales</i>	665	792	888	973	762	709	804	902	991	774

Fuente: Elaboración propia con base en Iniciativa Climática México (2021) y Climate Action Tracker (2022).

En la actualización de 2020 hubo poco progreso en las metas establecidas; incluso fue catalogada como “altamente insuficiente” por el Climate Action Tracker (CAT), un análisis científico independiente que evalúa la acción de los gobiernos que firmaron el Acuerdo de París (Méndez, 2021). De hecho, la línea de base fue ajustada al alza con un nivel total de emisiones superior al indicado en la NDC de 2015.

Según Méndez (2021), no se establecen acciones específicas en los sectores económicos clave para lograr las metas establecidas. Algunas organizaciones como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Comisión Europea han advertido sobre la necesidad de generar más avances, sobre todo en el sector energético, ya que es uno de los que más contribuye al cambio climático y donde existen mayores oportunidades de reducir emisiones.

El cumplimiento de las NDC se ve opacado con las políticas públicas realizadas por la administración actual en México, donde se ha apostado por el carbón, el combustóleo y el gas natural en vez de promover energías renovables. Tal es el caso de la reforma energética propuesta por el presidente López Obrador, la cual tiene como objetivo reposicionar a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en la producción y venta de electricidad. Esta reforma ha intentado modificar el esquema de generación eléctrica por varias vías: i) la definición de una política; ii) la modificación de la Ley de la Industria Eléctrica que fue aprobada por el legislativo, pero que se ha enfrentado a diversos amparos ganados por los particulares, y iii) un intento fallido de reforma constitucional. Estas propuestas y los cambios en la ley promueven mecanismos para modificar los criterios con los que se rige el mercado eléctrico en México.

La modificación a la política energética promueve el consumo de combustibles fósiles. En primer lugar, propone un cambio en el orden de despacho en generación eléctrica, que implica pasar de un criterio de asignación con base en costos marginales, donde las energías renovables tenían clara preferencia, a un esquema de asignación que da preferencia a la electricidad generada por la CFE y relega el papel de las energías renovables generadas por particulares. De acuerdo con el Plan de Negocios 2021-2025 de la CFE, la producción de energía a partir de renovables no está considerada de manera importante. En segundo lugar, implica una disminución en la efectividad de los certificados de energía limpia¹ como mecanismo de fomento a nuevas fuentes de generación limpia, al otorgar

¹ Conocidos como CEL, cada certificado ampara la generación de un megawatt hora de energía limpia.

certificados a centrales ya existentes. Finalmente, las reformas suspenden las subastas en el mercado eléctrico mayorista, que promovían criterios de eficiencia económica para la generación eléctrica, donde las renovables nuevamente se posicionaban de manera favorable respecto de aquellas con base en combustibles fósiles.

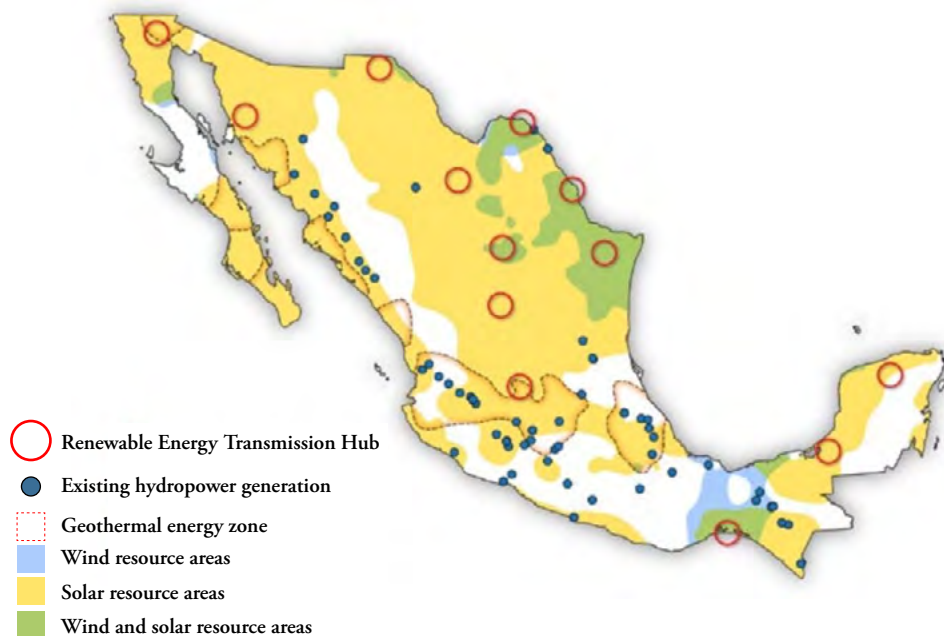
La reforma no considera un registro de contaminantes a la atmósfera para medir las afectaciones de la producción de electricidad. Sin propiciar las inversiones, con el control de la transición energética y con la apuesta por fuentes de energía contaminante, es difícil pensar que México cumplirá las metas de reducción de emisiones y uso de energías limpias. Anteriormente, la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) actuaba en consonancia con la Ley General de Cambio climático (LGCC) y la Ley de Transición Energética (LTE), donde la LGCC muestra el compromiso con la disminución de emisiones, la LTE el énfasis en disminuir las emisiones del sector eléctrico, y la LIE definía cómo lograr esa disminución, con el apoyo de los tres mecanismos: los CEL, las subastas y el orden de despacho. Los cambios a la ley rompen el enroque de estas tres leyes y se pierde la manera de lograr los objetivos de mitigación desde el sector eléctrico.

La política actual favorece el uso de combustóleo y carbón para la generación eléctrica. Actualmente, dado que son más contaminantes que el resto de los combustibles utilizados, representan más del 36% de las emisiones de GEI del sector eléctrico, mientras que son solamente el 25% de la energía fósil utilizada.² Además, son responsables de gran parte de la contaminación local por las emisiones de dióxido de azufre, material particulado (PM 2.5) y óxidos de nitrógeno. Estimaciones sobre la contaminación atmosférica en la región centro del país indican que solamente por emisión de PM 2.5 tuvo entre 8500 y 10 mil muertes al año (INSP, 2016). La región incluye el estado de Hidalgo, donde se encuentra la planta generadora de Tula, responsable de una fracción significativa de estas emisiones.

Las energías renovables serían una alternativa para atender la crisis climática. México cuenta con características geográficas y abióticas que favorecen la utilización de este tipo de energías. En 2021 el porcentaje de fuentes renovables para la generación de electricidad fue del 12% (British Petroleum, 2021). Sin embargo, la distribución de los sitios de aprovechamiento no es homogénea ya que existen estados como Colima, Morelos, Tlaxcala, Campeche, Tabasco y Ciudad de México que no producen energías renovables, mientras que Baja California Norte, Sonora, Coahuila, San Luis Potosí, Jalisco y Puebla aprovechan tres de los cuatro tipos de energías renovables producidos en el país—solar, eólica, geotérmica e hidráulica— (Inecol, s/f).

² Estimaciones realizadas con base en INECC (2018).

Figura 1. Localización del potencial de energía renovable en México



Fuente: Roca (2022).

Algunos de los tipos de energía renovable con más potencial en nuestro país son la energía eólica y la solar. Actualmente, existen 70 parques en operación ubicados en 14 estados, siendo Oaxaca, Tamaulipas y Nuevo León las entidades con más producción, que representan el 8.6% de la capacidad instalada. Además, la tecnología eólica redujo su costo entre 60 y 70% entre 2009 y 2019 (Asociación Mexicana de Energía Eólica, 2022). Respecto a la energía solar, el 85% del territorio tiene las condiciones óptimas de radiación, lo que ubica a México dentro de los 15 más importantes en generación de energía fotovoltaica. La capacidad instalada de las centrales eléctricas tuvo un incremento anual del 87% al cierre de marzo de 2020. Existen 67 parques solares de gran escala distribuidos en 16 estados; Chihuahua, Sonora y Durango son los que más plantas fotovoltaicas tienen (RER Energy Group, 2021).

Una vez discutido que existe el potencial en México para la generación eléctrica a partir de energía renovable, pasamos al siguiente apartado que describe el modelo que se usará para determinar los efectos económicos de políticas que acerquen al país al cumplimiento de sus NDC.

3. El modelo y sus fundamentos teóricos

Para proponer un conjunto de políticas energéticas y ambientales es fundamental contar con modelos que permitan evaluar sus impactos antes de instrumentarlas, de manera que estas se diseñen de tal forma que los resultados de un mejor uso de los recursos y la reducción de emisiones se logren al menor costo económico y social posible.

El modelo aquí empleado es uno de equilibrio general computable de la economía mexicana que simula, a través de ecuaciones simultáneas, el funcionamiento de los mercados y su impacto macroeconómico. Para ello, describe la oferta y demanda de bienes y servicios, analiza el impacto de cambios en la producción y el consumo sobre los diferentes grupos de ingreso, así como el comercio internacional.

3.1 Los actores del modelo

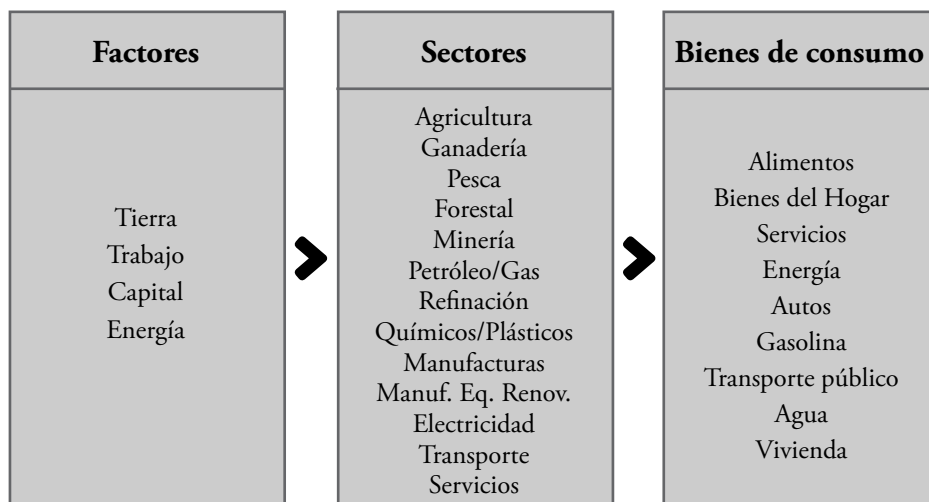
El modelo está compuesto por cuatro actores: los consumidores, los productores, el gobierno y el resto del mundo o el sector externo. Cada uno de ellos tiene una función distinta. Los productores están organizados en 13 sectores y los consumidores están agrupados en cuatro agentes, definidos por el nivel de ingreso. Tanto el gobierno como el sector externo se modelan cada uno como actor separado.

3.1.1 Productores

El modelo es a nivel nacional y tiene 13 sectores productivos (agricultura, ganadería, pesca, forestal, minería, petróleo y gas natural, refinación, electricidad, manufacturas, manufactura de equipos para renovables, químicos y plásticos, transporte, servicios) que producen 14 bienes, pues el petróleo y el gas se producen dentro de un mismo sector (Figura 2).

La producción de los distintos bienes y servicios son modelados por medio de una función de producción, la cual incluye como insumos al capital, trabajo, materiales

Figura 2. Proceso productivo y transformación en bienes de consumo



Fuente: Elaboración propia.

y energía. Los ingresos del trabajo y del capital corresponden a los consumidores, que son los dueños de esos factores de producción.

La producción en cada sector para cada período se representa a través de una función de elasticidad de sustitución constante (CES) de capital, trabajo, energía y materiales, donde la elasticidad de sustitución varía entre cero e infinito. Entonces,

$$(1) V_t = \varphi_t [\delta_L L_t^{(\sigma-1)/\sigma} + \delta_K K_t^{(\sigma-1)/\sigma} + \delta_E E_t^{(\sigma-1)/\sigma} + \delta_M M_t^{(\sigma-1)/\sigma}]^{\sigma/(\sigma-1)}$$

donde V_t es el valor agregado de la producción en el período t , σ es la elasticidad de sustitución entre insumos que se estima de manera econométrica para los distintos sectores, φ_t es un parámetro de eficiencia que se aplica a toda la función de producción, L_t es el trabajo en el período t , K_t es el capital en el período t , E_t es la energía en el período t , M_t son los materiales en el período t , las δ son los parámetros de participación relativa de cada factor tal que

$$\delta_L, \delta_K, \delta_M, \delta_E > 0 \text{ y}$$

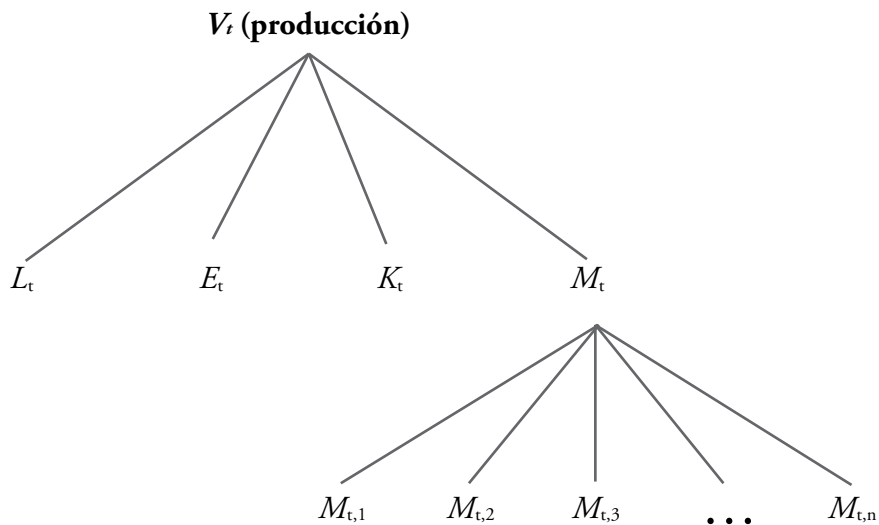
$$\delta_L + \delta_K + \delta_M + \delta_E = 1$$

Para simplificar, el precio de todos los bienes se fija igual a 1, por lo que V_t se refiere tanto a la cantidad producida como al valor de la producción.

Los insumos materiales, M_t , no representan un solo factor sino una gama de insumos de los distintos sectores productivos, por lo que en el modelo M_t es un bien compuesto producido a partir de una función de producción CES anidada, cuyos argumentos son los insumos de los distintos sectores productivos del modelo. Esto se muestra en la Figura 3, donde la producción total de un bien genérico, V_t , se muestra en la cúspide de la figura. La elasticidad de sustitución entre distintos tipos de insumos puede ser distinta.

Estas funciones anidadas se usan tanto para la producción como para el consumo, permitiendo distintos grados de sustitución entre insumos o bienes y servicios.

Figura 3. Función de producción anidada de un bien genérico



Fuente: Ibarrarán y Boyd (2006).

En el caso de la producción permite la sustitución entre trabajo, capital y energía, así como entre insumos energéticos y no energéticos. También permite la sustitución entre combustibles.

3.1.2 Consumo

Por el lado de la demanda, el modelo refleja el comportamiento de los consumidores nacionales y extranjeros (quienes también pueden invertir a través de sus ahorros), así como el del gobierno. Los consumidores adquieren bienes de consumo producidos por los productores, que en este caso son los mostrados en el último recuadro de la Figura 1, es decir, alimentos, bienes del hogar y otros bienes, servicios al consumidor, energía, autos, gasolina, transporte público, agua y vivienda.

Por su parte, los consumidores nacionales se dividen en cuatro categorías o agentes de acuerdo con el nivel de ingreso en el hogar. El Agente 1 está constituido por el 20% más pobre, el Agente 2, por el 30% que le sigue, el Agente 3 por el 30% de mayor ingreso relativo y el Agente 4 por el 10% más rico.

Cada agente consume distinto, y esto se construye a partir de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH). Los cuatro grupos son dotados con el factor trabajo. Debido a que las personas de altos ingresos son los únicos que tienen ahorros formales en México, de acuerdo con información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se asume que solo los agentes 3 y 4 tienen ingresos por capital. El ingreso bruto de cada grupo se incrementa a lo largo del tiempo en función de la tasa de crecimiento poblacional según el Consejo Nacional de Población (Conapo), la tasa de cambio tecnológico y el incremento en la productividad del capital (OCDE). La pertenencia a un determinado grupo de ingreso está determinada, y aunque el ingreso de los grupos se incremente (o disminuya) con el PIB, los individuos no migran de un grupo a otro.

El capital es prestado a las empresas a una tasa de interés. Este ingreso recibido por los distintos grupos se puede usar para financiar la compra de bienes y servicios nacionales e importados, ahorrar o pagar impuestos al gobierno.

La función de utilidad total para el agente c está dada por:

$$(2) U_c = \sum_t U_{c,t}(X_{c,t}, R_{c,t}) * (1 + \rho)^{-t} \quad t = 1, \dots, n$$

donde U_c es la función de utilidad del hogar c a lo largo de n períodos, $U_{c,t}$ es la utilidad derivada del consumo de bienes y servicios, $X_{c,t}$ (un vector de dimensión

7) y ocio $R_{c,t}$, y donde ρ es la tasa de descuento (o de preferencia intertemporal).³ Cada U_c es una función de utilidad CES anidada, definida para todos los bienes de consumo para todos los períodos.⁴ El valor de la utilidad del hogar está dado por la sumatoria del valor del consumo y del ocio (Ballard et al., 1985).

La función de gasto de cada consumidor está dada por:

$$(3) \sum_{t=1}^n (TG_{c,t} + TF_{c,t} + (P_{L,t} * L_{c,t}) + (r * K_t * S_{c,t})) = \sum_{t=1}^n ((INV_t * S_{c,t}) + (P_{I,t} * X_{c,t}) + (P_{L,t} * R_{c,t}))$$

donde las dotaciones están del lado izquierdo de la ecuación y los gastos en el lado derecho. $TG_{c,t}$ y $TF_{c,t}$ representan las transferencias a los consumidores del gobierno y del sector externo; $P_{L,t}$ es el precio del trabajo neto de impuestos y r es la renta del capital. K_t es el nivel del acervo de capital en el período t ; $S_{c,t}$ es la proporción del capital total que corresponde al consumidor c , INV_t es la inversión total en el período t ; y $P_{I,t}$ es el vector de precios brutos de los bienes de consumo. Las transferencias a los consumidores, tanto del gobierno como del sector externo (ingresos netos del extranjero), y el ingreso del trabajo y del capital se pueden destinar al ahorro, al consumo de bienes y servicios y al consumo de ocio.

La maximización de las funciones de utilidad para cada consumidor (2) con respecto a la restricción presupuestal en cada caso (3) determina simultáneamente la demanda por cada uno de los bienes de consumo, la cantidad ofrecida de trabajo, el nivel de ahorro y de inversión en cada período.

³ Para descartar la posibilidad de un Juego Ponzi se asume que el mercado crediticio pone un límite al endeudamiento del consumidor. Esto se refleja en la restricción de que el valor presente de los activos del consumidor debe tener un valor no-negativo.

⁴ Para este análisis, todos los consumidores tienen una función de elasticidad de sustitución intertemporal constante; los valores de esta elasticidad son consistentes con la evidencia empírica.

3.1.3 Gobierno

El gobierno se trata como un agente separado (Ballard et al., 1985). Se modela con una función de gasto parecida a la de los consumidores basada en una función de utilidad constante. Las funciones que lo describen son:

$$G_u = x_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2} x_i^{\alpha_i} x_n^{\alpha_n}$$

$$(4) \sum_i \alpha_i = 1$$

$$E = \prod_{i=1}^n P_i^{\alpha_i}$$

donde G_u es la función de utilidad del gobierno y α_i representa la participación factorial de los distintos sectores. Las x_i son las unidades del bien comprado por el gobierno; E es el gasto total del gobierno, y P_i son los precios de mercado de los bienes producidos adquiridos por el gobierno.

3.1.4 Sector externo

El comercio internacional se modela por medio de un agente o consumidor extranjero. Cada uno de los sectores productivos exporta al agente extranjero a cambio de importaciones. Bajo este escenario, el nivel agregado de importaciones es predeterminado y crece de acuerdo con la tasa de crecimiento constante, pero el nivel de importaciones individuales puede variar en respuesta a los cambios en los precios relativos. Las exportaciones son endógenas y se asume que siguen un crecimiento también constante. Sin embargo, son sensibles a los cambios en los precios y pueden modificarse cuando los sectores individuales se vean afectados. Por otro lado, los pagos de transferencia son endógenos y se definen dentro del modelo. Estos montos se ajustan automáticamente para garantizar que hay equilibrio en la economía, es decir, no hay excedentes en el modelo.

La balanza comercial está dada por:

$$(5) \quad \sum (P_{m,t} * IM_{j,t}) = \sum (P_{j,t} * EX_{j,t}) + \sum TF_{c,t} \quad t=1, \dots, n$$

donde $IM_{j,t}$ es un vector que representa la cantidad de cada bien importado; $P_{m,t}$ es el vector de precios de los bienes importados, $EX_{j,t}$ es el vector de bienes exportados, $P_{j,t}$ es el precio total de los bienes importados, incluyendo aranceles, y $TF_{c,t}$ es el nivel de transferencias que puede ser positivo, negativo o cero.⁵

⁵ Aquí se pueden reflejar los recursos provenientes del exterior a manera de préstamo que pueden afectar el presupuesto.

3.1.5 Crecimiento de la fuerza laboral y formación de capital

De manera formal, el crecimiento efectivo de la fuerza laboral en el tiempo está dado por:

$$(6) L_{t+1} = L_t(1 + \gamma)$$

donde γ refleja conjuntamente el crecimiento en el tiempo de la población y el crecimiento de la productividad del trabajador promedio (Barro y Xala-i-Martin, 1995). Se asume que esta tasa de crecimiento poblacional permanece constante a lo largo del análisis.

La tasa de crecimiento del capital se modela de acuerdo con la teoría del capital y se representa a partir de un sistema de tres ecuaciones. Para cada período se tiene que:

$$(7) P_{A,t} = P_{k,t+1} \quad t = 1, \dots, T$$

donde $P_{A,t}$ es el precio (agregado) ponderado del consumo, neto de impuestos (es decir, el promedio ponderado de los $P_{l,t}$'s) y $P_{k,t+1}$ es el precio del capital del siguiente período neto de impuestos. Esto significa que el costo de oportunidad de adquirir una unidad de capital en el siguiente período es una unidad de consumo en el período actual. También se tiene que:

$$(8) P_{k,t} = (1 + r_t) P_{k,t+1} \quad t = 1, \dots, T$$

que significa que el precio del capital en este período, $P_{k,t}$, debe ser igual al precio de renta del capital en el siguiente período, $r_t * P_{k,t+1}$, más el precio del capital en el siguiente período, $P_{k,t+1}$. Por último,

$$(9) K_{t+1} = K_t(1 - \Delta) + INV_t \quad t = 1, \dots, T$$

donde Δ representa la tasa de depreciación e INV la inversión bruta. Esto implica que el acervo de capital en el siguiente período debe ser igual al acervo de capital de este período más la inversión neta. Conjuntamente, las ecuaciones 7 a

9 aseguran que el crecimiento económico sea consistente con el comportamiento de maximización de beneficios por parte de los inversionistas.

El proceso de calibración del modelo de equilibrio general dinámico requiere el uso de parámetros exógenos de tecnología y crecimiento poblacional γ , el rendimiento del capital r , y la tasa de depreciación de la economía, Δ . Con estos valores el programa calcula el valor de la tasa de descuento, ρ . Esta tasa de preferencia intertemporal se usa para descontar todos los precios y valores en los períodos subsiguientes al año base del modelo.⁶

3.1.6 Condiciones terminales

Para hacer que los consumidores no agoten todos sus recursos en el último período para el que se resuelve el modelo, se aplican las condiciones terminales de Lau, Pahlke y Rutherford (2002), donde se divide el problema en dos subproblemas, uno definido para el período finito de $t = 0$ a $t = T$ y otro de $t = T+1$ a $T = \infty$. Así, el primer problema es

$$(10) \quad \text{Max} \sum_{t=0}^T \left(\frac{1}{1+\rho}\right)^t U_{c,t}(X_{c,t}, R_{c,t})$$

sujeito a

$$(11) \quad \sum_{t=0}^T P_{A,t} X_{c,t} = \sum_{t=0}^T P_{L,t} \bar{L}_{c,t} + P_{k,0} K_{c,0} S_{C,t} - P_{k,T+1} \bar{K}_{c,T+1} S_{C,T+1}$$

y

$$(11a) \quad \bar{L}_{c,t} = L_{c,t} + R_{c,t} \quad \text{para todo } t = 0, 1, \dots, T$$

y el segundo problema es

$$(12) \quad \text{Max} \sum_{t=T+1}^{\infty} \left(\frac{1}{1+\rho}\right)^t U_{c,t}(X_{c,t}, R_{c,t})$$

sujeito a

$$(13) \quad \sum_{t=T+1}^{\infty} P_{L,t} X_{c,t} = \sum_{t=T+1}^{\infty} P_{L,t} L_{c,t} + P_{K,T+1} \bar{K}_{c,T+1} S_{c,t+1}$$

⁶ Para más información sobre la calibración, véase Barro y Xala-i-Martin (1995).

$$(13a) \quad \bar{L}_{c,t} = L_{c,t} + R_{c,t} \quad \text{para todo } t=T+1, \dots, \infty$$

donde ρ es la tasa de preferencia intertemporal, r_o y $K_{c,o}$ se refieren al valor de renta del capital y a la cantidad de capital antes del período terminal, r_{T+1} y $\bar{K}_{c,T+1}$ se refieren a estas variables después del período final, y $\bar{L}_{c,t}$ es el total del trabajo y el ocio para cada agente en el t -ésimo período. $P_{K,t}$ es el precio del capital neto de impuestos y, como antes, $P_{I,t}$ y $P_{L,t}$ son los precios de los bienes de consumo, netos de impuestos y el precio del trabajo, también neto de impuestos, respectivamente.

Ahora es necesario especificar la ecuación o el valor específico de $\bar{K}_{c,T+1}$. Se tiene que

$$(14) \quad INV_T / INV_{T-1} = Y_T / Y_{T-1}$$

donde Y_T da el valor del PIB en el período T .

3.1.7 Fuentes de información

El modelo está actualmente calibrado para 2018 usando diferentes fuentes. Del INEGI se obtuvo la Matriz Insumo-Producto de 2013, la información sobre los gastos del consumidor en bienes finales por categoría de ingreso a partir de la ENIGH, la información sobre importaciones y exportaciones, el gasto del gobierno y las estadísticas ambientales. En cuanto a las demás fuentes de información utilizadas, a reserva de su descripción a detalle en las referencias, provienen del Banco de México, de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, así como de fuentes internacionales como el Fondo Monetario Internacional. Por último, la elasticidad del precio de la demanda de petróleo y electricidad, así como las elasticidades de sustitución entre insumos para los distintos sectores productivos se tomaron de la literatura especializada.

3.1.8 Variables determinadas por el modelo

Las variables determinadas en el modelo son el PIB agregado y sectorial, la inversión, la acumulación de capital, la producción por sector, el consumo por sector y de los hogares, importaciones, exportaciones, precios y salarios relativos y tasas de interés, ingresos del gobierno vía recaudación, gastos presupuestales del gobierno, y el ingreso salarial total.

4. Simulaciones y resultados

Para esta investigación se realizaron varios ejercicios. El primero consistió en correr el modelo sin simular política alguna, generándose así el escenario tendencial, contra el cual se comparan los resultados de los demás escenarios. En el segundo ejercicio se introduce un impuesto al contenido de carbono de los combustibles fósiles. Este impuesto se mantiene para las siguientes simulaciones. En el tercero, la recaudación del impuesto al carbono se regresa a los consumidores a través de transferencias *lump-sum*. Finalmente, el cuarto ejercicio consiste en usar la recaudación proveniente del impuesto para fomentar el desarrollo de un sector de renovables en México. Todas las simulaciones se hacen para los próximos 15 años, lo que nos permite tener resultados para 2035, aproximadamente.

4.1 Escenario tendencial

En este caso se corrió el modelo sin cambios, no se hace un contrafactual y, por tanto, todas las variables se establecen para replicar sus valores reales en el año de referencia, que es 2018 y, a partir de ahí, crecen a una tasa constante, o en un estado estacionario, a lo largo del período de análisis que va desde 2020 hasta 2035.

El propósito de hacer esto es doble. Primero, nos permite verificar que los datos del modelo se hayan ingresado correctamente y que esté calibrado. En segundo lugar, nos brinda un punto de referencia para calcular los impactos económicos de los impuestos y la inversión que realizamos en simulaciones posteriores.⁷

4.2 Escenario 1. Impuesto al carbono

En nuestra primera simulación de políticas públicas examinamos los impactos económicos de instrumentar gradualmente un impuesto al carbono, que grava la producción de carbón, gas natural y petróleo de acuerdo con su respectivo contenido de carbono. El impuesto es inicialmente pequeño, pero se incrementa lentamente para que, al final de nuestro análisis, el carbono se grave con una tasa equivalente a 100 dólares por tonelada. Se reportan los cambios porcentuales con respecto a los valores en el escenario tendencial.

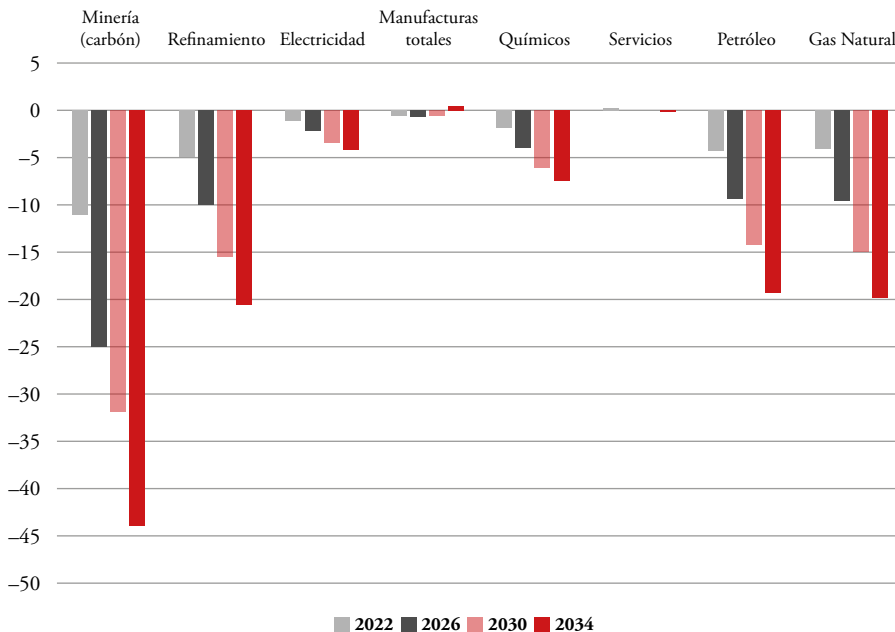
⁷ Es importante destacar que el modelo está calibrado para 2018, donde los cambios aspiracionales de la reforma energética de 2013 no se habían materializado en la economía mexicana. Por eso es razonable pensar que el ejercicio de prospectiva es válido con la matriz actual.

Como era de esperar, los mayores impactos ocurren en las industrias que están directamente gravadas. Por lo tanto, vemos que la producción de petróleo, gas natural y carbón cae a medida que aumenta el impuesto al carbono. Sin embargo, los impactos no se limitan únicamente a estas industrias.

Una ventaja de un modelo CGE como este es que puede medir el impacto directo e indirecto de una política determinada. Esto se ve más claramente cuando se observan los sectores de refinería y electricidad. Estas industrias tienen fuertes vínculos con los combustibles fósiles, por lo que también cae el valor de su producción tras un impuesto al carbono.

El consumo de gasolina también está estrechamente relacionado con su precio. Por lo tanto, no sorprende que, al aumentar el precio por la cantidad de carbono que contiene, su consumo disminuya y los consumidores gasten sus ingresos en bienes y servicios alternativos. Nuevamente, se puede observar cómo el impuesto va trasladándose a aquellos sectores que utilizan energía en sus procesos productivos, como el transporte y la elaboración de alimentos.

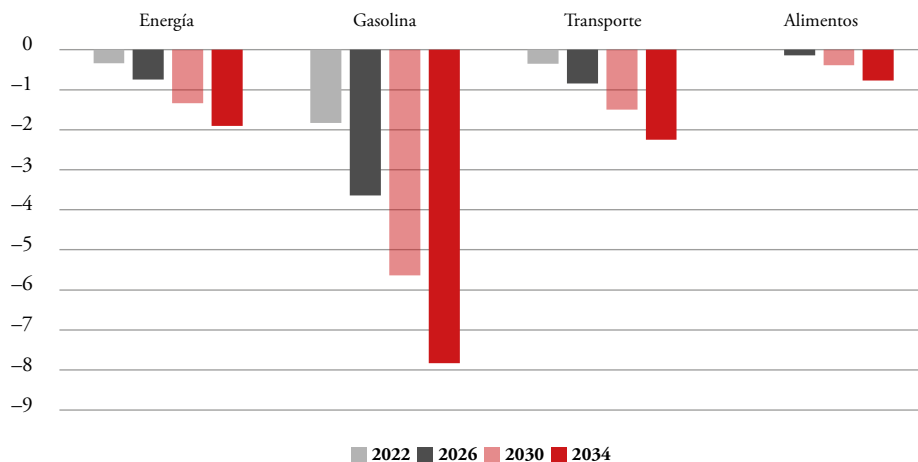
Figura 4. Cambio en la producción sectorial del impuesto al carbono



Fuente: Elaboración propia.

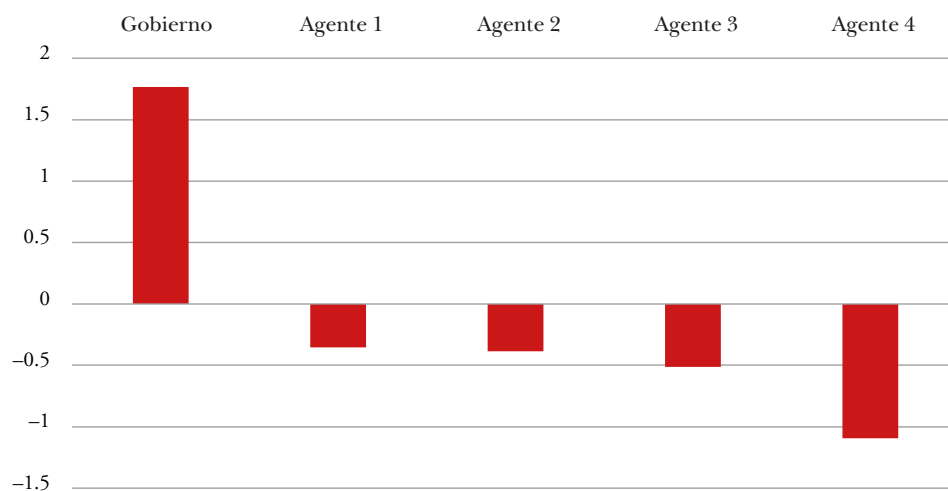
Ante precios más altos, los niveles de bienestar de todos los consumidores descienden. Estas pérdidas de bienestar, sin embargo, varían según el grupo de ingresos. En este sentido, el bienestar del grupo de ingresos más altos (es decir, el Agente 4) cae más que el de los otros. Esto se debe a que la mayor parte del capital en México está en manos de este grupo y las industrias de combustibles fósiles que enfrentan el impuesto son muy intensivas en capital.

Figura 5. Cambio porcentual en bienes de consumo con impuesto al carbono



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Impactos en bienestar del impuesto al carbono



Fuente: Elaboración propia.

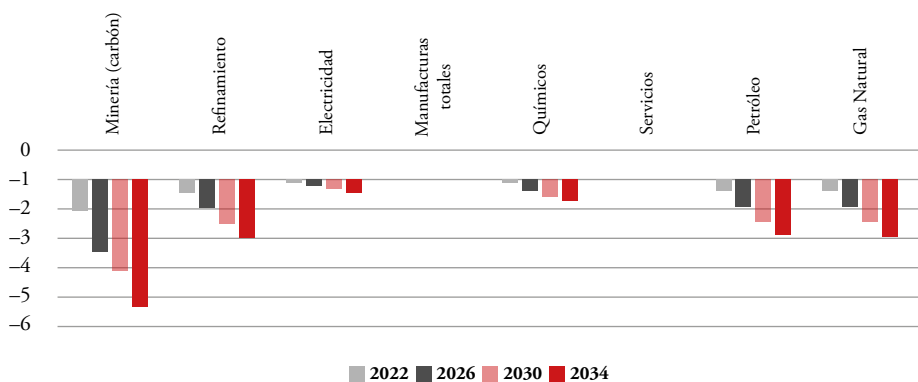
4.3 Escenario 2. Neutralidad en la recaudación del impuesto al carbono: transferencias *lump-sum* a los consumidores

La siguiente simulación es bastante similar al ejercicio anterior. Igual que antes, se establece un impuesto al carbono en aquellos sectores que producen combustibles fósiles y se incrementa gradualmente hasta alcanzar 100 dólares por tonelada de carbono. Este impuesto grava al gas natural, el carbón y el petróleo de acuerdo con su contenido de carbono. Los resultados también se comparan con los del escenario tendencial.

Ahora, sin embargo, los recursos recibidos por el gobierno a través de ingresos fiscales recaudados se devuelven a los cuatro agentes consumidores del modelo para reflejar neutralidad en la recaudación; es decir, que a pesar de los impuestos los ingresos del gobierno no aumentan. Estos se devuelven y cada agente recibe transferencias en proporción a su nivel de ingresos previo.

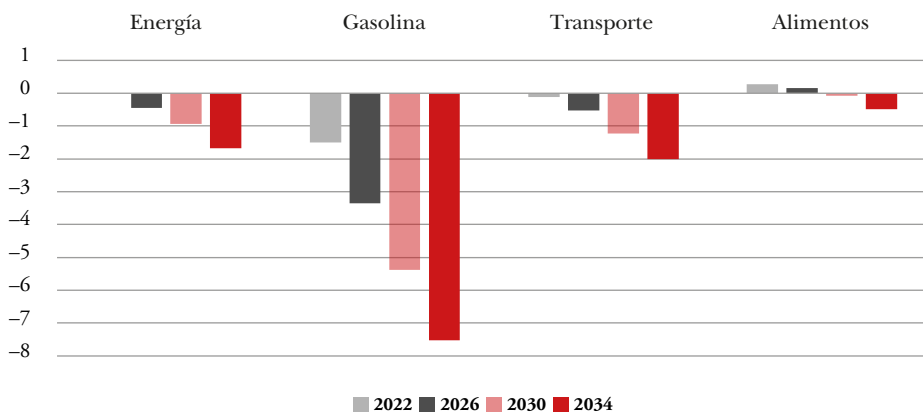
Dado que los impuestos al carbono son exactamente los mismos que en la simulación anterior, sus impactos en los sectores de producción y consumo son casi idénticos a los obtenidos anteriormente.

Figura 7. Cambio en la producción: impuesto más transferencias



Fuente: Elaboración propia.

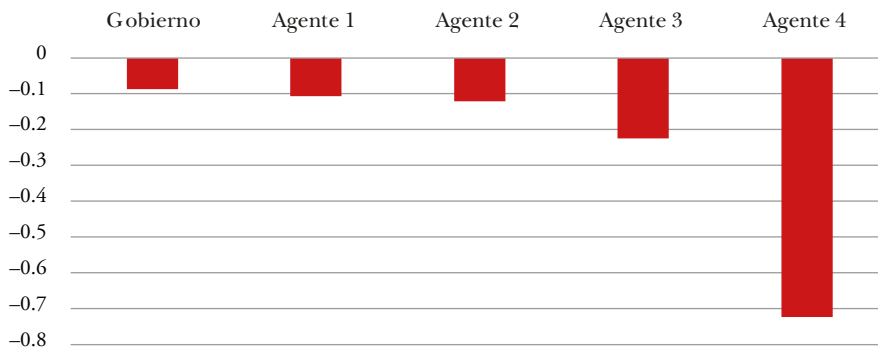
Figura 8. Cambio en el consumo: impuesto más transferencias



Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, se observan cambios en el bienestar de los cuatro agentes consumidores. Todos los grupos de agentes presentan un mayor nivel de bienestar que en la simulación anterior. No obstante, ninguno de ellos tiene tanto bienestar como en el caso de referencia. Esto se debe al hecho de que, como ocurre con casi todos los impuestos, la economía experimenta una pérdida social en el bienestar que el modelo calcula.

Figura 9. Impacto en bienestar: impuesto mas transferencias



Fuente: Elaboración propia.

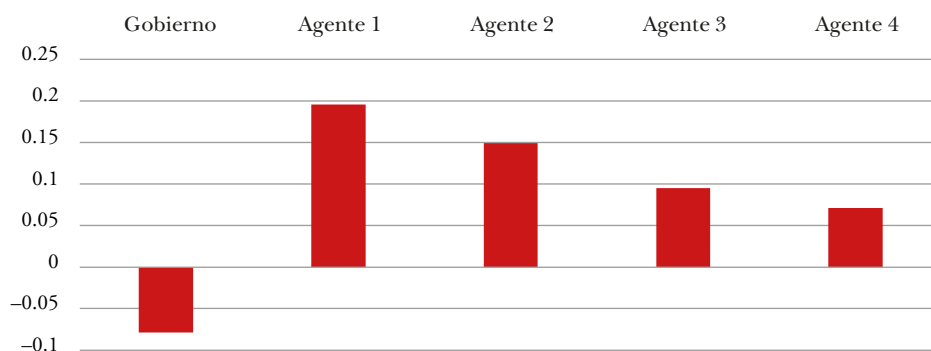
Este modelo no calcula ganancias de bienestar que resultan de menos emisiones. Estas ganancias incluyen una mejor salud, mejor visibilidad, aire y agua más limpios y reducciones en los gases de efecto invernadero. Si se contemplaran, estas ganancias serían mayores que las pequeñas cifras de pérdida social que hemos calculado.

4.4 Escenario 3. Impuestos e inversión en energía renovable

En este último ejercicio se simula una política fiscal y una de inversión. Para mayor precisión, en esta simulación se fija un impuesto al carbono al igual que en las dos simulaciones anteriores. Ahora, en cambio, se usan los fondos obtenidos mediante la recaudación de este impuesto a fin de invertir en la manufactura de equipos para la generación con energías renovables. Tanto la producción de renovables como el capital empleado para la construcción de equipos en este sector están subsidiados. Además, los insumos de capital y electricidad son altamente sustituibles y hay un cambio tecnológico pequeño, aumentando paulatinamente su productividad.

Como se puede observar, el nivel de bienestar de cada uno de los cuatro agentes consumidores es superior al de la simulación anterior. De hecho, el nivel de bienestar total de todos los agentes combinados es ligeramente más alto que en el escenario tendencial. El cambio tecnológico, al parecer, es un poderoso estímulo para el crecimiento económico incluso si se aplica en pequeñas dosis.

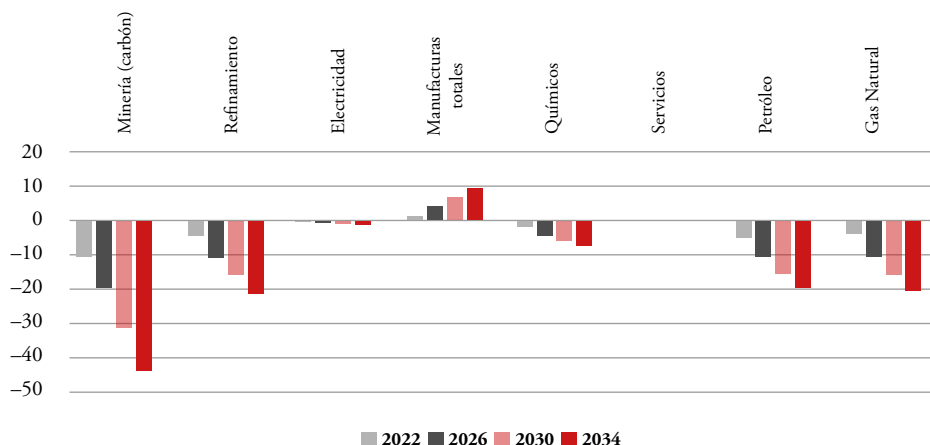
Figura 10. Impacto en bienestar: impuesto e inversión en renovables



Fuente: Elaboración propia.

Por lo demás, nuestros resultados son, más o menos, similares a los de la simulación anterior. Como antes, la producción de combustibles fósiles se reduce. De hecho, la producción de los sectores de extracción y refinación de petróleo y gas desciende levemente de los niveles que tenían cuando había una transferencia *lump-sum* a los cuatro agentes. La diferencia radica en que en esta simulación otros sectores productivos que se veían afectados por el impuesto, como manufacturas y servicios, no observan una disminución en la producción. En otras palabras, el impuesto está eliminando las distorsiones en sectores con altos niveles de emisiones, mientras que el resto de las políticas permite mitigar los efectos no deseados de esta política.

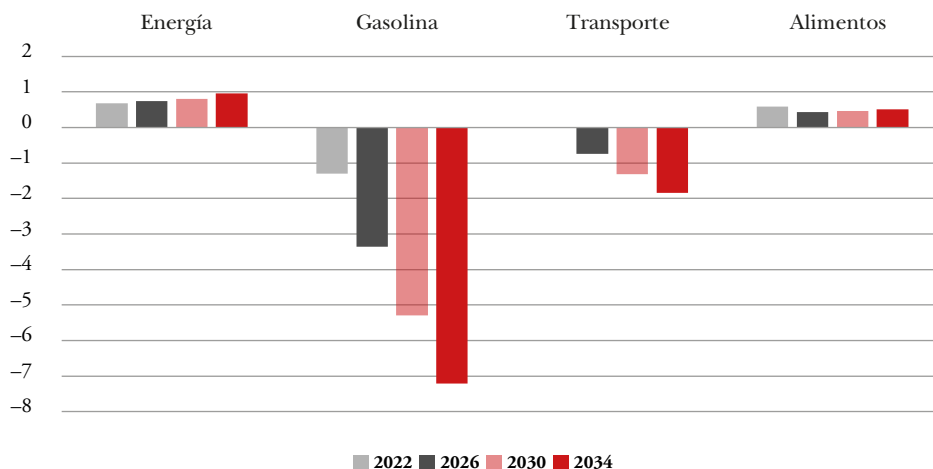
Figura 11. Impacto en producción: impuesto e inversión en renovables



Fuente: Elaboración propia.

En algunos aspectos, sin embargo, los resultados obtenidos son un poco complejos. Tanto la producción de electricidad como el consumo de gasolina son un poco más altos que antes. Esto ocurre porque el aumento en el bienestar y en el PIB (provocado en gran medida por el cambio tecnológico) aumenta el poder adquisitivo de los agentes consumidores, y utilizan parte de este nuevo “ingreso” para comprar bienes como energía.

Figura 12. Consumo de bienes: impuestos e inversión en renovables



Fuente: Elaboración propia.

Estas consecuencias no deseadas pueden, por supuesto, remediarse con más políticas fiscales y regulatorias. No obstante, se deben evitar estas consecuencias cuando se diseña inicialmente la política. De hecho, se puede decir que esta es una de las principales ventajas de utilizar un análisis de equilibrio general computable como el aquí presentado.

5. Conclusiones, implicaciones y algunos pendientes

Esta serie de simulaciones tiene como objetivo analizar el efecto de distintas políticas para poner a México en una senda de menores emisiones a partir de la reducción de combustibles fósiles. Para lograrlo, se propone una serie de políticas para desincentivar el uso de combustibles fósiles, tanto en la producción como en el consumo, así como políticas que sean capaces de paliar los efectos en el bienestar de la población. Solo así podremos alcanzar las metas del Acuerdo de París, con sendas de crecimiento congruentes con el bienestar de la población.

El análisis parte de medir los efectos de un impuesto al contenido de carbono de los combustibles fósiles y compararlo con el escenario tendencial. Como sería de esperar, se observa una reducción en la producción, el consumo y el bienestar

de los diversos grupos de ingreso, ya que se elevan los costos de producción y consumo, sin políticas complementarias. Posteriormente, se analizó el caso de utilizar los recursos obtenidos del impuesto al carbono y reembolsarlos a los agentes mediante transferencias para así lograr la neutralidad en la recaudación. Los resultados son similares en producción y consumo, pero al redistribuirse los recursos de manera que el gobierno no gane, los hogares disminuyen significativamente su pérdida en bienestar.

Por último, en el caso de que la recaudación del impuesto se utilice para financiar la manufactura de equipos para la generación con renovables, hay ganancias en bienestar, que además son progresivas, donde el agente 1 y 2, es decir, el 20 y el 30% siguiente más pobres son los que más ganan. Esto se debe a que el uso de los recursos permite, por un lado, mitigar el efecto del impuesto, pero también promover el desarrollo del sector de renovables, que presenta mayores rendimientos y genera una alternativa para la provisión de energía.

Este ejercicio da luz sobre la necesidad de hacer políticas compensatorias simultáneamente con la introducción de instrumentos económicos, como los impuestos al contenido de carbono de los combustibles fósiles. Sin ello, los costos económicos y sociales son muy grandes. Esta, como cualquier política, debe ser diseñada y rectificadas previo a su aplicación a fin de que cumpla con los objetivos para los cuales ha sido pensada.⁸

México no puede dejar de lado que ha firmado acuerdos internacionales y ha comprometido metas de mitigación de gases de efecto invernadero. Más allá del valor de sus compromisos en la arena internacional, el cambio climático es algo que nos afecta a todos. Año con año, en distintos puntos del país, se observan huracanes, incendios, sequías e inundaciones, así como altas temperaturas; si bien siempre ha existido este tipo de eventos, los recientes son cada vez más extremos y frecuentes, como está ampliamente documentado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático. Al menos por esto es urgente revertir nuestra política energética y ambiental en pro de menores emisiones. La única salida para México es contribuir de manera decidida a mitigar el cambio climático, por nuestro propio futuro y por uno global.

⁸ Es necesario tomar en cuenta que en las actuales circunstancias, de crisis energética mundial, la recomendación de aumentar el impuesto a la producción y emisión de carbono no es viable. Sin embargo, esta es una situación coyuntural, por lo que el ejercicio presentado sigue siendo relevante.

Referencias

- Asociación Mexicana de Energía Eólica (2022). *El viento en números*. Asociación Mexicana de Energía Eólica. <https://amdee.org/el-viento-en-numeros.html>
- Ballard, C., Fullerton, D., Shoven, J. y Whalley, J. (1985) *A General Equilibrium Model for Tax Policy Evaluation*. Chicago, University of Chicago Press.
- Barro, R. J. y Sala-i-Martin, X. (1995). *Economic growth*. Nueva York, McGraw Hill.
- British Petroleum (2021). *Revisión Estadística de la energía mundial 2021* (Edición 70). British Petroleum. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>
- Climate Action Tracker. (2022). *México Summary*. CAT Climate Target Update Tracker. <https://climateactiontracker.org/climate-target-update-tracker/mexico/>
- Gobierno de México (junio de 2022). *Tratados internacionales*. Secretaría de Relaciones Exteriores. https://aplicaciones.sre.gov.mx/tratados/muestra-tratado_nva.sre?id_tratado=1517&depositario=0
- Ibarrarán, M. E. y Boyd, R. G. (2006) *Hacia el Futuro: Energy, Economics and the Environment in 21st Century*. Springer.
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) (2018). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015* (INEGYCEI). INECC.
- INECOL (Instituto de Ecología) (s/f). *Energías renovables en México*. INECOL. <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2017-06-26-16-35-48/17-ciencia-hoy/1526-energias-renovables-en-mexico>
- Iniciativa Climática de México (2021). *Rumbo a la COP26. Boletín: Las metas de México en el Acuerdo de París. Boletín #2*. Iniciativa Climática de México. https://www.iniciativaclimatica.org/wp-content/uploads/2021/08/COP26-T2_NDCs.pdf
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2013). *Matriz Insumo-Producto 2013. Matriz de insumo producto*. <https://www.inegi.org.mx/temas/mip/>

- INEGI (2020). *Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2020*. Presentación Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH). 2020 Nueva serie. <https://www.inegi.org.mx/programas/enigh/nc/2020/>
- INEGI (2021). *Censo de Población y Vivienda. Censo de Población y vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- INSP (Instituto Nacional de Salud Pública) (2016). *Estimación de impactos en la salud por contaminación atmosférica en la región centro del país y alternativas de gestión*. SEMARNAT-INECC. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/208105/INECC_CAME_Final_14022017.pdf
- Lau, M., Pahlke, A. y Rutherford, T. (2002). Approximating Infinite-horizon Models in a Complementarity Format: A Primer in Dynamic General Equilibrium Analysis, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 26, 577-609.
- Méndez, V. (2021). *El Estado mexicano y la falta de ambición de sus compromisos climáticos*. AIDA. <https://aida-americas.org/es/blog/el-estado-mexicano-y-la-falta-de-ambicion-de-sus-compromisos-climaticos>
- Pech, R. (2021). *¿Qué compromisos tiene México sobre Cambio Climático? Energía hoy*. <https://energiahoy.com/2021/02/08/que-compromisos-tiene-mexico-sobre-cambio-climatico/>
- RER Energy Group (2021). *México entre los países con incremento en su capacidad de energía solar*. RER Energy Group. <https://rerenergygroup.com.mx/mexico-entre-los-paises-con-incremento-en-energia-solar/#:~:text=Seg%C3%BAn%20la%20Asociaci%C3%B3n%20Mexicana%20de,mes%20de%20marzo%20de%202020>
- Roca, José A. (2018). NREL identifica abundantes recursos de energía renovable claves para los objetivos de energía limpia de México. *El periódico de la energía*. <https://elperiodicodelaenergia.com/nrel-identifica-abundantes-recursos-de-energia-renovable-claves-para-los-objetivos-de-energia-limpia-de-mexico/>
- United Nations Climate Change (2018). *¿Qué es el Acuerdo de París? Process and Meetings*. <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/que-es-el-acuerdo-de-paris>