



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN ECONOMÍA

FACULTAD DE ECONOMÍA - DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**ECONOMÍA DE LOS RECURSOS NATURALES
Y DESARROLLO SUSTENTABLE**

**PRECIOS SOMBRA DE LOS PRINCIPALES GASES DE EFECTO INVERNADERO
POR SECTOR ECONÓMICO DE MÉXICO: 1995-2015**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

Doctora en Economía

PRESENTA:

Yetzi Jimena Romero Herrera

TUTOR:

Dr. Angel de la Vega Navarro
Facultad de Economía, UNAM

MIEMBROS DEL JURADO:

Dr. Juan de Dios Enrique Rosellón Díaz
Centro de Investigación y Docencia Económicas

Dra. María Eugenia Ibararán Viniestra
Universidad Iberoamericana Puebla

Dra. Rosario Haydee Pérez Espejo
Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM

Dr. Alonso Aguilar Ibarra
Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Septiembre de 2020.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México que me acogió desde los inicios de mi formación profesional en la Facultad de Economía.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico dado para la realización de esta investigación.

Al Dr. Angel de la Vega Navarro por su guía, acertada dirección e invaluable apoyo a lo largo de mis estudios de posgrado. Así como al Dr. Juan Rosellón y a la Dra. María Eugenia Ibararán por sus valiosas aportaciones para el desarrollo y conclusión de mi investigación.

A la Dra. Rosario Pérez Espejo y al Dr. Alonso Aguilar por la revisión y el enriquecimiento que recibió este trabajo a través de sus acertados comentarios.

A Jorge Luis por ser mi mayor aliciente, mi luz. A Tero, mi mamá, por su ejemplo, amor y fortaleza. A mi tío Yoy por compartir su conocimiento conmigo, sus enseñanzas, su sabiduría. A Luna por su fidelidad incondicional hasta el último momento.

A Javier, compañero de vida y colega, por escuchar mis ideas y dudas cada día que duró esta investigación, por fortalecer mi trabajo con tus comentarios, por acompañarme física y moralmente en esta parte importante de mi vida que fue el Doctorado.

ABREVIATURAS DE LOS 34 SECTORES DE LA ECONOMÍA MEXICANA

Administración pública y defensa, seguridad social	PAD
Agricultura, caza, pesca y silvicultura	AHFF
Bebidas, alimentos y tabaco	FBT
Bienes raíces	REst
Comercio al mayoreo, excepto equipo de transporte	WTC
Comercio al menudeo, excepto equipo de transporte; servicios de mantenimiento y reparación a viviendas	RTHG
Construcción	Cons
Coque y refinación de petróleo	CPN
Correo y telecomunicaciones	PTelecom
Educación	Edu
Electricidad, gas y suministro de agua	EGWSupp
Equipo de transporte	TransEq
Equipo eléctrico y óptico	EOE
Hoteles y Restaurantes	HR
Hule y plástico	RP
Intermediación financiera	FinInt
Madera y corcho	WP
Metales básicos	BM
Minería y extracción de petróleo	MQ
Otra maquinaria	Mach
Otras actividades auxiliares de transporte y agencias de viaje	OSTrA
Otras manufacturas y reciclaje	Manu
Otros minerales no metálicos	ONMM
Otros servicios comunitarios	OCSP
Papel, imprenta y publicidad	PP
Productos de piel y calzado	LFW
Productos químicos	ChP
Renta de maquinaria y equipo	RMEq
Salud y servicio social	HSW
Textiles	TP
Transporte aéreo	ATrans
Transporte marítimo	WTrans
Transporte terrestre	ITrans
Venta y reparación de equipo de transporte	SMVR

RESUMEN

Ante la necesidad de contener el cambio climático, países y organismos internacionales han establecido medidas que desincentiven el uso de combustibles fósiles y promuevan la mitigación de las emisiones generadas por las actividades humanas. La asignación de precios al carbono constituye un instrumento de política ambiental costo efectiva que facilita la imputación del costo externo de emisiones de efecto invernadero a los actores contaminantes, es mediante la asignación de precios al carbono. En este tenor, la presente investigación aborda la estimación de precios sombra de los principales gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 y N_2O) para treinta y cuatro sectores de actividad económica en México de 1995 a 2015 mediante un enfoque no paramétrico de la función distancia. Los resultados permiten identificar los sectores económicos que demandan mayor atención en materia ambiental en el país a partir de la estimación de dichos precios sombra, lo que constituye una estimación robusta del precio óptimo de los GEI por sector de actividad económica en el periodo de estudio.

ÍNDICE

Introducción	1
I. México en el contexto del cambio climático	5
I.1 Importancia de la participación de México en las políticas internacionales de cambio climático	6
II. Marco teórico	14
II.1 Los precios sombra como medida del costo social de los GEI	15
II.2 Revisión de la literatura.....	21
III. Metodología	26
III.1 Modelo para el cálculo del precio sombra.....	28
III.2 Modelo econométrico.....	31
IV. Datos empleados para el contraste empírico del modelo.....	33
V. Análisis empírico sectorial y las emisiones.....	41
VI. Estimación del modelo.....	49
VI.1 Análisis empírico de las variables mediante la estimación de la función translogarítmica	50
VI.2 Estimación del modelo de frontera estocástica	53
VI.3 Estimación de los precios sombra e interpretación preliminar.....	56
VI.4 Interpretación de los precios sombra.....	60
VI.5 Aplicaciones en política pública de los precios sombra	64
CONCLUSIONES	68
BIBLIOGRAFÍA.....	73
ANEXO A.....	78
ANEXO B.....	79
ANEXO C.....	80
ANEXO D.....	81
ANEXO E.....	83
ANEXO F.....	84

CUADROS Y FIGURAS

- Cuadro 1. 2012: Principales países emisores de GEI, porcentaje respecto al total mundial.
- Cuadro 2. Análisis básico de sectores de México, emisiones, PIB y multiplicadores, 2011.
- Cuadro 3. Elasticidades de la función de producción translogarítmica.
- Cuadro 4. Cociente de intensidad (producto/emisión) y Precios sombra sectoriales de la economía mexicana.
- Cuadro 5. Indicador de política pública e impuesto a las emisiones.
- Figura 1. Nivel eficiente de emisiones.
- Figura 2. Control de la contaminación costo efectiva con contaminadores heterogéneos.
- Figura 3. Esquema de la Frontera Eficiente.
- Figura 4. Relación del Producto y el CO₂.
- Figura 5. Relación del Producto y el CH₄.
- Figura 6. Relación del Producto y el N₂O.
- Figura 7. Relación del Producto y Capital.
- Figura 8. Relación del Producto y Trabajo.
- Figura 9. Relación del Producto y energía.
- Figura 10. Participación de cada sector en las variables empleadas.
- Figura 11. Histograma del CO₂.
- Figura 12. Histograma del CH₄.
- Figura 13. Histograma del N₂O.
- Figura 14. Variación de las tasas individuales de cambio tecnológico.
- Figura 15. Indicador de eficiencia por sector de la economía mexicana.

INTRODUCCIÓN

Los frecuentes eventos de crisis por motivos climáticos a nivel planetario, para el sentido común constituyen evidencia fáctica del calentamiento global originado por la actividad humana, cuyo debate alcanza el ámbito constitucional de los organismos internacionales relacionados y gobiernos preocupados por la sustentabilidad global de los ecosistemas. En ocasiones, el debate en los medios se sustenta en argumentos de mayor contenido político que científico. Sin embargo, gracias a los notables acuerdos internacionales impulsados por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), países comprometidos con políticas de Estado explícitas y efectivas, se lograron alcanzar las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDCs, por sus siglas en inglés) emanadas de los Acuerdos de París, las cuales adoptó cada nación (entre ellos México) para frenar las consecuencias catastróficas del cambio climático. Para alcanzar dichos objetivos fue necesaria la implementación de regulación pública y mecanismos económicos para fomentar la mitigación de las emisiones de efecto invernadero.

Para tal efecto, el precio del carbono se concibe como una herramienta que emplea mecanismos de mercado para internalizar el costo de emitir contaminantes hacia las fuentes de generación, bajo el principio “el que contamina paga”, con la finalidad de desincentivar el uso de combustibles fósiles altamente contaminantes, promover la inversión en tecnologías más limpias, cambiar los hábitos de consumo y procurar el cumplimiento de compromisos adquiridos en los acuerdos internacionales.

Bajo la perspectiva de las NDCs, un precio al carbono interno permite que los gobiernos, empresas y otros agentes fijen su propio precio del carbono en función de los factores empleados en sus respectivas actividades económicas y la forma más adecuada de estimarlo es mediante su precio sombra.

El precio sombra de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), se puede interpretar como el costo de oportunidad en términos de producción deseable que se sacrifica para disminuir la producción no deseable, de esta manera captura los

costos sociales que originan dichas emisiones y contribuye a mejorar la objetividad de las políticas de Estado al respecto; éstos toman mayor relevancia cuando el análisis se orienta hacia sectores económicos específicos, en lugar de estimarse a nivel nacional, pues mientras más agregados son los datos, mayor es el riesgo de enmascarar efectos contaminantes significativos o políticas regulatorias deficientes.

En este contexto, la presente investigación tiene el objetivo de estimar los precios sombra de los principales GEI (CO_2 , NH_4 y N_2O) para treinta y cuatro sectores de actividad de la economía mexicana de 1995 a 2015. Para el efecto se emplearon datos publicados por instituciones nacionales e internacionales como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), el Banco Mundial (BM) y World Input-Output Database (WIOD).

El enfoque utilizado para dicha estimación se sustenta en una función distancia de producción, que, a través del método paramétrico de frontera estocástica, genera la elasticidad de la función distancia de producción respecto al contaminante sobre la frontera de posibilidades de producción y por ende del precio sombra. Uno de los principales retos para la estimación de los precios sombra fue integrar la información requerida, de manera consistente y comparable, a un nivel de desagregación adecuado para identificar los sectores demandantes de mayor atención en materia de mitigación de emisiones.

Los precios sombra constituyen términos de intercambio social de externalidades ambientales que la sociedad enfrenta como consecuencia de las aspiraciones de crecimiento económico y progreso. Esta dicotomía es particularmente relevante en los países de menor desarrollo, pues se ven condicionados a importar tecnologías de las economías industrializadas, las cuales hoy en día se caracterizan como economías del conocimiento, es decir, con pleno dominio de tecnologías intensivas en un conocimiento profundo de la materia, la energía, la microelectrónica y la información, cuya tasa de innovación es vertiginosa e inalcanzable en las

condiciones políticas, educativas y económicas prevalecientes en los países de menor desarrollo.

Ante este escenario, las políticas ambientales de países como México se ven confrontadas por compromisos internacionales racionalmente indeclinables para reducir las emisiones de GEI, dados los alarmantes indicadores sobre el calentamiento global y sus costosas consecuencias, tales como la desertificación, la deforestación y la sequía, mientras que, paradójicamente también se intensifican las inundaciones de origen pluvial y aquellas originadas por fenómenos meteorológicos costeros. Más aún, no es novedosa la recurrencia de conflictos sociales en diversos países, independientemente de su grado de desarrollo, originados por grandes proyectos de inversión con implicaciones ecológicas que dan lugar a disputas por el suministro de agua y uso de suelo; como ocurre hoy en México en el caso de aeropuertos e infraestructura energética, agravadas por la ausencia o aplicación deficiente de políticas y métodos de valoración robustos acerca de los efectos ambientales, en el contexto de la planeación y evaluación de los proyectos de inversión, cuya efectividad, entre otras causas, se ve limitada precisamente por la falta de unidades de cuenta que reflejen los costos y beneficios sociales de las políticas y decisiones de inversión y financiamiento.

En este orden de ideas, esta investigación tiene como segundo objetivo, la motivación para estudiar, aplicar e ilustrar una metodología para la estimación de los precios sombra de los GEI, a fin de coadyuvar al desarrollo metodológico para la formulación y evaluación de proyectos de inversión, y para la determinación de parámetros de política ambiental en los mercados de emisiones.

De esta manera, el primer capítulo de este trabajo contextualiza la participación de México en las principales iniciativas internacionales sobre el cambio climático, así como su desempeño ante los compromisos adquiridos en los tratados internacionales más importantes, dado que la magnitud de emisiones del país no es despreciable con relación a sus homólogos latinoamericanos. A lo anterior, habría

que agregar los elevados y divergentes costos del cambio climático entre regiones del país, en función de su grado de desarrollo industrial y urbano.

En el segundo capítulo, se ubica y explica el tema de investigación dentro de la teoría del *mainstream* económico y sus ramas derivadas como la economía ambiental, al mismo tiempo se mencionan los trabajos más representativos para estimar los precios sombra de contaminantes bajo el enfoque neoclásico.

Posteriormente en el tercer capítulo se presenta *in extenso* el modelo para estimar la función distancia de producción mediante el lema dual de Shephard, que en conjunto con el modelo paramétrico permiten el cálculo de precios sombra objeto de esta investigación.

Para llevar a cabo la modelación de los precios sombra referidos, los datos empíricos para contrastar hipótesis constituyen una parte fundamental, por lo que en el capítulo cuarto se aborda la descripción de las variables utilizadas, la conformación de los inventarios de GEI, el nivel de detalle de éstas y el tratamiento aplicado al problema de homogenización de las bases de datos publicadas por distintas instituciones nacionales e internacionales.

Una vez estructuradas las variables que conforman la base de datos para el modelo, en el quinto capítulo se aborda el análisis empírico de las variables como primer acercamiento gráfico al fenómeno de estudio a fin de identificar el comportamiento entre las variables, su correlación estadística y su participación dentro de los sectores de actividad económica.

En el capítulo seis se presenta la estimación del modelo econométrico y el cálculo de los precios sombra objeto del presente estudio. Finalmente, en el último apartado se exponen los resultados obtenidos y conclusiones correspondientes.

I. MÉXICO EN EL CONTEXTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El IPCC define el cambio climático como el conjunto de alteraciones del estado natural del clima que puede observarse mediante variaciones climáticas promedio y/o por la variabilidad de sus propiedades durante un periodo prolongado, generalmente medidas en décadas o más; dicho fenómeno puede ser ocasionado por procesos naturales internos o por factores externos como ajustes en los ciclos solares, erupciones volcánicas, o por cambios atmosféricos persistentes de índole antropogénica, esto se ha traducido en un incremento gradual de la temperatura del planeta. (IPCC, 1990).

El cambio climático se ha convertido en el problema ambiental global más importante como consecuencia de actividades como la industrialización, agricultura y el cambio de uso suelo, dando como resultado un aumento en la concentración de dióxido de carbono atmosférico y de otros gases de efecto invernadero (GEI). Desde la era preindustrial, dichas emisiones de origen antropogénico han aumentado en un 70% tan solo entre 1970 y 2004 (IPCC, 2007, p. 3), como resultado del aumento en la actividad económica y la población. El 40% de estas emisiones permanecen en la atmósfera, el resto se desprenden de ésta para almacenarse en la tierra (plantas y suelo) y en los océanos (estos llegan a absorber el 30% de las emisiones antropogénicas de CO₂) causando la acidificación de los mares (IPCC, 2014, p. 4).

En la literatura relevante se advierte que el incremento en la concentración de GEI conllevará un aumento de la temperatura promedio global, acentuando el efecto invernadero más allá de lo que ocurriría con la concentración natural de estos gases. Asimismo, algunos impactos del cambio climático podrían intensificar el calentamiento del planeta, ya que con el aumento de la temperatura las plantas y el suelo absorberían menor cantidad de carbono de la atmósfera lo que eventualmente ocasionará el descongelamiento del permafrost y por ende la liberación de grandes cantidades de metano (Stern, 2006).

El calentamiento global altera el ciclo del agua, llevando a condiciones críticas los patrones de escasez y abundancia, lo cual incrementa el riesgo de sequías e inundaciones; en consecuencia, es probable que las precipitaciones se incrementen en zonas de latitudes altas, mientras que en las regiones con climas mediterráneos ocurrían reducciones significativas. Los efectos del cambio climático no se reflejan de la misma forma alrededor del mundo, algunos lugares del planeta se verán beneficiados por un ligero aumento en la temperatura. Sin embargo, mientras ésta siga aumentando, la mayoría de los países padecerán las consecuencias y el crecimiento económico global se verá afectado negativamente. De cumplirse el escenario de un aumento en la temperatura por arriba de los 2°- 3°C, el riesgo de un daño en escala mayor es potencialmente viable, lo que incrementaría abruptamente los costos asociados en términos de mortalidad, ecosistemas e ingresos (Stern, 2006, p. 63).

1.1 Importancia de la participación de México en las políticas internacionales de Cambio Climático

Debido a la ubicación geográfica de México entre dos océanos, así como por su latitud y relieves orográficos, el país se encuentra en condición de vulnerabilidad frente a los impactos del cambio climático, notoriamente expuesto a diversos fenómenos hidrometeorológicos. En México se han registrado cambios observables en el aumento medio del nivel del mar, en el rango de [1.9-0.6] mm/año, la precipitación pluvial anual mostró un aumento sostenido durante el siglo XX y la zona noroeste del territorio nacional muestra una elevación del calentamiento medio. En este tenor, los impactos del cambio climático en la economía resultan significativos, como lo señala el informe Stern al reportar que las pérdidas en el Producto Interno Bruto (PIB) mundial se ubican en el orden de 5 a 20% todos los años. Para México, las estimaciones dadas a conocer por el modelo de evaluación integrada del Centro de Ciencias de la Atmósfera indican que los impactos potenciales del cambio climático acumulados hasta el 2100 serán del orden de 20 veces el PIB actual del país (Gay, et al., 2010).

Ibarrarán y Boyd (2006) señalan que en la región norte de México (conformada por los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Chihuahua, Durango, Coahuila, Zacatecas, Nuevo León, Tamaulipas, y San Luis Potosí), se espera que el cambio climático incremente las sequías en un 36% (con base a datos proporcionados por el modelo Canadian Climate Center), mientras que el clima frío tenderá a desaparecer. Por su parte, la Sexta Comunicación Nacional señala que para el periodo 2015- 2039 las proyecciones estimadas para las temperaturas anuales al norte del país serán hasta 2°C mayores, mientras que en el resto del país oscilarán entre 1 y 1.5°C (INECC, 2018, p. 12). Al mismo tiempo, se espera que el nivel del mar se incremente por arriba de los 2 metros, causando serios daños en la Laguna del Río Bravo, Tamaulipas. Adicionalmente, la escasez de agua provocará problemas en las plantas hidroeléctricas y termoeléctricas, así como en las industrias cuyo principal insumo sea el agua como el caso de la minería y la industria acerera.

Entre otras consecuencias esperadas del cambio climático, parte del estado de Veracruz podría enfrentar un aumento en el nivel del mar de aproximadamente 2 metros, erosionando gran parte de su línea costera. De la misma manera, se espera que en las próximas décadas México experimente un incremento en la temperatura generalizada superior al 6% con relación a la media histórica, lo cual generará ondas de calor o disminución de rendimientos agrícolas por la pérdida de fertilidad del suelo (Semarnat, 2013).

Ante la vulnerabilidad del país frente al cambio climático y su alto costo social, México se ha comprometido desde la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1992) para tomar medidas concretas en cuestión de adaptación y mitigación de las emisiones de los GEI, cuyo objetivo es: “lograr (...) la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera en un nivel que impida interferencias antropógenas (sic) peligrosas en el sistema climático. Dicho nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la

producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible” (Naciones Unidas, 1992, p. 4).

Lo anterior se ve ratificado con la adhesión de México al Protocolo de Kioto el 9 de junio de 1998, cuya aplicación no entró en vigor sino hasta febrero de 2005 (Gobierno de la República, 2014a, p. 6), el cual tiene como propósito comprometer a los países industrializados a reducir sus emisiones de GEI, específicamente de dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), además de tres gases industriales fluorados: Hidrofluorocarbonos (HFC's), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF₆), a un nivel no menor de 5% para un periodo comprendido entre el año 2008 y 2012 (Naciones Unidas, 1998, p. 3).

Posteriormente, en México se promulgó la Ley General de Cambio Climático (LGCC), que tiene como objetivo establecer un marco jurídico para regular las políticas públicas de adaptación y mitigación al cambio climático, así como para impulsar la transición hacia una economía sustentable, competitiva y de bajas emisiones de carbono, a través de la inclusión de instrumentos de mercado, incentivos y otras alternativas que mejoren la relación costo-eficiencia de las medidas específicas de mitigación (Presidencia de la República, 2012).

A raíz de los compromisos firmados por México durante la Conferencia sobre Cambio Climático en París (COP 21), el país se ha fijado como objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en 22% por debajo de los niveles actuales para el año 2030, y 50% en relación con las del año 2000 para mediados de siglo, esta última meta conforme a la Ley General de Cambio Climático adoptada a nivel nacional en 2012 (Gobierno de la República, 2014b, p. 11).

Para la ejecución de la LGCC, se publicó la Estrategia Nacional de Cambio Climático Visión 10-20-40 (ENACC), en concordancia con los compromisos firmados por México en la COP 21, donde se describen los ejes estratégicos y las líneas de acción a seguir para orientar las políticas de los tres órdenes de gobierno y fomentar la corresponsabilidad con los diversos sectores de la sociedad.

Dentro de la ENACC se establecen los pilares de política nacional de cambio climático, entre los cuales se propone desarrollar políticas fiscales e instrumentos económicos y financieros con enfoque climático, los cuales deberán mandar señales económicas que reflejen el costo del daño ambiental de las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero mediante la creación de mercados de emisiones; para esto se requiere la participación de los sectores académicos, empresariales y sociales. De esta forma, el desarrollo de las políticas fiscales e instrumentos económicos con enfoque climático debe impulsar la promoción de un desarrollo económico bajo en emisiones y un alto nivel de competitividad (Semarnat, 2013, p. 27) .

En el contexto mundial, México, como muchos otros países tiene una participación relativamente baja dentro de las emisiones mundiales de GEI, tal como se puede observar en el Cuadro 1. Asimismo, se destaca que los 20 países con mayores emisiones generaron el 72% de las emisiones durante 2012. Sin embargo, esta primera interpretación puede ser un tanto sesgada si se considera que China y Estados Unidos (EEUU) contribuyeron con 35% de dichas emisiones para ese año, lo cual indicaría que para un análisis más imparcial dichos países deben considerarse por separado, en especial los EEUU después de las declaraciones respecto a su salida de los Acuerdos de París.

Con base en lo anterior, para 2012 los 18 países restantes (excluyendo EEUU y China) contribuyeron con 56.6% de las emisiones, es decir, las acciones emprendidas por este grupo de países tendrían efectos determinantes para disminuir las emisiones que exceden la capacidad de absorción del planeta. En el caso de México, se trata del segundo emisor de GEI dentro de los países de América Latina.

Cuadro 1. 2012: Principales países emisores de GEI, porcentaje respecto al total mundial

	Emisiones				PIB	
	2010	2011	2012	2012 sin/EEUU y China	Lugar en emisiones	Lugar en PIB (US\$ ctes)
China	22.0%	22.9%	23.3%		1	2
Estados Unidos	13.2%	12.4%	11.9%		2	1
India	5.4%	5.4%	5.6%	8.6%	3	9
Brasil	5.7%	5.6%	5.6%	8.6%	4	7
Rusia	5.1%	5.3%	5.2%	8.1%	5	11
Japón	2.7%	2.6%	2.8%	4.3%	6	3
Canadá	1.5%	2.0%	1.9%	3.0%	7	10
Alemania	1.9%	1.8%	1.8%	2.7%	8	4
Rep. Dem. Congo	1.6%	1.5%	1.5%	2.3%	9	99
Indonesia	1.5%	1.4%	1.5%	2.2%	10	16
Australia	1.5%	1.5%	1.4%	2.2%	11	13
Corea del Sur	1.2%	1.2%	1.2%	1.9%	12	14
México	1.3%	1.2%	1.2%	1.9%	13	15
Bolivia	0.2%	1.2%	1.2%	1.8%	14	105
Reino Unido	1.2%	1.1%	1.1%	1.7%	15	6
Myanmar	0.6%	1.0%	1.0%	1.5%	16	72
Rep. Centroafricana	1.0%	1.0%	1.0%	1.5%	17	168
Francias	1.0%	1.0%	0.9%	1.4%	18	5
Sudán	1.0%	0.9%	0.9%	1.4%	19	67
Italia	1.0%	0.9%	0.9%	1.4%	20	8
Total	70.5%	71.8%	71.8%	56.6%		

Fuente: Elaboración propia con datos de WIOD.

En dicho cuadro, también se puede apreciar la correlación de las emisiones con los niveles de producción de cada país. Esta correlación producción-emisiones varía mucho en algunos países. La posición que México posee a nivel mundial como generador de emisiones y el lugar que ocupa en función de su Producto Interno Bruto (PIB) pueden ser muy semejantes. Sin embargo, la diferencia que existe entre el lugar 13 de emisiones y el lugar 15 por PIB pone en evidencia que sus niveles de emisiones son mayores a su nivel de producción, ya que por una unidad generada de producción la emisión de GEI aumenta de manera más que proporcional. Esto debería tomarse en cuenta por los formuladores de política ambiental, ya que al hacer un análisis con mayor nivel de desagregación, se podrá apreciar que los diferentes sectores de actividad económica tienen un peso distinto en la producción y por ende en la generación de emisiones.

En el Cuadro 2 se presenta la información de mayor detalle para México, con un nivel de desagregación por sector de actividad económica para los 35 sectores que se considerarán en la presente investigación. Para cada uno de estos se muestra la

información de tres variables diferentes: i) emisiones de GEI en GgrCO₂eq., junto con la posición de cada sector dentro del total de la economía en función de dichas emisiones; ii) la producción de cada sector y su respectivo lugar dentro del total y, iii) los multiplicadores del producto para cada sector¹.

Cuadro 2. Análisis básico de sectores de México, emisiones, PIB y multiplicadores, 2011

Sector	GEI, Gigagramos de CO ₂ eq.		PIB Mill. US \$		Multiplicador del producto					
	Valor	Rank	Valor	Rank	Doméstico	Rank	Importado	Rank	Total	Lugar
Agricultura, caza, silvicultura y pesca	129,524	1	37,574	12	1.49	17	0.34	16	1.83	18
Minería y extracción	37,403	3	112,578	1	1.19	32	0.14	31	1.32	32
Alimentos, bebidas y tabaco	5,540	17	55,195	8	1.72	5	0.43	13	2.16	12
Textiles y ropa	3,048	22	6,289	28	1.64	8	0.65	7	2.28	8
Productos de piel y calzado	472	34	2,091	33	1.71	6	0.50	10	2.21	10
Productos de madera y corcho	527	33	2,029	34	1.69	7	0.34	17	2.03	15
Papel, pulpa, impresión y publicidad	3,567	18	9,123	24	1.57	12	0.50	9	2.06	14
Coque, refinación de petróleo y energía nuclear	36,184	4	6,595	27	1.98	1	0.19	25	2.17	11
Productos químicos	12,794	10	16,372	19	1.75	4	0.39	15	2.14	13
Caucho y plástico	1,699	29	5,063	30	1.61	10	0.79	5	2.40	3
Otros minerales no metálicos	27,796	5	10,409	23	1.53	15	0.29	18	1.82	19
Metales básicos y productos de metal	16,138	8	26,069	16	1.63	9	0.68	6	2.31	6
Maquinaria nec	942	32	5,563	29	1.48	18	0.89	3	2.37	4
Equipo eléctrico y óptico	3,523	19	12,693	21	1.37	22	1.70	1	3.08	1
Equipo de transporte	2,001	28	32,880	13	1.52	16	0.99	2	2.51	2
Manufactura nec.	3,404	20	6,601	26	1.53	14	0.83	4	2.36	5
Electricidad, gas y agua	124,031	2	13,607	20	1.75	3	0.56	8	2.31	7
Construcción	13,620	9	73,800	5	1.56	13	0.44	12	2.00	16
Venta, mantenimiento y reparación de vehículos	2,472	25	11,492	22	1.30	27	0.41	14	1.71	20
Comercio al mayoreo, excepto vehículos	3,220	21	93,993	2	1.27	29	0.19	26	1.46	30
Comercio al menudeo, excepto vehículos	9,995	11	84,619	4	1.25	31	0.18	27	1.42	31
Hoteles y restaurantes	6,919	14	24,186	17	1.34	24	0.15	29	1.49	26
Transporte terrestre	27,570	6	63,263	7	1.39	20	0.26	20	1.65	22
Transporte por agua	2,607	24	590	35	1.59	11	0.26	19	1.85	17
Transporte por aire	9,472	12	2,298	32	1.78	2	0.48	11	2.26	9
Otras actividades de transporte	2,264	27	8,695	25	1.31	26	0.17	28	1.48	29
Correos y telecomunicaciones	2,377	26	31,588	15	1.43	19	0.22	22	1.65	21
Intermediación financiera	1,042	30	50,083	10	1.38	21	0.11	32	1.49	27
Actividades de bienes raíces	950	31	93,712	3	1.11	34	0.05	34	1.16	34
Renta de maq. y eq. y otras act. de negocios	6,248	15	64,680	6	1.29	28	0.20	23	1.49	28
Administración pública	6,036	16	45,975	11	1.36	23	0.15	30	1.51	24
Educación	7,892	13	53,224	9	1.15	33	0.05	33	1.20	33
Salud	2,973	23	31,758	14	1.25	30	0.25	21	1.50	25
Otros servicios sociales	23,349	7	18,074	18	1.33	25	0.20	24	1.53	23
Servicio doméstico	0	35	5,039	31	1.01	35	0.00	35	1.02	35

Fuente: Elaboración propia con datos de WIOD

¹ Los multiplicadores del producto se generaron a partir de las matrices de insumo-producto multi-país provenientes de la base World Input Output Database (WOID). De acuerdo a Miller y Blair (2009, pág. 245) "un multiplicador del producto para el sector j se define como el valor total de producción en todos los sectores de una economía que es necesario para satisfacer el incremento de un dólar adicional de demanda final para la producción del sector j", en otras palabras, es el efecto de arrastre que tiene la producción de un dólar adicional de un bien o servicio final. Debido a las características de las matrices de WOID, es posible observar el efecto multiplicador tanto para la economía nacional como para el exterior, el cual resulta de la demanda de insumos importados. En el Cuadro 2 se presentan ambos efectos y el total que resulta de la suma de éstos.

El Cuadro 2 permite visualizar la diversidad de actividades económicas del país con sólo tres variables: PIB, emisiones y los efectos multiplicadores del producto. De esta forma, se puede apreciar que el sector “electricidad, gas y agua” es de los que más generaron emisiones en 2011, debido a las fuentes energéticas empleadas por el sector para la generación de electricidad; sin embargo, ocupa el lugar número 20 en la producción nacional. Pese a esto el sector tiene multiplicadores totales muy elevados y ocupa el 7º lugar nacional, de los cuales la mayor parte son domésticos. Esto significa que los efectos derivados de su producción se presentan esencialmente a nivel nacional, y que, por lo tanto, las emisiones resultantes de producir los insumos para proveer a este sector, también se verían reflejadas a nivel país.

Por otro lado, el efecto multiplicador total de este sector es muy elevado, lo que permite que ocupe el 7º lugar nacional. No obstante, dentro de este efecto la mayor parte es nacional (1.75 de 2.31), mientras que sólo tiene un efecto importador de 0.56. Esto significa que al incrementar en 1 millón de pesos la demanda del sector, la producción total de México se incrementará en 1.75 millones de pesos derivado de los requerimientos sectoriales para producir, mientras que el efecto en el exterior será de 0.56 millones por cada millón en que se incremente la demanda final. Por tanto se puede inferir que el sector de “electricidad, gas y agua” es un alto generador de emisiones, aunque su participación en el PIB de México es baja y sus efectos de arrastre son principalmente nacionales.

Otro ejemplo es el caso del sector “transporte terrestre” que ocupa el 6º lugar como generador de emisiones de GEI, por lo que se ubica como uno de los más contaminantes, mientras que en términos de producción se encuentra en el lugar número 7. Sin embargo, los efectos de arrastre de éste son pocos, tanto domésticos como en el exterior (1.65 en total de los cuales 1.39 son domésticos). Lo anterior sucede porque se trata de un sector de servicios de transporte que no requiere de grandes volúmenes de insumos para producir. Cabe señalar que la producción de vehículos, que ocupan una mayor cantidad de insumos se encuentra clasificado como “equipo de transporte”.

Con base en la literatura revisada se puede observar que la mayoría de los estudios son realizados para un solo sector de actividad económica, para grupos de empresas que pertenecen a una misma actividad económica, o bien a nivel agregado por país, lo cual oculta las diferencias sectoriales propias del proceso de producción, especialmente en economías menos industrializadas cuya producción de emisiones es menor por unidad de PIB (Dang & Mourougane, 2014).

II. MARCO TEÓRICO

En este contexto, el costo social² es una medida para valorar el impacto del cambio climático en el bienestar de las personas. Aún cuando se presenten impactos positivos a través de los efectos fertilizantes del dióxido de carbono en los cultivos, es de suma importancia considerar los efectos en el largo plazo que conlleva el cambio climático, especialmente en las regiones más precarias del planeta donde la vulnerabilidad es mayor.

En junio de 2016 durante el evento relacionado con el Plan de Acción de Colaboración de América del Norte sobre Clima, Energía Limpia y Ambiente, que se llevó a cabo en Ottawa, Canadá, como parte de las estrategias contra el cambio climático, Canadá, EE.UU. y México homologaron enfoques para calcular el costo social del carbono y de otras emisiones de gases de efecto invernadero para la evaluar los beneficios de las medidas de política de reducción de emisiones; por tal motivo es necesario que la metodología para calcular el costo social considerada en dicho plan de acción sea adecuada y que se apegue a la teoría económica para mejorar su efectividad en la disminución de las fallas de mercado, las cuales representan los costos de oportunidad asociados al cambio climático. El costo social debe estar basado en precios de mercado siempre y cuando se considere su ajuste mediante precios sombra para ponerlos en concordancia con los costos de oportunidad (IPCC, 2007, p. 135).

Con base a lo anterior, se plantea como principal hipótesis de investigación que el precio sombra constituye la unidad de cuenta apropiada, relativa al costo social del carbono para estimar el precio y nivel óptimo de emisiones de GEI. Así, el precio sombra permite a las empresas, hogares y demás agentes económicos ajustar su comportamiento hasta alcanzar dicho óptimo. Consecuentemente, estos precios

² También llamado costo de oportunidad, mide la pérdida o ganancia de bienestar de una economía o agente económico. Dada la escasez de recursos, cuando se toma la decisión de producir un bien, se obliga a renunciar a otros, en este caso la decisión de reducir las emisiones como productos del proceso productivo, obliga a renunciar a una parte del producto deseable para la economía (Nicholson, 1997, p. 223).

constituyen una base técnicamente fundamentada para la determinación de políticas públicas de prevención y mitigación más eficientes.

En el caso que nos ocupa, la estimación de los precios sombra obedecerá a distintas funciones de producción que caracterizan los 34 sectores de la economía mexicana, así como a las proporciones de factores empleados, ya que de éstos dependerán los niveles de producción obtenidos y de las emisiones generadas. Como se observó en el Cuadro 2, ambos niveles pueden diferir en algunos casos, lo cual permite generar como hipótesis secundaria que este fenómeno se puede atribuir a la ineficiencia implícita en la conformación de la función de producción.

II.1 Los precios sombra como medida del Costo Social de los GEI

La presente investigación utilizará el precio sombra como medida del costo social de los principales gases de efecto invernadero en México (dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O)) emitidos por sector de actividad económica, con el propósito de establecer un marco de referencia teórico-metodológico robusto que contribuya a mejorar la efectividad, transparencia y objetividad de las políticas públicas en la materia, dentro del contexto de los compromisos de descarbonización adquiridos por el país en los acuerdos internacionales sobre el cambio climático.

Para tal efecto se parte de los fundamentos de la teoría microeconómica neoclásica tales como la teoría del consumidor, de la empresa y sobre la interacción de los mercados. En el contexto de la economía ambiental la regulación económica conlleva la creación de métodos para estimar precios y demanda de bienes que no son sujetos de intercambio en ningún mercado, como los GEI, a efecto de evitar mermas en la calidad ambiental y procurar un equilibrio entre ambos elementos (precios y demanda) sin afectar intereses económicos y sociales (Pérez Espejo, et al., 2010).

A esta extensión del campo de intervención de la economía neoclásica se le denomina *mainstream ampliado* debido a que analiza el papel del mercado y las implicaciones del cambio climático sobre la actividad económica, así como las fallas

que éste pueda presentar, lo cual hace necesaria la intervención del Estado mediante acciones regulatorias orientadas al buen funcionamiento de los mercados (de la Vega Navarro, 2015).

Uno de los principales retos para el *mainstream* económico y los gobiernos, es resolver el problema de los costos externos que las empresas le imponen a la sociedad por la emisión de contaminantes debido a la falta de incentivos para incluirlos dentro de los precios de mercado. Tales retos se originan en la ineficiencia económica que conlleva a un exceso de producción y costos sociales innecesarios (Pindyck & Rubinfeld, 2009, p. 748).

Por tal motivo Stern (2006) definió al cambio climático como la falla de mercado más grande del mundo, que se expresa como una externalidad negativa, que da lugar a una gran divergencia entre el costo privado y el costo social. Lo anterior puede resolverse mediante la estimación de precios óptimos al carbono que permitan alcanzar una generación óptima de emisiones.

Un principio destacado de la economía ambiental para resolver la disminución de los GEI y para determinar un nivel eficiente de emisiones se basa en el Teorema de Coase³, que ha contribuido a orientar las negociaciones sobre cambio climático durante la Cumbre de París 2015 (COP21), ya que como lo menciona Pindyck (2017, p. 345): *“los países negociaron con base a una meta en la reducción de emisiones a nivel global, la cual requirió de una reducción por parte de cada uno de los países participantes, de tal forma que el resto tuvo que ajustarse al objetivo general planteado. Se espera, en principio, que el nivel objetivo en la reducción de emisiones equilibre el costo externo que se genera para la sociedad [...]. Este y otros acuerdos internacionales sobre cambio climático conllevan un proceso de negociación entre (países) contaminadores y aquellos que son afectados por los contaminantes (en ambos casos de manera agregada) [...]. Esta agregación simula los derechos de propiedad planteados por Coase. Por un lado, se encuentran los*

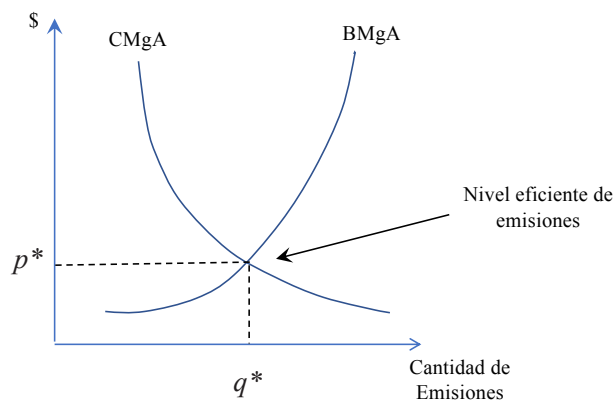
³ El teorema plantea que mientras los derechos de propiedad estén bien definidos, las partes puedan negociar sin costo y para beneficio mutuo, entonces el problema de externalidades se resolverá solo y habrá una tendencia automática para acercarse al óptimo social (Pindyck, 2017; Pearce et al., 1995).

contaminadores que en su conjunto son propietarios de los procesos de producción (fabricas, plantas generadoras, transporte, etc.) que generan las emisiones de GEI, y por otro están los afectados por los contaminantes en su conjunto, poseedores de la atmósfera en la cual se descargan las emisiones. Y tal como en los ejemplos sobre el Teorema de Coase: Las negociaciones involucran compensaciones monetarias (potenciales) de los contaminadores ricos (países desarrollados) hacia los afectados (países en desarrollo, especialmente aquellos con mayor vulnerabilidad climática)”.

Cabe señalar que a pesar del efecto pernicioso de las emisiones de efecto invernadero, no se propone disminuirlas a niveles nulos debido a que los procesos de producción y el crecimiento económico mismo exigen un determinado grado de emisiones de GEI; ante lo cual Coase indicaba (1960, p. 42): “la finalidad de la regulación no debería consistir en eliminar el problema del humo, sino asegurar su cantidad óptima, misma que maximizaría el valor de la producción”, de tal forma que ese nivel óptimo sea Pareto eficiente.

Para alcanzar un nivel de emisiones eficiente es necesario que la curva de beneficio marginal de control de las emisiones (BMgA) iguale la curva de costo marginal de reducción de las emisiones (CMgA). En el punto de intersección se establecerá una cantidad fija de contaminantes por unidad de tiempo, q^* , que corresponderá a un precio óptimo del carbono, p^* . (Grafton, et al., 2004)

Figura 1. Nivel eficiente de emisiones



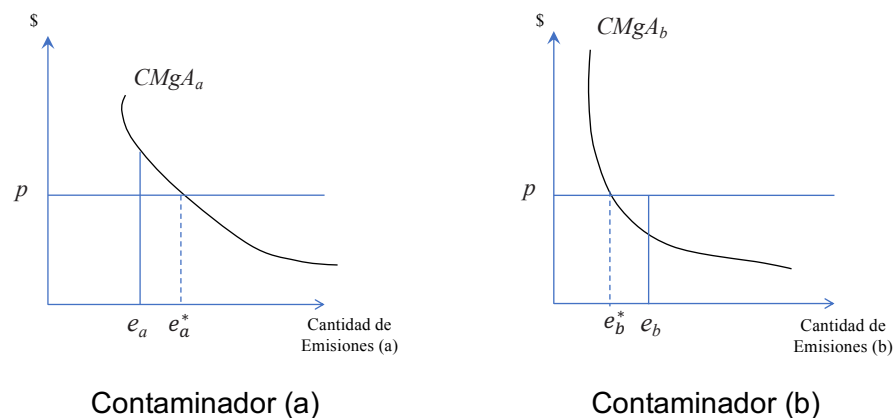
Fuente: Grafton et al. (2004, p. 63)

La curva de beneficios marginales representa los beneficios que reporta la reducción en el costo marginal externo para los afectados por las emisiones generadas, o bien el costo marginal para la sociedad por la emisión de una tonelada adicional de emisiones. Por su parte, la curva de costo marginal de reducción de los contaminantes, como su nombre lo indica, representa el costo en que incurren los contaminadores por la reducción de una tonelada adicional de las emisiones generadas.

No obstante, en la práctica para obtener un nivel eficiente de emisiones se debe tomar en cuenta que las curvas de costo marginal de reducción de los contaminantes y de costo marginal externo pueden variar considerablemente dependiendo del tipo de contaminante y de la industria. Asimismo, en la mayoría de los casos se desconoce alguna de estas dos curvas por lo que los contaminadores optarán por el método para reducir sus emisiones que les sea costo efectivo, es decir, el método que les reporte menor costo (Grafton, et al., 2004).

Bajo este criterio los contaminadores podrán ajustar su nivel de producción y emisiones en función del precio asignado a las emisiones.

Figura 2. Control de la contaminación costo efectiva con contaminadores heterogéneos



Fuente: Grafton et al. (2004, p. 64)

Tal es el caso del contaminador (*a*) que no tiene incentivos para reducir sus emisiones dado que el precio de las mismas es menor a su CMgA, en su lugar podrá aumentarlas hasta el punto donde su CMgA iguale el precio de éstas (e_a^*). Por el contrario, el contaminador (*b*) cuenta con incentivos para disminuir sus emisiones al tener un CMgA menor al precio de las éstas, por lo que las reducirá hasta donde su curva de CMgA iguale el precio de las emisiones (e_b^*).

En el ejemplo mencionado se puede observar que aunque ambos contaminadores poseen el mismo nivel de emisiones ($e_a = e_b$), la curva de CMgA del contaminador (*a*) es mayor a la del contaminador (*b*) con relación a un sólo precio de emisiones para ambos; por lo que las curvas de costo marginal de reducción de los contaminantes son igualadas y las emisiones se logran controlar de forma costo efectiva cuando alcanzan niveles eficientes en los puntos e_a^* y e_b^* , donde $e_a^* \neq e_b^*$ (Grafton, et al., 2004, p. 64).

Lo anterior implica que cuando hay contaminadores heterogéneos con iguales niveles de emisiones, el costo de reducción de emisiones combinado será menor, siempre y cuando el contaminador con el menor CMgA reduzca sus emisiones en una cantidad marginal, mientras que el contaminador con el mayor CMgA incremente sus emisiones en una cantidad correspondiente (Grafton, et al., 2004).

No obstante, debido a que el costo de reducir las emisiones es muy alto, se originó una falta de consenso en los criterios para decidir qué países deberían reducir la mayor cantidad de emisiones. Por tal motivo, se han contemplado mecanismos de valoración económica para las emisiones tales como la estimación del costo social⁴ de los contaminantes a efecto de establecer un impuesto sobre niveles de contaminantes equivalente a su costo social.

The High-Level Commission on Carbon Prices (2017) señala que un elemento indispensable de la estrategia para reducir emisiones es un precio al carbono bien

⁴ En la literatura del cambio climático se emplea el término de costo social para referirse únicamente al costo externo (Pindyck, 2019).

diseñado, que permita incentivar los cambios necesarios en la inversión y en los patrones de consumo, y que conlleve a un progreso tecnológico encaminado a reducir los costos de mitigación; lo anterior se puede complementar con la fijación de precios sombra asociados a las actividades de los sectores público y privado, lo que desde luego supone la fijación de un precio a las emisiones de carbono y otros GEI.

En ausencia de fallas de mercado, los precios de los bienes derivados de un mercado competitivo son iguales a su precio sombra, y éstos a su vez al costo de oportunidad social de los recursos utilizados en la producción de dichos bienes; es decir, las pérdidas (ganancias) netas asociadas a tener una unidad más (una unidad menos) del bien en cuestión (Dreze & Stern, 1990).

En términos de la teoría neoclásica, al asumir una función de bienestar social, los beneficios marginales netos para la sociedad, correspondientes a la última unidad de un insumo se les conoce como valor sombra de ese insumo; de esta manera, si un productor trata de maximizar su beneficio y no existen fallas de mercado como la presencia de un monopolio u oligopolio en el mercado de insumos, cada insumo se utilizará hasta que los beneficios marginales netos de una unidad adicional de éste sean iguales a su precio de mercado; sin embargo, en la realidad encontramos al menos una falla de mercado o externalidad que origina una diferencia considerable -desde la perspectiva del bienestar económico- entre el cálculo del precio sombra y el precio de mercado (Khademvatani & Gordon, 2013, p. 155).

El valor sombra representa un valor neto implícito a pagar por una unidad adicional empleada por determinada industria. También se le denomina verdadero precio económico por emplear esta última unidad; esto quiere decir que el análisis de los precios sombra permite internalizar el daño potencial asociado al cambio climático (ESMAP, 1999).

Bajo este contexto, el precio sombra (ambiental) se entiende como el costo marginal de las empresas por generar desechos en los procesos de producción (Dang & Mourougane, 2014, pág. 6). Este enfoque se encuentra fundamentado en la teoría

microeconómica neoclásica que comprende el comportamiento maximizador de beneficios de las empresas (Hille & Althammer, 2015, p. 5).

La principal dificultad que se presenta para la evaluación de las emisiones es la ausencia de un mercado para éstas, un mercado de “bienes” indeseables con precios observables, por lo que el enfoque de precios sombra constituye una herramienta para evaluar indirectamente el costo de oportunidad de las emisiones contaminantes. Tal como lo define de Bruyn et al. (2010); los precios sombra son los precios construidos para bienes o factores de la producción que no poseen un mercado donde puedan intercambiarse, por eso se encuentran relacionados con la calidad ambiental. Al conocer estos precios sombra, el medio ambiente puede incluirse en diversos tipos de análisis a fin de establecer un indicador del valor económico de un bien en particular.

Asimismo, los precios sombra constituyen una herramienta ampliamente utilizada por los formuladores de políticas ambientales como valor de referencia para la fijación de precios en el mercado de emisiones, pueden emplearse como indicadores para fijar una tasa de penalización para éstas; también son útiles para la asignación de recursos en el control de contaminantes entre plantas de producción (Lee, et al., 2002), y para la evaluación de los costos sociales de oportunidad en proyectos de inversión, pública y privada, en este caso se podría tratar de precios sombra laboral y/o de la inversión, dependiendo del factor que conlleve costos de oportunidad social.

II.2 Revisión de la literatura

La mayoría de las empresas producen múltiples productos que son difíciles o no recomendables de agregar; tal es el caso de las emisiones y contaminantes generados como subproducto del proceso productivo. Debido a que estos subproductos no cuentan con un mercado donde se puedan intercambiar, es comprensible que no cuenten con un precio de mercado. De este modo, el análisis ambiental se encuentra fundamentado en el análisis primal tecnológico, que permite

determinar el costo de oportunidad tecnológico para reducir subproductos indeseables (Cuesta, et al., 2009, p. 2232).

Cuesta et al. (2009) realizaron un análisis de la eficiencia técnica de un grupo de unidades de generación eléctrica en EEUU en términos de la producción de electricidad (como producto deseado) y las emisiones de dióxido de azufre (como subproducto no deseado) mediante la utilización de una función de distancia hiperbólica que permite ajustarse a las especificaciones de una función translogarítmica; esto permitió separar los productos generados durante el proceso de producción, identificar la proporción de los productos deseables que debían expandirse y la de los subproductos no deseables que debían reducirse, y en su caso, determinar los insumos susceptibles de reducción de forma multiplicativa. Lo anterior permitió estimar el costo de oportunidad de los productos no deseables en términos de los deseables, es decir, la tasa marginal de transformación de ambos productos, con base en la dualidad entre la función distancia hiperbólica y la función de beneficios.

Mediante el precio sombra se puede corroborar la efectividad de un programa ambiental como lo hicieron Färe et al (2005) al medir la eficiencia técnica de 209 instalaciones de generación eléctrica en EEUU con relación a las emisiones de óxido de azufre (SO_2) generadas, con la finalidad de evaluar la efectividad del mercado de emisiones entre empresas establecido por la legislación del programa de lluvia ácida Phase I, para posteriormente comparar los precios de mercado de los permisos de emisiones con los precios sombra estimados mediante la metodología de Análisis de Frontera Estocástica (SFA por sus siglas en inglés).

Pittman (1981) aborda el tema de la ineficiencia de los acuerdos institucionales sobre los requerimientos para el control de la contaminación en 30 plantas trituradoras de pulpa y papel en los estados de Wisconsin y Michigan mediante la estimación de una función de producción translogarítmica a través de mínimos cuadrados ordinarios bajo el método de optimización, cuyo resultado representó los precios sombra de la contaminación de las plantas trituradoras, cuya contaminación,

a pesar de ser un producto más generado por el proceso de producción, se considera dentro de la función de producción como un insumo más, debido a que su comportamiento es más parecido al de un factor de la producción que al de un producto.

Esta condición también se ha mencionado por Oates y Cropper (1992, p. 678) al analizar el tratamiento que debía darse a la contaminación dentro de la economía ambiental, ya que a pesar de ser considerada como un “mal” público ésta se encuentra asociada a la producción de bienes privados por lo que los autores establecieron que la función de utilidad de un consumidor depende de un vector de bienes consumidos (X) y de un nivel de contaminación (Q).

$$U = U(X, Q)$$

Además, si se considera que la contaminación es resultado de la emisión de desechos (E) en la producción de X .

$$X = X(L, E, Q)$$

En esta función de producción se incluyen como insumos un vector de insumos convencionales (L), como el trabajo y el capital, además de la cantidad de descargas de desechos (E) y el nivel de contaminación (Q). En este caso la emisión de desechos se considera como otro factor de la producción ya que en caso de que se decidiera reducir las descargas de desechos, sería necesario utilizar algunos de los insumos existentes en actividades de reducción de contaminantes. Esto disminuiría la disponibilidad de recursos para la producción normal de los bienes. Así, una disminución en E requeriría distraer recursos para remediación, lo que tendría como resultado reducciones del producto.

Por su parte Reinhard et al (2000, p. 289) señalan que existe la posibilidad de medir el uso de los insumos ambientalmente dañinos, conociendo de antemano las repercusiones no deseables de éstos para el medio ambiente. No obstante, no es posible medir todos los efectos negativos de éstos, por lo que los autores no los incluyen en su análisis como subproductos de la producción. Su trabajo se centró

en estimar medidas amplias de eficiencia ambiental en las granjas lecheras de Alemania, mediante una comparación de los métodos de Stochastic Frontier Analysis (SFA) y Data Envelopment Analysis (DEA).

Coggins y Swinton (1996) calculan los precios sombra de reducir las emisiones de SO₂ en plantas generadoras de electricidad a base de carbón en el estado de Wisconsin, a efecto de validar la eficiencia del mercado de permisos de emisiones de SO₂ mediante un modelo paramétrico con una función distancia de la forma translogarítmica, ya que en un mercado de permisos de emisiones en equilibrio, el precio de los permisos debe ser igual al costo marginal de conseguir la reducción de la última unidad de contaminantes⁵. De la misma manera Boyd et al. (1996) estimaron el precio sombra de las emisiones de SO₂ para 62 plantas de generación eléctrica a base de carbón, con la finalidad de implementar una metodología para medir el costo marginal de reducción de contaminantes a través de dos modelos DEA diferentes.

Ishinabe et al. (2013), emplearon un mayor nivel de desagregación al realizar el cálculo de los precios sombra de las emisiones de GEI para 1,024 compañías pertenecientes a 15 industrias de los 37 países más importantes, mediante la aplicación de un método no paramétrico para una función distancia direccional. Lo anterior debido a que dichos precios difieren sustancialmente entre países y sectores.

En este sentido Dang y Mourougane (2014) estimaron el precio sombra de los GEI para 19 países pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) con base en la función distancia del producto aplicando un modelo paramétrico. No obstante, los autores hacen el señalamiento que dicho análisis se realizó de manera agregada a nivel nacional, lo que podría esconder diferencias sectoriales entre los distintos procesos de producción.

⁵ Färe et al. (1993) definen los precios sombra de los subproductos no deseados como el costo de oportunidad en términos del ingreso no percibido, debido a la implementación de acciones para una disminución gradual de producirlos libremente.

Por lo anterior, en la presente investigación se empleará el tratamiento utilizado por Pittman (1981) para las variables de contaminantes al incluirlas como un factor más de la producción debido a su comportamiento inherente con relación al producto. Esta consideración es consistente con lo señalado por Oates y Cropper (1992), Dang et al. (2014) e Ishinabe et al. (2013). Debido a la necesidad de elaborar estudios con mayor detalle, en este trabajo se aplica una desagregación a nivel sectorial que permitirá una medición más precisa de los precios sombra. Sin embargo, existe un nivel de heterogeneidad importante en los datos que hace más apropiada la estimación de una función de producción translogarítmica a través del método de SFA.

III. METODOLOGÍA

Para el tipo de modelos multi-producto (que permite separar subproductos deseables y no deseables) como es este caso de estudio, el enfoque adoptado para el cálculo de los precios sombra se basa en la función distancia del producto, es decir, la distancia entre la tecnología empleada y la frontera de eficiencia. Sin embargo, puesto que ésta no puede estimarse directamente debido a que no es observable, se emplean métodos determinísticos y/o estocásticos mediante el análisis SFA.

Shephard (1970) señala que la función distancia abarca todas las posibilidades de sustitución tecnológicamente eficientes para los vectores de insumos que permiten obtener un valor de producto positivo. Es una alternativa a la función clásica de producción para resolver la estructura productiva en términos de la función distancia como un problema de maximización. Por tal motivo la función distancia juega un papel importante en el principio de dualidad entre el costo y las estructuras de producción, ya que en su conjunto brinda las bases para el análisis donde intervienen tecnologías que generen múltiples productos.

Mediante la dualidad de la función distancia del producto y la función de beneficio (Shephard, 1970) se pueden obtener los precios sombra gracias a la maximización de la función de beneficios sobre las cantidades, de tal forma que éstos pueden ser expresados como una función del precio de los productos deseables, como factor del cociente producto-emisiones, y de la elasticidad de los productos no deseados respecto a los productos deseados sobre la frontera de eficiencia (Dang & Mourougane, 2014, p. 8).

La mayoría de los estudios revisados tienen en común el supuesto de plena eficiencia, ya que los precios sombra calculados se encuentran sobre la frontera de posibilidades de producción, la cual se interpreta como el máximo producto que se puede obtener dada una cierta cantidad de insumos. Por lo anterior, bajo el supuesto de eficiencia, ninguna observación puede estar por arriba de dicha

frontera, ni por debajo de ella, ya que esto último implicaría ineficiencia técnica (Henningsen, 2014).

Färe et al. (1985) señalan que existen vacíos en la corriente económica preponderante en el estudio de la ineficiencia, por lo que existe un desarrollo desigual, marginal y no homogéneo en la literatura con relación a la forma en que se mide la eficiencia. Este análisis parte del supuesto de que los productores actúan de manera eficiente. No obstante, es innegable la existencia de ineficiencias en los procesos productivos, por lo que hacer caso omiso de éstas puede conducir a formular teorías sobre el comportamiento del productor cuya predicción no se encuentre bien cimentada y a conclusiones erróneas. La cada vez más generalizada aplicación de estos métodos en una gran variedad de campos, hace necesario el desarrollo de una teoría del productor coherente en presencia de la ineficiencia.

En este sentido se define eficiencia del productor como la comparación entre los valores observados y los óptimos, tanto por el lado del producto como de los insumos. Dicha eficiencia se puede analizar bajo dos vertientes:

- i) Como eficiencia técnica, al comparar el producto observado con el producto máximo obtenible bajo un nivel dado de insumos, o bien a través de los insumos utilizados y los insumos mínimos requeridos para obtener un nivel dado de producto. En ambos casos el óptimo se define en términos de las posibilidades de producción.
- ii) Como eficiencia económica cuando se consideran los objetivos económicos del productor al comparar los costos, ingresos o ganancias observadas y los óptimos obtenidos, sujeto a alguna restricción de precios o cantidades según sea el caso. El óptimo estará expresado en términos de valor (Fried, et al., 2008, p. 8).

La función distancia tiene un intervalo $0 < D(x, y, w) < 1$, homogénea de grado 1 en el producto, no decreciente en los productos deseables y no creciente en los insumos y productos indeseables; asimismo, la empresa puede disminuir el producto no deseado (emisiones) si disminuye su nivel de producción.

Con base a la teoría del dual de Shephard se obtienen los precios sombra utilizando la función de beneficios como función objetivo en el problema de maximización sujeto a la restricción de la función distancia.

Donde;

$$R(x, p_y, p_w) = p_y y + p_w w$$

es la función de beneficios; $p_w = (p_{w_1}, \dots, p_{w_r})$ y $p_y = (p_{y_1}, \dots, p_{y_m})$ son los precios sombra del producto no deseado y del producto deseado, respectivamente. Su vector asociado de cantidades es $w = (w_1, \dots, w_r)$ y $y = (y_1, \dots, y_m)$.

Posteriormente se desarrolla el problema de maximización.

$$\text{Max } R = p_y y + p_w w + \lambda(D(x, y, w) - 1)$$

Las condiciones de primer orden se obtienen con base al multiplicador de Lagrange:

$$\mathcal{L}_m \frac{\delta \lambda}{\delta y_m} = p_{y_m} + \lambda \frac{\delta D(x, y, w)}{\delta y_m} = 0$$

$$\mathcal{L}_r \frac{\delta \lambda}{\delta w_r} = p_{w_r} + \lambda \frac{\delta D(x, y, w)}{\delta w_r} = 0$$

Dado que sólo existe un producto deseado $y_m = y$, al despejar λ de las condiciones de primer orden se pueden igualar los resultados para obtener el precio del producto no deseado (p_{wr}):

$$p_{wr} = \frac{p_y}{\frac{\delta D(x, y, w)}{\delta y}} \frac{\delta D(x, y, w)}{\delta w_r}$$

Si se aplica la propiedad matemática $\frac{\delta \ln D}{\delta \ln y} = \frac{y}{D} \frac{\delta D}{\delta y}$, el precio sombra de w se puede reformular de la siguiente manera:

$$p_{wr} = p_y \frac{y}{w_r} \frac{\frac{\delta \ln D(x, y, w)}{\delta \ln w_r}}{\frac{\delta \ln D(x, y, w)}{\delta \ln y}}$$

Al aplicar la propiedad de homogeneidad de grado 1 para el producto deseado, la función distancia se puede reescribir como:

$$\ln D(x, y, w) = \ln[yD(x, 1, w)] = \ln y + \ln D(x, 1, w)$$

de tal forma que la derivada de la función distancia respecto a $\ln y$ es:

$$\frac{\delta \ln D(x, y, w)}{\delta \ln y} = 1$$

De la misma manera se obtiene la derivada de la función distancia ahora con respecto a $\ln w_r$, la cual se interpreta como la elasticidad de la función distancia con respecto al producto no deseable sobre la frontera. Si se considera que D no es creciente en los productos no deseables, la elasticidad tendrá valores negativos.

$$e(y, w_r) = \frac{\delta \ln D(x, y, w)}{\delta \ln w_r}$$

De la reformulación de la función distancia se obtiene:

$$\frac{\delta \ln D(x, y, w)}{\delta \ln w_r} = \frac{\delta \ln D(x, 1, w)}{\delta \ln w_r}$$

Esta expresión se interpreta como la coincidencia de la elasticidad del producto no deseable de la función distancia con la función de producción que se encuentra sobre la frontera de eficiencia. De esta forma el precio sombra se expresa como:

$$p_{wr} = p_y \frac{y}{w_r} e(y, w_r)$$

En el presente trabajo se aborda un método paramétrico que permite diferenciar la función distancia respecto a los productos y así estimar los precios sombra. La mayoría de los estudios de esta índole parametrizan la función distancia de producción tomando una función translogarítmica, de tal forma que las estimaciones se basan en el Análisis de Frontera Estocástica (Dang & Mourougane, 2014).

III.2 Modelo econométrico

Se emplea la forma funcional translogarítmica a efecto de parametrizar la función distancia del producto y calcular la derivada de dicha función respecto a la variable correspondiente del producto no deseado ($\ln w_r$). Dicha forma funcional satisface las condiciones de separabilidad en insumos y producto, así como la de rendimientos constantes a escala, lo que significa que es homogénea de grado 1 en los insumos⁶, lo que proporciona una aproximación hacia la tecnología empleada en la producción, que se supone desconocida:

Para $i = 1, \dots, N$

$$\begin{aligned} \ln D(x, y, w) = & \alpha_0 + \sum_{k=1}^K \alpha_k \ln x_{ki} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \alpha_{kl} \ln x_{li} + \sum_{m=1}^M \beta_m \ln y_{mi} \\ & + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \beta_m \ln y_{mi} \ln y_{ni} + \sum_{r=1}^R \gamma_r \ln w_{ri} + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^R \sum_{s=1}^R \gamma_{qs} \ln w_{qi} \ln w_{si} \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \delta_{km} \ln x_{ki} \ln y_{mi} + \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^R \varepsilon_{kr} \ln x_{ki} \ln w_{ri} \\ & + \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R \rho_{mr} \ln y_{mi} \ln w_{ri} \end{aligned}$$

No es posible estimar la función anterior dado que D no es observable, por lo que ahora se emplea para y la propiedad de homogeneidad utilizada en la función distancia (D):

⁶ “Si $n=1$, se tiene que $f(tx, ty) = tf(x, y)$, esto es, el producto varía en la misma proporción en que lo hacen los factores y, por lo tanto, el rendimiento por unidad de cada factor permanece constante” (Ramírez M., 1991, p. 213).

$$-\ln y = \ln D(x, 1, w) - \ln D(x, y, w)$$

Si se aplica $\ln\left(\frac{y}{y}\right) = 0$ para todos los términos que contengan $\ln y$ en $\ln D(x, 1, w)$ se obtiene:

$$\begin{aligned} \ln D(x, 1, w) = & \alpha_0 + \sum_{k=1}^K \alpha_k \ln x_{ki} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \alpha_{kl} \ln x_{li} + \sum_{r=1}^R \gamma_r \ln w_{ri} \\ & + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^R \sum_{s=1}^R \gamma_{qs} \ln w_{qi} \ln w_{si} + \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^R \varepsilon_{kr} \ln x_{ki} \ln w_{ri} \end{aligned}$$

Por esto la función anterior puede estimarse empleando el modelo de SFA, de tal forma que:

$$e(y, w_r) = \gamma_r + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^R (\gamma_{rs} + \gamma_{sr}) \ln w_{si} + \sum_{k=1}^K \varepsilon_{kr} \ln x_{ki}$$

Finalmente, con la siguiente ecuación se puede calcular el precio sombra con base en los parámetros obtenidos de ella en la siguiente formula:

$$\begin{aligned} -\ln(y) = & \alpha_0 + \sum_{k=1}^K \alpha_k \ln x_{ki} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \alpha_{kl} \ln x_{li} + \sum_{r=1}^R \gamma_r \ln w_{ri} + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^R \sum_{s=1}^R \gamma_{qs} \ln w_{qi} \ln w_{si} \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^R \varepsilon_{kr} \ln x_{ki} \ln w_{ri} + u_i + \omega_i \end{aligned}$$

A diferencia de los métodos no paramétricos como el análisis envolvente de datos (DEA), el SFA arroja resultados más precisos sobre la ineficiencia de una empresa, sector económico o industria a través del residuo de la ecuación, ya que éste se divide en dos, uno que representa la distancia que separa dicho agente económico de la frontera eficiente de producción (ineficiencia) representada por el término u_i y otro que se interpreta como “ruido blanco”, es decir, el error estándar que se comporta con una distribución normal, ω_i .

IV. DATOS EMPLEADOS PARA EL CONTRASTE EMPÍRICO DEL MODELO

Por lo general, uno de los elementos más controversiales en cualquier estudio son los datos a utilizar. Lo anterior no es privativo de los modelos econométricos y tampoco se limita a la fuente de los datos, éstos deben cumplir con ciertas características de homogeneidad que permita hacer comparable la información utilizada.

La información a emplear en esta investigación corresponde a datos de la economía mexicana de corte transversal y en series de tiempo para estimar las funciones de producción involucradas. Éstas incluyen las variables de formación bruta de capital fijo y remuneraciones de asalariados como proxy de los factores de producción de capital y trabajo. De acuerdo a lo planteado por Pittman (1981) se introducen también las variables de emisiones como un tercer factor de producción, además del uso de energía como variable independiente.

En una investigación como la que nos ocupa, antes que nada, se analiza la compatibilidad de los datos del proceso bajo estudio, más allá de la clasificación empleada a fin de dimensionar las diferentes actividades económicas, en un marco contable estándar que asegure la validez de la información tanto como su comparabilidad con el resto del mundo. De lo contrario los resultados requeridos para la formulación de políticas no serían posibles.

El Sistema de Cuentas Nacionales (SCN), en su más reciente versión de 2008, es un marco estadístico y contable que da pauta a los países para contar con lineamientos homogéneos para la medición de sus componentes de cuentas nacionales. Este se realiza de manera conjunta por las Naciones Unidas, OCDE, Comisión Europea, FMI y el Banco Mundial (Comisión de Estadística de las Naciones Unidas, 2008).

La información que se utiliza en el presente trabajo y de la cual se realizará una descripción detallada en este apartado, proviene de dos fuentes principales: la primera es Word Input-Output Database (WIOD) que utiliza la clasificación NACE

de la Unión Europea, de esta base se obtiene el inventario de emisiones de los principales gases de efecto invernadero (GEI); la segunda corresponde a información del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), que utiliza la Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN), donde se obtuvo el Superávit Bruto de Operación (SBO) y las Remuneraciones de asalariados.

Pese a que utilizan diferente clasificación, la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) permite una comparación entre ellas. Adicionalmente, el marco contable en el que se basan (SCN) dichas fuentes, permite validar que las variables utilizadas son comparables. Asimismo, las variables expresadas en términos monetarios están homologadas en dólares PPP de acuerdo a la información obtenida de la base de datos del Banco Mundial.

a) Valor agregado bruto

En las funciones de producción a utilizar para la metodología de esta investigación se considera como variable dependiente al Valor Agregado Bruto (VAB) debido a la falta de información del Producto Interno Bruto (PIB) a un nivel de desagregación suficiente para poder realizar una reclasificación de la información SCIAN de INEGI a clasificación NACE compatible con el resto de las variables. Por otra parte, el VAB tiene la misma estructura sectorial que el PIB, toda vez que la diferencia entre estos dos agregados son los impuestos netos a partir de la metodología del PIB por el método del ingreso.

Así, la información de esta variable para toda la serie proviene de datos oficiales del INEGI y se presenta en millones de dólares PPP

b) Inventarios de emisiones

La base WIOD es un proyecto financiado por la Comisión Europea como parte del 7th Framework Programme. El proyecto incluye la generación de matrices de insumo-producto multi-país a nivel de sector para el periodo 1995-2011. Este tipo de matrices tienen la misma forma que una matriz de insumo-producto. Sin

embargo, muestran en una sola matriz los flujos de insumos que requieren varios países para su producción y el comercio internacional de insumos, es decir, lo que compra cada país como insumos y como bienes y servicios finales, y lo que exporta al resto de los países.

En otras palabras, se trata de macro matrices que muestran a nivel sectorial de actividad económica los flujos dentro de los países y con el resto del mundo. Por ejemplo, permite ver los insumos que requiere un país como México para producir automóviles y piezas de automóviles, y de qué países provienen. De la misma forma se puede ver el destino de esa producción, ya sea para el mercado local o para los otros países que aparecen en la matriz.

Las matrices se presentan a precios básicos⁷ y en una estructura industria por industria⁸ en 35 sectores de actividad económica para 40 países, dentro de los que se encuentra México. Asimismo, se presenta una matriz para cada año de la serie de 1995 a 2011⁹. Como parte complementaria a las matrices, la misma base de datos ofrece información de cuentas satélite ambientales y socioeconómicas asociadas a los flujos productivos de las matrices. Sin embargo, las cuentas satélite comprenden únicamente el periodo entre 1995 y 2009.

La base de datos de emisiones cuenta con información para los tres principales gases de efecto invernadero, CO₂, CH₄, N₂O. La principal ventaja que ofrece es que permite diferenciar las emisiones generadas a un nivel de desagregación de 34 sectores de actividad económica. Adicionalmente, distingue las emisiones en dos bloques, las que se generan en los procesos productivos y las que se derivan del uso final de los bienes y servicios. Para el caso específico de esta investigación, se utilizan únicamente las primeras.

⁷ No consideran ningún margen de comercio ni transporte

⁸ Para su generación se asume que cada industria tiene su propia forma de producir.

⁹ Recientemente se está generando una actualización con un mayor nivel de desagregación a 43 sectores de actividad económica, pero con una cobertura de 2000 a 2014, no obstante, aún no se publican las cuentas satélites de emisiones asociadas a dichas matrices.

Para esta investigación, en un primer momento se validó la base de datos de emisiones de WIOD al contrastarla con dos fuentes, el Banco Mundial y el Inventario Nacional de Emisiones de GEI del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Posteriormente se generó una serie lo más extensa posible en función de los datos disponibles.

Para validar los datos de GEI de WIOD, se descargó de la de base de datos del Banco Mundial la información para México de los tres principales gases de efecto invernadero: CO₂, CH₄, N₂O. Posteriormente, los datos de emisiones del Banco Mundial se compararon con las emisiones totales (procesos productivos y usos finales) de los GEI reportados por la WIOD. Los resultados mostraron que los datos totales de WIOD son menores en valor que los reportados por el Banco Mundial con una variación promedio menor al 10%. Sin embargo, la tendencia de la serie es la misma en cada año, lo que muestra que las variaciones se deben principalmente a diferencias metodológicas.

Posteriormente, del Inventario Nacional de Emisiones del INECC se tomaron únicamente las emisiones de los tres principales gases para cada año, de 1995 a 2013 que es la última fecha de información disponible. Las diferencias en valor entre la información del INECC y la de WIOD es menor que la observada en el caso del Banco Mundial. En el año 2009, la información del INECC comparada con la correspondiente base de WIOD muestra una diferencia en valor de aproximadamente 3%. Lo anterior indica que la fuente de información utilizada para esta investigación es consistente con la información oficial publicada en México.

Una vez que se comparó y validó la consistencia de la información con fuentes oficiales, se generó una serie hasta 2015 debido a que WIOD únicamente presenta información de 1995 a 2009. La estimación de la serie para los años de 2010 a 2015 se realizó en dos etapas, la primera mediante el uso de los datos del INECC para el periodo de 2010 a 2013 como bordes para proyectar los vectores de emisión¹⁰ y la

¹⁰ El Banco Mundial presenta datos de los tres gases para el periodo de 1960 a 2011, dependiendo de cada país.

segunda de 2014 a 2015 asumiendo que las emisiones se asocian a los niveles de producción.

Para la primera etapa se dividieron las emisiones reportadas por el INECC en emisiones derivadas de los procesos productivos y emisiones derivadas de los usos finales, tomando como referencia las proporciones de la base WIOD para el año 2009. Posteriormente se tomó el peso relativo de cada uno de los 35 sectores de actividad económica del año 2009 para distribuir las emisiones generadas en los procesos productivos, bajo el supuesto de que a nivel agregado, no existe cambio tecnológico en el corto plazo.

En la segunda etapa se estima la serie de 2014 a 2015 bajo el supuesto de que las emisiones que se requiere calcular se asocian directamente a los niveles de producción del país. Este supuesto es válido en la serie de datos que se tiene hasta el momento debido a que únicamente considera las emisiones generadas durante los procesos productivos, eliminando las emisiones generadas por los usos finales.

Para realizar una proyección adecuada al mismo nivel de desagregación que la base de datos de WIOD (35 sectores) se realizaron los siguientes pasos:

- Descarga de la base de INEGI de la información sobre la producción en México de 2011 a 2015 a nivel de rama en precios básicos y a valores constantes¹¹.
- Posteriormente se reclasificó la información sobre la producción del INEGI para el año 2011 al nivel de 35 sectores que presenta WIOD, y se comparó con los resultados de la producción que presenta la matriz de insumo-producto multi-país del mismo año, para validar que los resultados fueran similares y así corroborar la reclasificación.
- En el siguiente paso se generaron coeficientes de emisiones para cada uno de los 35 sectores con la información de GEI de 2011 y de la producción reportada

¹¹ Se tomaron los datos de 2011 únicamente para validar con la última matriz disponible de WIOD, las proyecciones se realizaron únicamente para los años 2014 y 2015. La clasificación de INEGI es a SCIAN 2007, la de WIOD es NACE, pero ambas tienen en común una derivación de la clasificación internacional uniforme CIIU.

por INEGI (GEI/producción). Estos coeficientes representan la generación de emisiones dependiendo de la tecnología en cada uno de los 35 sectores, de tal forma que al multiplicar cada coeficiente por la producción del sector el resultado representa el nivel de emisiones.

Así, mediante la serie de datos de producción a nivel de rama de 2014 a 2015 proveniente del INEGI, previamente clasificada a 35 sectores, se realizó la proyección de las emisiones para el resto de la serie utilizando los coeficientes de emisiones calculados.

c) Factor Capital

Para el factor “Capital” se empleó el superávit bruto de operación (SBO) o excedente de explotación, mismo que representa el pago al capital y como tal se utiliza como variable proxy del factor capital. A diferencia de la formación bruta de capital fijo, que muestra el flujo de activos fijos anuales a través de la serie de tiempo, el pago al factor capital se entiende como el pago por el uso del stock de activos fijos. De esta forma, aunque no es una variable de acervos de capital, sí representa el pago por el uso de este. Formalmente el SBO representa el saldo contable de la cuenta de generación del ingreso dentro de las cuentas nacionales de un país, es decir, es el saldo del valor agregado una vez que se descuenta la remuneración al factor trabajo y los impuestos netos, de esta manera, mide el excedente o déficit generado de la producción (Comisión de Estadística de las Naciones Unidas, 2008, p. 212).

La información para esta serie de tiempo se obtuvo de datos oficiales del INEGI y se presenta en millones de pesos a precios constantes de 2013, reclasificada a 35 sectores.

d) Factor trabajo

Para el factor trabajo se toma como proxy el total de remuneraciones de asalariados, mismas que incluyen sueldos y salarios. La serie completa a nivel de desagregación de subsector y rama en clasificación SCIAN 2007 se encuentra disponible a precios

constantes en la base de datos de INEGI, misma que se reclasifica a los 35 sectores de WIOD utilizando los mismos clasificadores empleados en el resto de las variables. En millones de pesos a precios constantes de 2013.

e) Uso de energía

De la misma forma que las emisiones de GEI, la información de la variable sobre uso de energía se tomó de la base de datos de la WIOD. La información que se obtiene es una serie de tiempo 1995-2009 para cada uno de los 35 sectores de actividad económica en clasificación NACE y corresponde al uso total de energía por sector de actividad económica, expresado en Tera Joules (TJ).

Para obtener los niveles totales de uso de energía, la WIOD realiza un análisis detallado que incluye el uso de energía de acuerdo a las características de producción de cada sector de actividad económica, que al mismo tiempo considera diferentes fuentes de energía expresados en TJ¹².

El principal problema que se tuvo con esta variable fue, al igual que las emisiones, la temporalidad con la que cuenta la WIOD, que incluye información hasta 2009. Sin embargo, a diferencia de las emisiones, las distintas fuentes oficiales consultadas no contienen información de uso total de energía, sino que se concentran en el uso de energía derivada del petróleo. Aunque este uso de energía concentra el mayor porcentaje, se considera que no es la mejor variable proxy para proyectar la información faltante.

Así, para completar la serie de tiempo utilizada, se asumió que en el corto plazo no hay cambio tecnológico por lo que el uso de energía dependerá del nivel de producción de cada sector. De esta forma, el uso de energía del sector de actividad económica "A" en 2010, dependerá de la relación entre el uso de energía y el nivel de producción bruta¹³ en el año 2009, así como del nivel de producción bruta del

¹² Incluye carbón, petróleo crudo, coque, diésel, gasolina, turbo diésel, gas, biodiesel, biogásol, biogás, electricidad, energía nuclear, termoeléctrica, geotérmica, hidroeléctrica, solar, entre otras.

¹³ Se considera la producción bruta debido a que la información de INEGI a nivel de sector, tiene un mayor ajuste en esta variable al compararla con la publicada por la WIOD.

sector "A" en el año 2010, para lo cual fue necesario reclasificar la información de la producción a nivel de rama, que es el mayor nivel de desagregación reportado por INEGI, a clasificación NACE de 35 sectores. El procedimiento se realiza para los diversos sectores en los años faltantes.

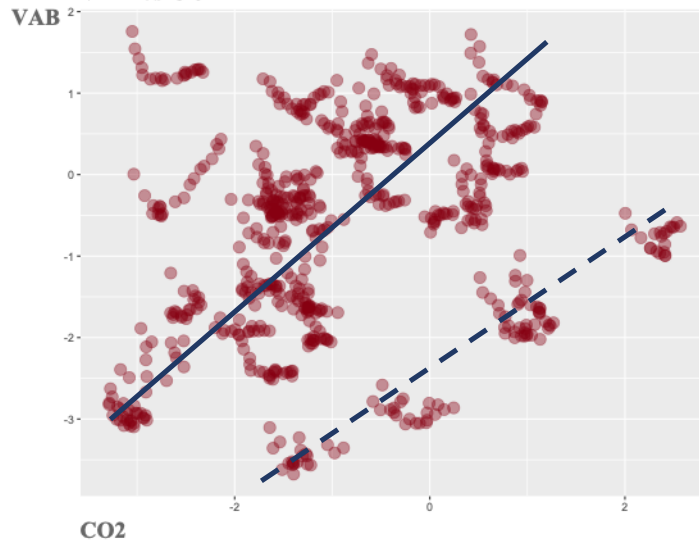
V. ANÁLISIS EMPÍRICO SECTORIAL Y LAS EMISIONES

Como un primer acercamiento al fenómeno en estudio es conveniente realizar una observación de los datos mediante un análisis gráfico de las variables empleadas en el modelo, su correlación estadística y su comportamiento entre los diferentes sectores; ya que a partir de este primer paso se pueden anticipar las primeras conjeturas.

En la Figura 4 se puede observar que existen grupos de puntos concentrados con tendencia positiva en la relación valor agregado bruto y emisiones de CO₂; el primer grupo de puntos cuya tendencia se representa por línea continua, se concentran la mayoría de las observaciones de los sectores, los puntos que se encuentran por arriba de la línea de tendencia presentan un mayor producto con niveles de emisiones menores a los del resto de la muestra, a diferencia de las observaciones que se encuentran por debajo de la línea de tendencia cuya producción tiende a generar más emisiones conforme aumenta su producto.

Por su parte, el segundo grupo de puntos cuya tendencia representa la línea punteada, muestra una mayor generación de emisiones de CO₂ con un nivel de producto mucho menor. De aquí se podría plantear la presunción de que a mayor intensidad tecnológica vinculada al sector externo se incrementan las emisiones del CO₂, lo cual es un indicativo de que si bien este intervalo de producción es tecnológicamente más intensivo que el primero, la mayor emisión de CO₂ podría estar asociada a tecnologías menos eficientes y menos modernas. No obstante, la mayor parte de los puntos se concentran en el primer intervalo analizado, lo cual sugiere que existen sectores que poseen tecnologías eficientes que permiten obtener una mayor cantidad de producto con niveles menores de emisiones.

Figura 4. Relación del Producto y el CO₂

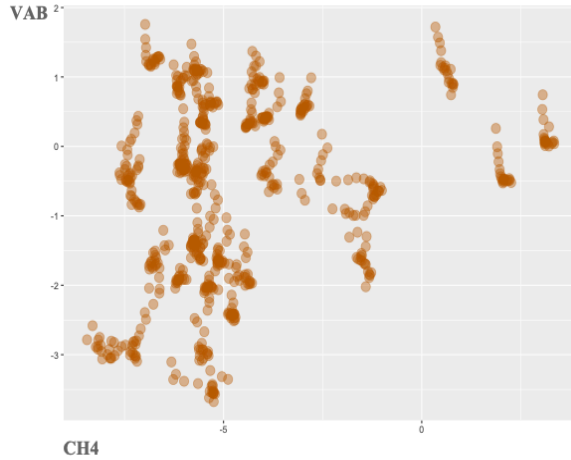


Fuente: Elaboración propia con datos tomados de INEGI, WIOD.

Como resultado de este análisis se puede plantear como conjetura que hay ciertos sectores de la economía que generan bajos niveles de GHG asociados a niveles altos de PIB, lo que puede ser indicativo de la heterogeneidad tecnológica de capital fijo y de su nivel de modernización.

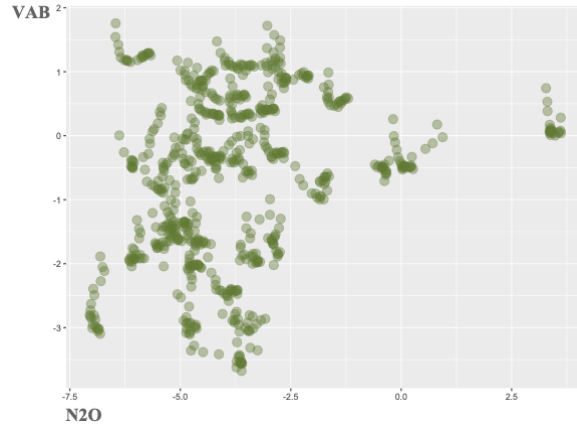
Para el caso del CH₄ y el N₂O se observa cierta inelasticidad respecto al PIB, ya que en el caso del metano, las emisiones se concentran dentro de un intervalo, independientemente del crecimiento del PIB, con tres pequeños clusters de CH₄ elevados en la región intermedia de crecimiento del PIB; el mismo caso se observa para el N₂O cuyas emisiones permanecen dentro del intervalo constante.

Figura 5. Relación del Producto y el CH₄



Fuente: Elaboración propia con datos tomados de INEGI, WIOD.

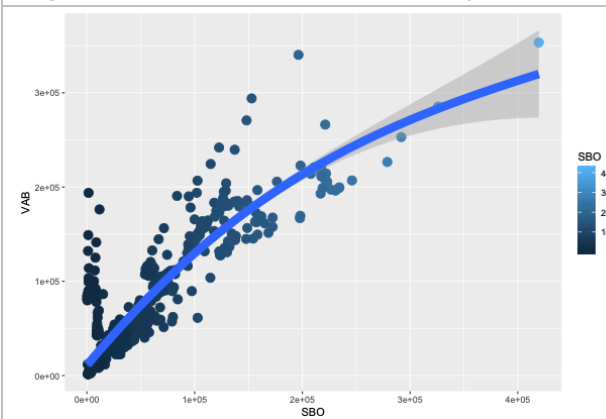
Figura 6. Relación del Producto y el N₂O



Fuente: Elaboración propia con datos tomados de INEGI, WIOD.

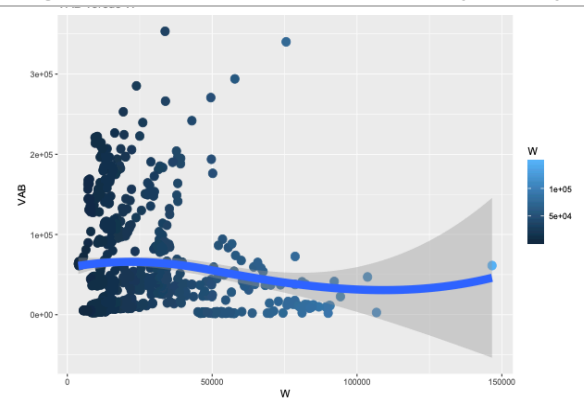
Ambos gases son producto de actividades muy específicas por lo que se entiende que su comportamiento en relación del PIB sea casi inelástico. En el caso del metano se trata de un subproducto de la cadena de valor de los hidrocarburos, de amplio espectro como insumo en la petroquímica como parte de la producción de fertilizantes, plásticos, pinturas, etc. El N₂O es un elemento generado principalmente por la agricultura intensiva, la quema de biomasa y combustibles fósiles, así como por el uso de fertilizantes nitrogenados y la deforestación.

Figura 7. Relación del Producto y Capital



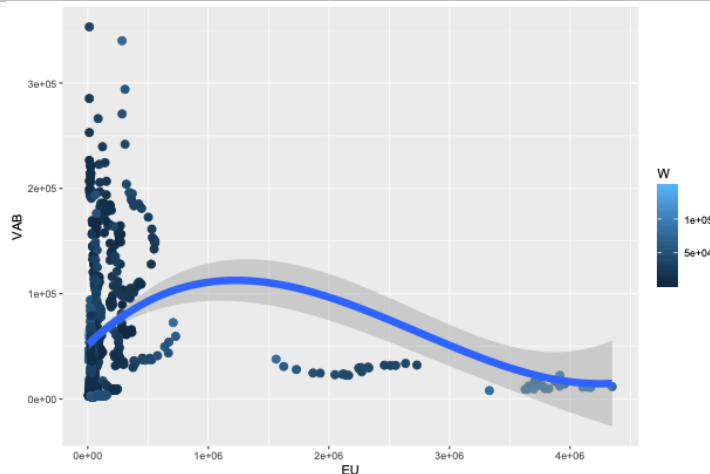
Fuente: Elaboración propia con datos tomados de INEGI, WIOD.

Figura 8. Relación del Producto y trabajo



Fuente: Elaboración propia con datos tomados de INEGI, WIOD.

Figura 9. Relación del Producto y energía



Fuente: Elaboración propia con datos tomados de INEGI, WIOD.

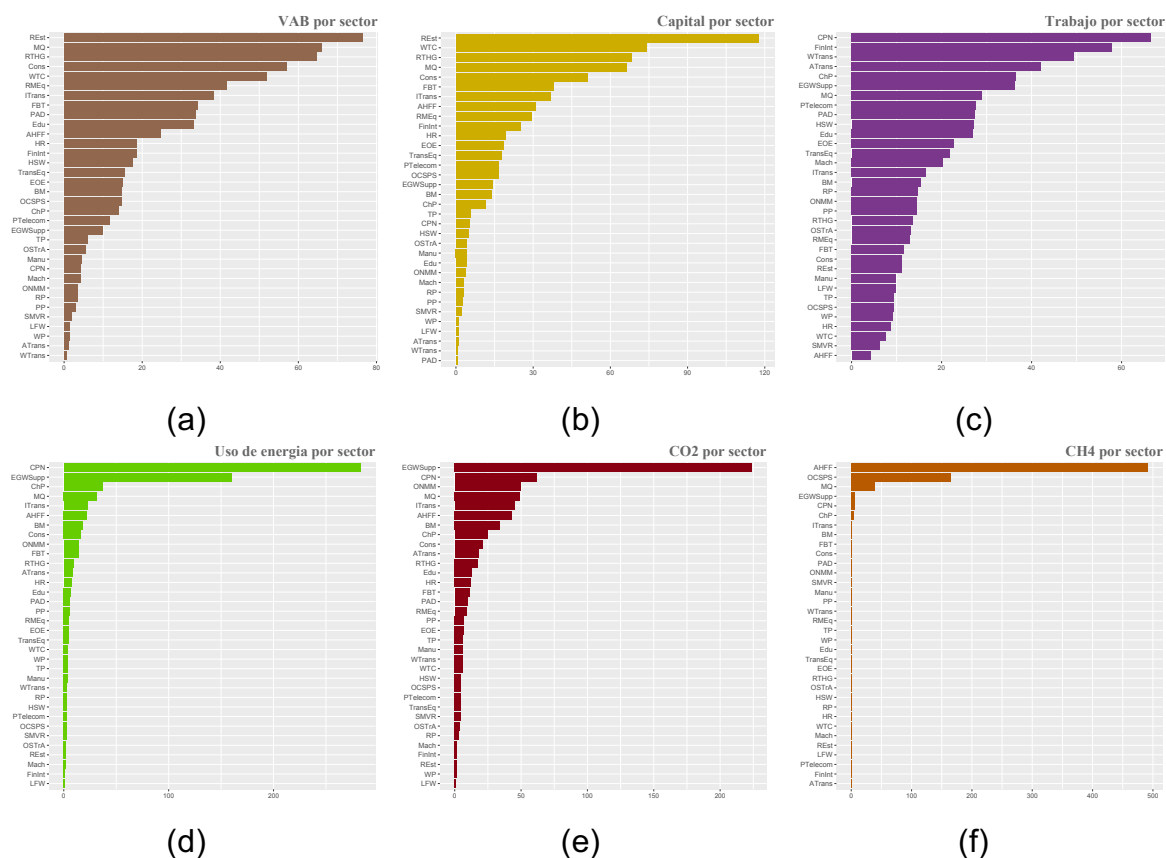
En cuanto a los factores de la producción, respecto a la correlación que presenta el capital respecto al producto se aprecia que, en su conjunto, la economía mexicana concentra la mayor parte de su capital productivo en sectores de bajo valor agregado, mientras que un segundo grupo presenta una relación positiva en cuanto a la inversión en capital y el aumento del valor agregado bruto.

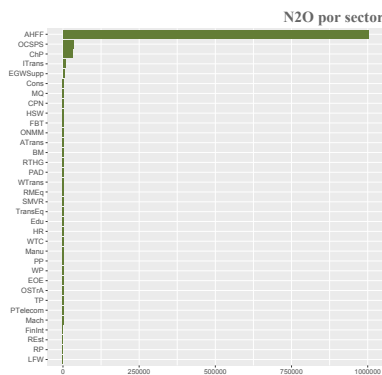
Por su parte, la mano de obra tiende a acumularse en los sectores con menor producto debido al rezago tecnológico característico de un perfil intensivo en mano de obra, aunque un segundo grupo de sectores presenta una estructura productiva baja en mano de obra con una producción creciente. Por su parte los sectores de mayor valor agregado cuentan con tecnologías y regulación que les confiere mejor desempeño energético, y viceversa.

Para un análisis más detallado, en la Figura 10 se puede observar la generación de cada gas a nivel de sectores de la economía mexicana. Como es el caso del CO₂ (10e) cuyas emisiones más importantes son generadas por el sector de suministro de electricidad, gas y agua (EGWSupp), seguido del sector cuya actividad es el procesamiento de materias primas como el coque, el combustible nuclear y la refinación de petróleo (CPN). Estos sectores se vuelven a observar con una intensidad energética importante, tal como se muestra en la gráfica 10d, lo cual

permite inferir que existe una relación directa entre el uso intensivo de energía y la generación de emisiones de CO₂. Sin embargo, su participación no es tan importante en la generación de valor agregado bruto (10a), donde quienes encabezan la lista son los sectores de Bienes Raíces (REst), Minería y extracción de petróleo (MQ), Comercio al menudeo, excepto equipo de transporte, servicios de mantenimiento y reparación a viviendas (RTHG) y Construcción (Cons); que al mismo tiempo poseen una participación significativa en el superávit bruto de operación (10b). Lo anterior se puede atribuir al boom inmobiliario que ha presentado el país en los últimos seis años de la muestra, cuyo impacto se refleja de manera positiva en el sector de la construcción.

Figura 10. Participación de cada sector en las variables empleadas





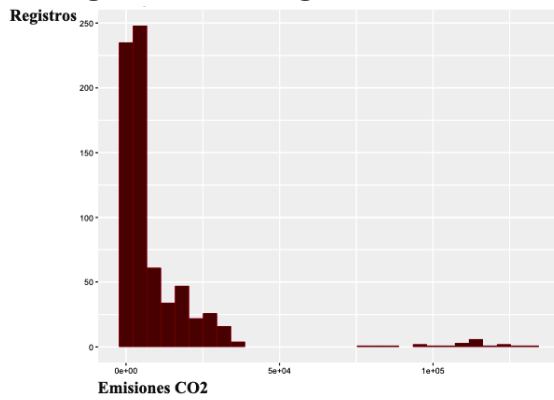
(g)

Fuente: Elaboración propia con datos tomados de INEGI, WIOD.

En el caso del CH₄ y del N₂O, entre los principales emisores se encuentran los sectores de agricultura, caza, silvicultura y pesca (AHFF) debido a las actividades propias de la agricultura, de deforestación y por el empleo de fertilizantes; seguido del sector relativo a otros servicios comunitarios, sociales y personales (OCSPS), el cual comprende actividades de alcantarillado y eliminación de desechos, saneamiento y actividades similares, identificados como los principales generadores de metano (CH₄).

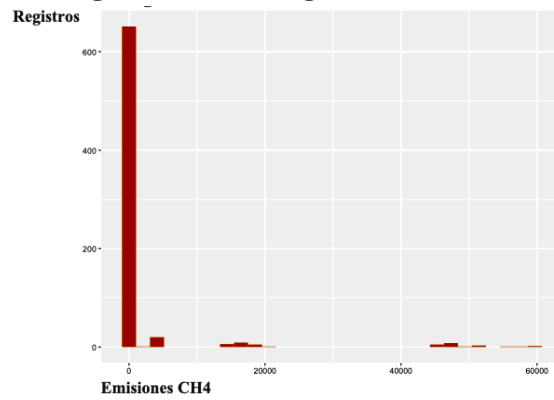
Por otra parte, mediante los histogramas correspondientes a las variables del modelo se puede observar su distribución de frecuencia; por ejemplo, en el caso de las emisiones de CO₂ (Figura 11) las mayores emisiones se presentan con menor frecuencia, aunque éstas se encuentran muy dispersas en el espectro. Esta dispersión indica que el CO₂ carece de una distribución normal como variable regresora; situación que es similar tanto para el CH₄ como para el N₂O.

Figura 11. Histograma del CO₂



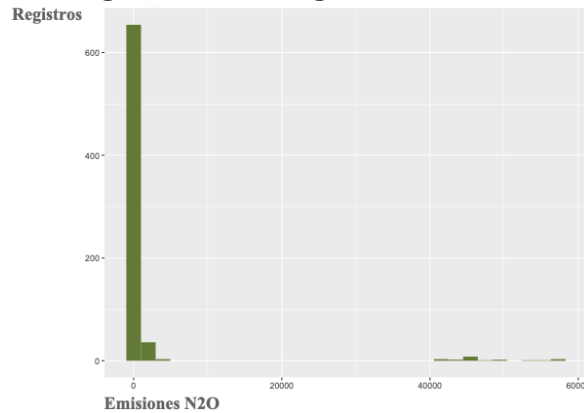
Fuente: Elaboración propia con datos tomados de WIOD

Figura 12. Histograma del CH₄



Fuente: Elaboración propia con datos tomados de WIOD.

Figura 13. Histograma del N₂O



Fuente: Elaboración propia con datos tomados de WIOD.

Dadas las características que presenta la distribución espectral de las variables, se justifica el empleo de modelos tipo panel, adecuados para modelar datos con estos niveles de heterogeneidad. Es de esperar que existan diferencias importantes entre variables correspondientes a distintos sectores de la economía, por lo que el análisis con datos de panel proporciona mayor información sobre los efectos de variables latentes no observables en el modelo, lo que permite estudiar modelos de comportamiento más complejos (Gujarati & Porter, 2009).

Cuando se analizan datos de panel pueden originarse diferencias notables en las variables en distintos períodos de tiempo, y diversas tecnologías podrían estar presentes en dichos períodos, debido al cambio tecnológico (Henningesen, 2014, p.

231). Los datos de panel permiten relajar los supuestos sobre la independencia de la eficiencia técnica de los insumos, así como de la forma de distribución que debe seguir el término de error (el ruido blanco y la ineficiencia), pero también se pueden lograr estimaciones de los niveles de eficiencia de cada país o unidad económica consistentes, mientras más grande sea el número de observaciones, lo que permite estimar la ineficiencia de manera más precisa.

VI. ESTIMACIÓN DEL MODELO

La estimación del modelo se realizó a partir de las series de tiempo y de corte transversal mencionadas en el capítulo IV, mediante la utilización del software R. Para tal efecto se emplearon los paquetes “frontier” (Coelli & Henningsen, 2013) para el desarrollo del modelo SFA y “Imtest” para efectuar las pruebas de ajuste entre los modelos probados, entre otros.

En el presente estudio se emplea la forma funcional translogarítmica por las propiedades que ésta posee, entre las cuales se destaca la flexibilidad en la sustitución de los factores; es decir, no posee la restricción del axioma de aditividad (separabilidad)¹⁴ (Behr, 2015) por lo que se le considera una versión más flexible que la Cobb-Douglas. Tampoco cuenta con la restricción de homoteticidad, es decir, la participación de los factores de la producción dentro del producto es independiente de la producción final.

No obstante, la modelación de las variables con base a la metodología de SFA también se llevó a cabo con la función de producción Cobb-Douglas debido a que es una derivación más simplificada y restringida de la función translogarítmica. Para determinar qué forma funcional se ajusta mejor a los datos empleados para la economía mexicana se utilizaron las pruebas “Wald” y de “verosimilitud” a través del contraste de ambas funciones.

En primera instancia se efectuó el análisis de regresión con base en la función translogarítmica con datos de panel para obtener el análisis de las elasticidades del producto y del cambio tecnológico para la economía mexicana.

Posteriormente, la estimación de la frontera estocástica para ambas formas funcionales se efectuó a través del método de máxima verosimilitud que proporciona el paquete “*frontier*”, dicho método permite obtener estimadores viables asumiendo independencia de los regresores, una distribución normal para el término de error

¹⁴ Las elasticidades de sustitución son constantes e iguales para cualquier par de insumos.

estándar y una distribución normal de una cola para los errores relativos a la eficiencia.

VI.1 Análisis empírico de las variables mediante la estimación de la función Translogarítmica

La estimación del modelo mediante la función translogarítmica se evaluó a través de la siguiente especificación:

$$\ln y = \alpha_0 + \sum_i \alpha_i \ln x_i + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \alpha_{ij} \ln x_i \ln x_j + \alpha_t t + \sum_i \alpha_{ti} \ln x_i + \frac{1}{2} \alpha_{tt} t^2$$

En el análisis de producción es conveniente considerar la tecnología subyacente en cada uno de los sectores de la economía mexicana, para lo cual se agrega a la función de producción una variable explicatoria que la represente ($\alpha_t t$), generalmente expresada como una variable de tendencia (myear); por lo que su coeficiente se interpretará como la tasa de cambio tecnológico por unidad de tiempo de la variable t (Henningsen, 2014, p. 231).

$$\alpha_t = \frac{\partial \ln y}{\partial t} = \frac{\partial \ln y}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t}$$

Sin embargo, la tasa de cambio tecnológico no es constante a lo largo del tiempo y el propio cambio tecnológico no impacta por igual a los factores que intervienen en la función de producción que posee cada sector de la economía mexicana. Esto último lo aborda Hicks (1932) en relación a la baja probabilidad de que el cambio tecnológico sea neutral a través de las invenciones, es decir, que los productos marginales de los factores aumenten en la misma proporción, debido a que éstas afectan de manera desigual la proporción de los productos marginales de los factores de la producción. Cuando lo anterior ocurre se dice que el cambio

tecnológico está sesgado (*biased*), es decir, en algunos casos puede ser más intensivo en capital o “*labor saving*”¹⁵ en sentido de Hicks (Rousseau, 2010).

Dado lo anterior, para que incorporar el incremento y disminución del cambio tecnológico dentro de la función se agrega un término de tendencia cuadrático con su respectiva interacción con el resto de las variables. De esta manera, la tasa de cambio tecnológico dependerá de las variables que representan los insumos y del tiempo (Henningesen, 2014, p. 245).

$$\frac{\partial \ln y}{\partial t} = \alpha_t + \sum_i \alpha_{ti} \ln x_i + \alpha_{tt} t$$

Al llevar a cabo la regresión de la función de producción translogarítmica con datos de panel mediante mínimos cuadrados ordinarios, se obtuvieron las elasticidades del producto o elasticidades parciales del producto, con la finalidad de medir las productividades marginales de los insumos en términos relativos lo cual permite que sean independientes de sus unidades de medida.

$$\varepsilon_i = \frac{\delta f(x)}{\delta x_i} \frac{x_i}{f(x)} = \frac{MP}{AP}$$

Donde:

MP es la productividad marginal de los insumos medida por sus productos marginales ($MP_i = \frac{\delta f(x)}{\delta x_i}$).

AP es el producto medio del *i*-ésimo insumo ($AP_i = \frac{f(x)}{x_i}$).

En el Anexo D se muestran los histogramas resultantes con la estimación de las elasticidades producto-insumo y la elasticidad de escala. En el caso del factor capital, la productividad marginal de éste presenta rendimientos decrecientes ya

¹⁵ El cambio tecnológico se encuentra sesgado en términos de “*labor saving*” cuando el producto marginal del capital se incrementa en mayor medida que el del trabajo para una proporción dada de capital-trabajo, por lo que la participación relativa del trabajo tenderá a disminuir incrementándose la demanda de capital. Lo mismo sucede para las invenciones “*capital saving*” en sentido inverso (Rousseau, 2010).

que al incrementarse en 1%, el producto en su conjunto sólo tendrá un incremento de 0.2%. Por su parte, el factor trabajo posee una relación 1 a 1 ya que si aumenta 1% este factor el producto tendrá un incremento de la misma proporción debido a que hay sectores que son más intensivos en mano de obra como el sector de coque y refinación de petróleo o bien el sector de intermediación financiera, como se observa en la Figura 10 (c).

La productividad marginal del uso de energía es decreciente, ya que si se incrementa su empleo en 1% el producto disminuirá 0.2% debido a la baja eficiencia energética de algunos sectores. En el caso de las emisiones, tales como el CO₂ y el N₂O, presentan un rendimiento menos que proporcional, ya que cuando éstas aumentan en 1% el producto sólo se incrementa en 0.5 y 0.4% respectivamente; en cambio para el caso del metano, aunque se incremente en 1% la emisiones de éste el producto no tendrá ningún incremento debido a que la emisión de dicho gas se encuentra focalizada en sectores específicos cuya estructura de producción está limitada a sus capacidades físicas.

Al estimar la elasticidad de escala se obtienen los rendimientos a escala de la economía mexicana, la cual revela que con un incremento de 1% de los insumos en su conjunto, se producirán rendimientos crecientes a escala ya que el producto aumentaría en 1.5%. En concordancia al comportamiento de la mayoría de los insumos; lo anterior es indicativo de que la condición de monotonicidad no se cumple para todas las observaciones. No obstante, una de las propiedades de la función translogarítmica consiste en que no se debe cumplir necesariamente con la condición de monotonicidad de manera global, debido a que siempre existirán insumos cuyas cantidades presenten productos marginales negativos (Henningesen, 2014, p. 104); situación observada en los histogramas del Anexo D.

Lo anterior se puede verificar con base en las pruebas de monotonicidad hechas por el paquete *Frontier*, las cuales indican que para el caso del factor capital, 121 observaciones presentan elasticidad negativa del producto a lo largo del periodo de estudio, 251 respecto al factor trabajo y 410 para el uso de energía.

VI.2 Estimación del modelo de Frontera Estocástica

La estimación de la frontera de producción estocástica se puede realizar bajo diferentes especificaciones que se encuentran fundamentadas en la siguiente forma general (Henningsen, 2014, p. 257):

$$\ln y_{kt} = \ln f(x_{kt}, t) - u_i + \omega_i$$

Donde;

$k = 1, \dots, K$ representa el sector

$t = 1, \dots, T$ indica el tiempo

Para las variables empleadas: Valor Agregado Bruto, Superávit Bruto de Operación, Remuneraciones a asalariados, Uso de Energía, CO₂, CH₄ y N₂O (definidas en el capítulo IV). La especificación del modelo empleado en la presente investigación consiste en estimar el término de eficiencia de manera independiente de las otras eficiencias sectoriales, es decir, no existen restricciones para el término u_i , por lo que se busca obtener las eficiencias específicas de las observaciones, para tal efecto no se toma en cuenta la estructura panel de los datos.

En la aplicación del modelo de observaciones específicas para estimar la frontera de producción, se desarrollaron los modelos que consideran el cambio tecnológico constante y neutral (*unbiased*), así como para cambio tecnológico variable y sesgado (*biased*), tanto para la forma funcional Translogarítmica como para la Cobb-Douglas. Por lo que para determinar el modelo con mejor ajuste se efectuaron las pruebas de verosimilitud mediante el contraste de los diferentes modelos (ver Anexo B).

Los resultados de las pruebas demostraron que independientemente de la existencia de cambio tecnológico para ambas formas funcionales, la función translogarítmica reflejó ser superior a la Cobb-Douglas. Sin embargo, con base en la función translogarítmica, el cambio tecnológico constante y neutral no parece ser significativo.

Por lo anterior se efectuó un último contraste con base a la forma funcional de mejor ajuste (translogarítmica), considerando en esta ocasión cambio tecnológico no constante y sesgado, contra los modelos con cambio tecnológico constante y neutral, y sin cambio tecnológico.

En la prueba de verosimilitud que contrasta la función de producción translogarítmica con tasa de cambio tecnológico variable y sesgado contra la función translogarítmica sin cambio tecnológico, el primero muestra una mayor significancia a un nivel del 5%. Asimismo, al contrastar el cambio tecnológico variable y sesgado contra cambio tecnológico constante y neutral, la prueba de verosimilitud confirma la existencia de cambio tecnológico *biased* con una tasa variable.

De esta forma se determinó que el modelo que mejor ajusta a las variables de los sectores de la economía mexicana para la estimación del precio sombra, es el que contempla el cambio tecnológico no constante en el tiempo y sesgado (*biased*) en sentido de Hicks, cuyos resultados se pueden apreciar en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Elasticidades de la función de producción translogarítmica

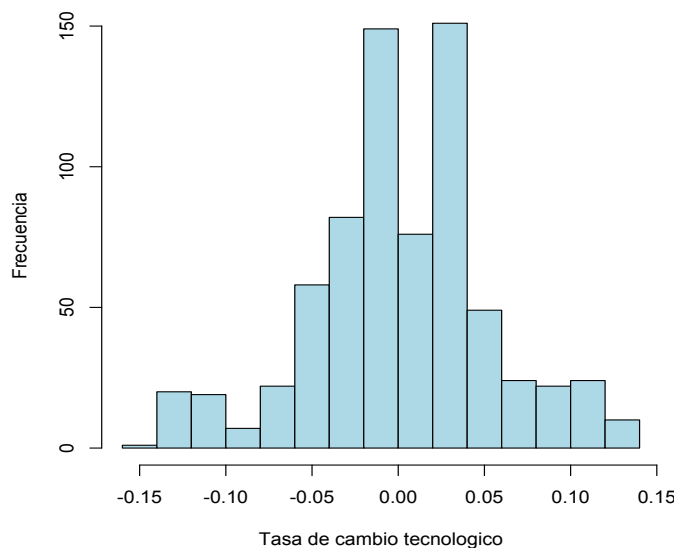
Elasticidad	CAPITAL	TRABAJO	ENERGÍA	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
PRODUCTO	0.46	0.87	-2.14	1.66	-0.36	0.71
<i>p-value</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CAPITAL	0.22	0.06	0.07	-0.29	-0.33	0.38
<i>p-value</i>	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00
TRABAJO		-1.03	-1.15	1.58	0.56	-0.64
<i>p-value</i>		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ENERGÍA			0.34	-0.16	-0.40	0.02
<i>p-value</i>			0.01	0.21	0.00	0.65
CO₂				-0.47	0.57	-0.30
<i>p-value</i>				0.002	0.00	0.00
CH₄					0.16	-0.22
<i>p-value</i>					0.00	0.00
N₂O						0.44
<i>p-value</i>						0.00

Fuente: Elaboración propia con estimaciones del modelo de la función translogarítmica.

En los resultados obtenidos del modelo seleccionado se puede observar que la condición de monotonidad no se cumple completamente con base en la estimación de las elasticidades del producto en relación al factor capital (0.46), trabajo (0.87), energía (-2.14), CO₂ (1.66), CH₄ (-0.36) y N₂O (0.71); lo anterior, con una tasa estimada de cambio tecnológico de 1% (cuyo valor se ve reflejado en la variable *myear* como resultado de la estimación del modelo *geiTITimeNnSfa* presentado en el Anexo C de la presente investigación). Asimismo, la mediana de las eficiencias indica que los sectores producen 34.7% menos de lo que posiblemente podrían producir con la cantidad de insumos empleados.

Otros resultados que se pueden obtener de la estimación de la función traslogarítmica con el método de frontera estocástica es la variación de las tasas individuales de cambio tecnológico que en su mayoría se encuentran entre -6% y 6%, como se puede observar en la Figura 13, lo cual se puede interpretar como un retroceso tecnológico en algunos sectores durante el periodo en estudio, mientras que en otros existe un débil cambio tecnológico. En el caso de la economía mexicana, este retroceso se puede explicar por la relación que existe entre el producto y el capital, que en algunos años ha presentado niveles importantes de desinversión, en ciertos sectores.

Figura 14. Variación de las tasas individuales de cambio tecnológico



Fuente: Elaboración propia con estimaciones hechas por la autora.

VI.3 Estimación de los precios sombra e interpretación preliminar

A continuación, para el propósito del presente estudio se utiliza la fórmula adoptada en el manual de la OECD para el cálculo del precio sombra, derivada del problema de optimización de la función de beneficio sujeta a la función distancia, presentado en el capítulo III.

$$p_{wr} = p_y \frac{y}{w_r} e(y, w_r)$$

Con base en los datos presentados y en los parámetros estimados mediante el ajuste del modelo de frontera estocástica de la función translogarítmica, se extraen las elasticidades de las emisiones respecto al producto ($e(y, w_r)$), las que se pueden observar en el Cuadro 3.

Para el cálculo del cociente de intensidad ($\frac{y}{w_r}$) se tomaron los valores de la producción en miles de dólares y las emisiones en giga gramos de CO₂ equivalente, por lo que éste dependerá de las características de producción de cada sector. De esta manera, el precio del producto (p_y) explicará las diferencias a través de los diferentes sectores.

Aunque todos los componentes de la fórmula son fundamentales para la estimación de los precios sombra, el cociente de intensidad y la participación del sector en el valor agregado bruto, son los factores relevantes de los precios sombra diferenciales entre sectores. Adicionalmente, la fórmula indica que la elasticidad GEI-VAB es constante para todos los sectores, es decir, no es relevante para diferenciar los precios sombra entre sectores; su utilidad se manifiesta en los precios sombra entre gases, ya que dicha elasticidad es distinta para cada gas.

En el Cuadro 4 se presentan los resultados promedio de los precios sombra y del cociente de intensidad (producto/emisiones)¹⁶ de cada uno de los sectores de

¹⁶ El cociente de intensidad es producto del problema de maximización planteado en el capítulo III con base a la metodología empleada por la OCDE (Dang & Mourougane, 2014), ya que la relación permite que éste exprese la cantidad que generará el sector en términos del valor del producto por una tonelada de contaminante. De

actividad económica de México, por tipo de contaminante para el periodo de estudio en esta investigación.

Cuadro 4. Cociente de intensidad (producto/emisión) y Precios sombra sectoriales de la economía mexicana

Sectores	Producto por emisiones			Precios sombra		
	<i>(Miles de dólares PPP por ton de CO₂ eq)</i>			<i>(Miles de dólares PPP por ton de CO₂ eq)</i>		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Agricultura, caza, pesca y silvicultura	3.5	1.5	1.5	0.42	0.0377	0.0764
Minería y extracción de petróleo	8.1	48.6	2040.7	2.58	3.36	276.13
Bebidas, alimentos y tabaco	17.6	2247.8	1314.5	2.89	80.53	91.96
Textiles	6.1	1948.7	1927.6	0.18	12.36	23.88
Productos de piel y calzado	9.6	2426.4	2831.9	0.07	3.82	8.71
Madera y corcho	7.2	460.8	312.4	0.05	0.67	0.89
Papel, imprenta y publicidad	2.8	859.2	623.1	0.04	2.72	3.85
Coque y refinación de petróleo	0.4	25.9	145.0	0.009	0.1176	1.29
Productos químicos	3.4	110.2	27.2	0.23	1.63	0.79
Hule y plástico	6.5	1973.0	2652.3	0.11	7.14	18.74
Otros minerales no metálicos	0.4	417.0	197.7	0.0071	1.52	1.41
Metales básicos	2.6	908.3	991.9	0.19	14.08	30.03
Otra maquinaria	14.4	4641.9	1738.3	0.29	20.25	14.81
Equipo eléctrico y óptico	14.2	5728.4	3556.1	1.04	90.93	110.22
Equipo de transporte	22.1	5447.7	1764.9	1.63	87.69	55.47
Otras manufacturas y reciclaje	4.7	970.5	867.3	0.10	4.61	8.05
Electricidad, gas y suministro de agua	0.3	58.4	116.6	0.0124	0.60	2.34
Construcción	16.3	4942.1	1222.3	4.48	295.98	142.94
Venta y reparación de equipo de transporte	2.8	320.5	189.4	0.03	0.66	0.76
Comercio al mayoreo, excepto equipo de transporte	55.6	32305.5	9660.2	13.89	1761.01	1028.28
Comercio al menudeo, excepto equipo de transporte; servicios de mantenimiento y reparación a viviendas	22.3	26042.7	4817.8	6.95	1765.27	637.70
Hoteles y Restaurantes	9.1	10878.3	2997.2	0.82	212.40	114.27
Transporte terrestre	5.1	1015.2	313.4	0.93	40.69	24.53
Transporte marítimo	0.7	200.4	54.6	0.0023	0.1416	0.0754
Transporte aéreo	0.4	4460.4	75.2	0.0022	5.45	0.1794
Otras actividades auxiliares de transporte y agencias de viaje	9.1	2343.9	1673.7	0.24	13.75	19.17
Correo y telecomunicaciones	15.8	22697.3	4903.7	0.90	280.96	118.53
Intermediación financiera	68.1	41790.0	11983.6	6.09	814.87	456.29
Bienes raíces	301.8	93407.6	58270.6	111.00	7491.44	9125.74
Renta de maquinaria y equipo	27.0	12841.4	4021.5	5.42	561.73	343.51
Administración pública y defensa, seguridad social	20.4	3488.2	2511.2	3.30	123.10	173.05
Educación	15.6	11160.9	4856.9	2.50	390.30	331.66
Salud y servicio social	22.4	9790.8	600.5	1.91	181.95	21.79
Otros servicios comunitarios	19.5	2.6	26.1	1.37	0.0392	0.78

Fuente: Elaboración propia con estimaciones hechas por la autora.

En primera instancia se puede apreciar que los sectores altamente contaminantes poseen los precios sombra más bajos y viceversa. Esto tiene como origen la estructura de la fórmula para la estimación de estos precios, ya que el cociente de intensidad juega un papel importante debido a la relación entre el producto y la cantidad de emisiones generadas; por lo que aquellos con un coeficiente de intensidad pequeño representarán sectores que generan contaminantes por encima

esta forma al expresar la fórmula del precio sombra: $\left[(VAB_{\text{Millones USD}}) \left(\frac{\text{Miles USD}}{\text{Ton CO}_2 \text{ eq.}} \right) (e_{(y,w_r)}) \right]$. El precio sombra queda en términos de miles USD / tonCO₂eq.

o por igual a su nivel de producción. Asimismo, la magnitud del VAB que posee cada sector tiene un efecto importante en el resultado de los precios sombra como factor de diferenciación.

A partir de la definición del precio sombra como medida del costo de oportunidad, en términos del producto deseable al que se tendría que renunciar para disminuir los productos no deseables (emisiones) con base a la estructura de producción actual (Färe, et al., 1993, p. 374), un precio sombra mayor implica un mayor costo de oportunidad de reducir una unidad adicional del producto no deseable, que a su vez también se asume como el costo marginal de abatimiento de contaminantes por parte de los agentes contaminadores. Asimismo, se pueden observar sectores con importantes cantidades de contaminantes que a su vez poseen un nivel de producción menor a éstas, por lo que el costo en el que incurrirán para disminuirlas estará en función de su coeficiente de intensidad producto-emisiones y su producto. Estos sectores poseen un costo marginal de abatimiento, o precio sombra de remediación (CMgA) bajo; por ejemplo, si un sector genera altas cantidades de metano por unidad de producto, la disminución en las emisiones de este contaminante representará sacrificar una cantidad menor de producto.

Cabe señalar que la mayor parte de los sectores que poseen un cociente de intensidad bajo tendrán costos de oportunidad bajos; no obstante, también se pueden encontrar casos de dos o más sectores en los cuales el cociente sea similar, al igual que la elasticidad producto emisiones (por ser ésta una estimación promedio para todos los sectores), por lo que el costo de oportunidad lo determinará el nivel del producto. En estos casos, el sector que tenga precios sombra más bajos implicará menores costos de abatimiento en términos de los factores que intervienen en la función de producción. El caso del sector agrícola es un claro ejemplo de estudio, pues debido a sus características, su producción puede depender de menos personas que otros sectores, así los costos de disminuir su producción para mitigar algún tipo de emisión serán menores en el factor trabajo que las afectaciones que pudiera tener otro sector con el mismo cociente de intensidad, sin embargo, no

se puede olvidar que en este y otros sectores, el cambio tecnológico en el factor capital tendría un impacto importante.

En términos generales, los resultados obtenidos de los precios sombra en la presente investigación muestran una diferenciación importante entre cada uno de los gases, ya que en promedio los precios sombra más altos se observan para el CH₄, seguido por el N₂O y por último los del CO₂, lo anterior obedece principalmente a que las relaciones de producto por emisiones son más elevadas para el CH₄, pese a esto la elasticidad producto del CH₄ no es la mayor en relación a la de los otros gases.

Un caso particular que representa a los sectores con mayores precios sombra es el sector de bienes raíces, que posee una importante participación relativa dentro del valor agregado bruto, de acuerdo con los datos compilados por el INEGI. Una explicación al alto valor agregado bruto asignado a este sector es debido a que sus precios generalmente tienen una dinámica alcista, mucho mayor que el de los otros sectores, por lo que dichos precios son resultantes de la especulación inmobiliaria; ya que este sector no comprende un proceso intensivo de transformación industrial y por ende de generación de emisiones.

Por el contrario, los precios sombras más bajos corresponden a los sectores: transporte marítimo; transporte aéreo y el de electricidad, gas y agua, cuya participación en el valor agregado bruto no es tan relevante, a diferencia del de bienes raíces (Figura 10a).

Para el caso del dióxido de carbono el sector de Agricultura, caza, pesca y silvicultura tiene un precio sombra de \$416 USD PPP por tonelada de CO₂ eq., mientras que el sector de Equipo de transporte tiene un precio sombra de \$1,633 USD PPP por tonelada de CO₂ eq. El resultado para el primer sector es considerablemente más bajo y quizá un poco diferente a lo que aparentemente se esperaría siendo uno de los principales sectores que generan emisiones de este gas. Sin embargo, su costo marginal de reducción de emisiones se encuentra en concordancia con su participación dentro del VAB nacional.

VI.4 Interpretación de los Precios Sombra

La gran diferencia entre los precios sombra sectoriales se atribuye a que las políticas públicas en materia ambiental no asignan de manera eficiente un nivel óptimo de emisiones. Una característica de la eficiencia en las políticas ambientales consiste en que exista un mismo costo marginal de reducción de emisiones entre las unidades económicas que conduzca a un beneficio ambiental por igual, como resultado de disminuir los contaminantes marginalmente (Färe, et al., 1993, p. 380).

Uno de los beneficios de la estimación de los precios sombra es la viabilidad que ofrece de alcanzar dicho óptimo de emisiones, ya que con base al ejercicio realizado en la presente investigación se puede estimar un precio sombra promedio para cada uno de los gases, mismo que podría fungir como el costo al carbono que se le debería asignar a cada uno de los principales gases de efecto invernadero.

En el caso del CO₂ el costo al carbono se fijaría en \$4,990 USD PPP por tonelada de CO₂ eq. (cantidad obtenida con base al promedio de los precios sombra para este gas), de tal forma que los sectores altamente contaminantes con precios sombra bajos tendrán un CMgA del mismo orden, ubicándose por debajo del precio de referencia lo cual los incentivaría a disminuir sus emisiones hasta que éstas igualen el precio promedio previamente estimado. Por su parte, los sectores que posean precios sombra por arriba del costo al carbono estimado se caracterizarán por ser los menos contaminantes y tendrán la posibilidad de aumentar sus emisiones hasta que éstas igualen dicho costo al CO₂.

En este orden de ideas, mediante la aplicación del criterio anterior al extenso grupo de contaminadores heterogéneos que participan dentro de los sectores de la economía mexicana, logrará generalizar y distribuir las medidas de reducción de emisiones igualando los CMgA de cada uno hasta el punto donde el reducir una unidad adicional de contaminantes costará más que pagar el precio al CO₂ establecido. Grafton et al. (2004) señala que, al equiparar los costos marginales de reducción, las emisiones estarán controladas de una forma costo efectiva.

Los estudios equivalentes reportados en la literatura internacional presentan rangos de valores extremos como se puede observar en los datos reportados por la OECD (Dang & Mourougane, 2014) al estimar los precios sombra por países y tipo de gas de efecto invernadero, cuyos resultados arrojaron precios sombra muy bajos para el CO₂ en el caso de Canadá y Australia (\$240 USD en promedio), a diferencia de Suiza, Suecia, Francia y Noruega cuyos precios alcanzaron los \$800 USD en promedio, lo anterior en concordancia con la aplicación de impuestos a los combustibles fósiles en cada uno de los países mencionados, ya que mientras Canadá y Australia tienen bajos impuestos a los combustibles fósiles, Suecia y Noruega poseen impuestos más rigurosos (Dang & Mourougane, 2014, p. 20).

Por su parte, Ishinabe et al. (2013) calcularon los precios sombra para 37 países y 15 sectores de 1,024 compañías internacionales, sus resultados a nivel sectorial arrojaron que los precios sombra en las industrias pesadas tales como construcción y materiales son relativamente bajos, en el orden de \$2,315 USD, a diferencia de los sectores de servicios como el Financiero, ventas al menudeo y bienes raíces, cuyo precio sombra se encuentra alrededor de \$9,620 USD (Ishinabe, et al., 2013, p. 8).

En la presente investigación, las estimaciones para la economía mexicana arrojaron valores similares, no obstante a que los sectores aquí modelados se caracterizan por mayores grados de heterogeneidad derivada de: (i) la cantidad y diversidad de los sectores considerados, (ii) la diversidad natural de la intensidad tecnológica que caracteriza los distintos procesos productivos, (iii) las diferencias en desarrollo tecnológico y competitividad entre la economía mexicana y las economías industrializadas modeladas en el estudio que compila la OECD, y (iv) no obstante los puntos anteriores, se puede observar que la metodología de Análisis de Frontera Estocástica, SFA, constituye una técnica de modelación econométrica en el estado del arte, de uso común para investigaciones de esta naturaleza.

CO₂

Los precios sombra más bajos para el CO₂ corresponden a los sectores de Coque y refinación, Otros minerales no metálicos, y generación de electricidad (\$9, \$7, \$12 USD PPP por tonelada de CO₂ eq., respectivamente). Por otro lado, los resultados más elevados se dan en los sectores de Bienes raíces, comercio al mayoreo y comercio al menudeo (\$111, 001, \$13,892, \$6,948 USD PPP por tonelada de CO₂ eq., respectivamente), mismos que no llevan a cabo una transformación industrial. Con respecto a los primeros, los bajos precios sombra que presentan obedecen principalmente a niveles muy bajos en el componente de producto por emisiones. Esto debido a que el volumen de emisiones es mayor que la generación de valor agregado bruto, lo que hace que dicho cociente tenga tienda a cero, por lo que el precio sombra resultante será pequeño. Lo anterior también se le puede aunar una baja regulación o nula existencia de impuestos por emitir este contaminante; mientras que los sectores con precios sombra más elevados cuentan con niveles de producto por emisiones elevados.

Como se señaló anteriormente, a pesar de que el componente de producto por emisiones es de los que más influye en los precios sombra, este no necesariamente definirá el resultado del costo de oportunidad respectivo. Tal es el caso de los sectores de Agricultura, caza, pesca y silvicultura; Papel, imprenta y publicidad; Productos químicos; Metales básicos; Venta y reparación de equipo de transporte; cuyo cociente de intensidad presenta un nivel de \$0.003 Miles de DLS PPP por ton de CO₂ eq. (aproximadamente). Mientras que sus precios sombra son de \$416, \$40, \$232, \$187 y \$27 DLS PPP por ton de CO₂ eq., respectivamente. A pesar de que poseen el mismo coeficiente de emisiones la cantidad de valor agregado bruto generado es mayor a las emisiones que generó. Esto implica que los cambios obedecen al valor del producto fundamentado en la estructura de producción de cada sector, es decir, refleja las diferentes proporciones en sus factores de producción para alcanzar su nivel de producción, VAB.

La aplicación de los precios sombra con base al fundamento teórico anteriormente planteado refiere que el sector de otros minerales no metálicos cuyo precio sombra es de \$7 DLS por tonelada de CO₂ eq., tendría incentivos para reducir sus emisiones hasta el punto donde el CMgA exceda el costo al carbono obtenido mediante el promedio de los precios sombra correspondientes al CO₂ (\$4,990 USD PPP por tonelada de CO₂ eq.); mientras que el sector de bienes raíces podrá operar hasta que su CMgA alcance el punto de igualdad con el costo al carbono. Por lo que al aplicar este criterio en cada uno de los sectores, el nivel de emisiones de la economía mexicana en conjunto llegará a un nivel óptimo.

CH₄

En el caso del metano, los sectores con menores precios sombra corresponden a Agricultura, caza, pesca y silvicultura; Otros servicios comunitarios; Coque y refinación de petróleo y Transporte marítimo, con \$38, \$39, \$118 y \$142 DLS PPP por ton de CO₂ eq., respectivamente. Sin embargo, sólo en los dos primeros casos, estos valores obedecen a sus niveles de producto por emisiones, mientras que en los últimos dos dependen de los niveles de producción.

El costo social estimado del metano es de \$419,759 DLS PPP por ton de CO₂ eq., por lo que los sectores con precios sombra por debajo de este precio tendrán incentivos para reducir sus emisiones hasta alcanzar el punto de equivalencia con el costo social del CH₄ en lugar de pagar dicho costo.

N₂O

En el caso de las emisiones de óxido nitroso, los precios sombra más bajos corresponden al sector de Agricultura, caza, pesca y silvicultura y Transporte marítimo con \$76 y \$75 DLS PPP por ton de CO₂ eq. (respectivamente), seguidos por el sector de Transporte aéreo con \$179 DLS PPP de CO₂ eq., Productos químicos con \$789 DLS PPP de CO₂ eq. y Venta y reparación de equipo de transporte con \$759 DLS PPP de CO₂ eq. Con excepción de este último sector, los

precios sombra del resto de los sectores mencionados, corresponden a bajas relaciones de producto por emisiones.

El costo social estimado para este gas se encuentra en el orden de \$ 387,879 DLS PPP por ton de CO₂ eq. Los sectores que presentan incentivos para reducir sus emisiones serían principalmente, el sector de Agricultura, caza, pesca y silvicultura, y el de Transporte marítimo.

Al tomar como punto de referencia el costo social estimado para cada uno de los gases, con base al Cuadro 4 es posible observar, que la mayoría de los sectores deben reducir sus emisiones de GEI en función de su CMgA para alcanzar el nivel de emisiones óptimo; mientras que únicamente cuatro sectores (Comercio al mayoreo, excepto equipo de transporte; Comercio al menudeo, excepto equipo de transporte; servicios de mantenimiento y reparación a viviendas; Intermediación financiera y Bienes raíces) tienen la posibilidad de continuar con su esquema de producción mientras aumenten sus emisiones de manera marginal.

VI.5 Aplicaciones en política pública de los Precios Sombra

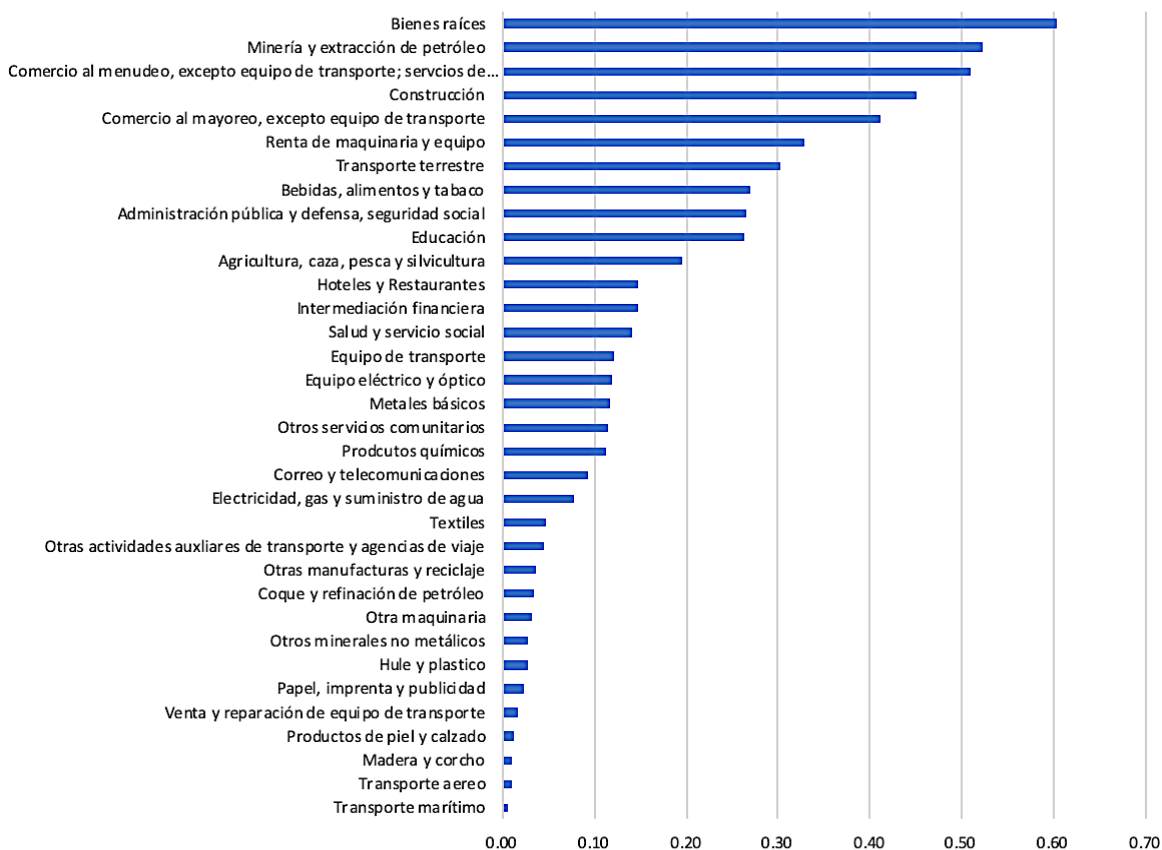
La fórmula OECD del precio sombra depende de tres componentes: el principal corresponde a la intensidad de emisiones promedio en el periodo de estudio, que representa el uso de cierta tecnología; el segundo es la elasticidad de producto/emisiones que sirve para distinguir la propensión a generar emisiones por tipo de gas; el tercero corresponde al valor agregado.

En el Cuadro 4 se presenta en primera instancia el cociente de intensidad expresado en miles de dólares PPP por tonelada de CO₂ eq., y posteriormente el precio sombra de producir una tonelada adicional de GEI. A partir de estos dos elementos se construye un cociente comprendido por los precios sombra y la intensidad de emisiones, ambos expresados en miles de dólares por tonelada de CO₂ eq., para obtener un indicador que represente la participación del precio sombra con respecto al cociente de intensidad. Este indicador conformado a partir de la suma de los ratios de cada tipo de gas nos permite identificar los sectores cuya producción sea

superior o inferior a las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O generadas en una tonelada; por lo que a medida que este indicador tienda a uno el sector será más eficiente, es decir, podrá incrementar su producción más que proporcionalmente con respecto a la penalización asociada a las emisiones de efecto invernadero, en otras palabras, el costo por disminuir emisiones en una tonelada de CO₂ eq. será relativamente poco significativo con respecto al coeficiente de intensidad.

La eficiencia que captura este indicador indica que con base a un conjunto dado de insumos en la conformación de la función de producción genera un nivel de producción sobre la frontera de producción o cercana a ella, por tanto el costo de disminuir sus emisiones es poco significativo con respecto al nivel de producto que puede alcanzar por tonelada de emisiones.

Figura 15. Indicador de eficiencia por sector de la economía mexicana



Fuente: Elaboración propia con estimaciones hechas por la autora.

Con base a los resultados obtenidos en un primer análisis se puede observar que los principales sectores con mayor eficiencia son Bienes raíces, Minería y extracción de petróleo, y Comercio al menudeo; mientras que los menos eficientes son Transporte marítimo, transporte aéreo y Madera y corcho. Asimismo, se observaron 15 sectores con un nivel de eficiencia muy bajo, menor a 0.10; dentro de estos destacan los sectores de: Electricidad, gas y suministro de agua y Coque y refinación de petróleo, principales generadores de GEI del país. En el Anexo

A partir de la necesidad de establecer una clara diferenciación de lo que debe pagar un sector eficiente y uno que no lo es por la emisión de GEI en proporción a la cantidad producida, se deriva un indicador de política pública a partir del indicador de eficiencia, mediante la ponderación de éste último respecto a su producto por emisiones, de esta manera se obtiene el porcentaje que debería cobrarse a un sector de actividad económica ineficiente al incrementar su producción y las emisiones correspondiente. Este indicador da mayor relevancia al producto por emisiones, de tal forma que aquellos sectores que generan poco producto por tonelada de emisiones GEI tendrán que pagar una penalización más alta por costos ambientales.

En el ejemplo del Cuadro 5 se presenta un incremento hipotético de la producción para tres sectores, su indicador de política pública relacionado, el costo del incremento como la penalización a pagar asociada al indicador y el valor sombra de las emisiones generadas por el incremento de la producción.

Cuadro 5. Indicador de política pública e impuesto a las emisiones

Sectores	Millones de dólares					Emisiones por incremento (Toneladas CO ₂ eq.)		
	VAB 2015	Incremento de 5% en la producción	Índice de política pública %	Costo incremento	Costo del incremento con Precios Sombra	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Agricultura, caza, pesca y silvicultura	63,363	3,168	8.57%	271.6	620.5	907,628	2,182,026	2,103,789
Electricidad, gas y suministro de agua	32,329	1,616	17.98%	290.7	125.4	6,145,104	27,689	13,868
Construcción	149,129	7,456	1.69%	126.3	3,366.7	456,755	1,509	6,101

Fuente: Elaboración propia con estimaciones hechas por la autora.

En los sectores de Agricultura, caza, pesca y silvicultura, así como en el de la Construcción la penalización es menor en comparación al costo de las emisiones calculadas por su precio sombra. A diferencia del sector de Electricidad, gas y suministro de agua cuyo valor sombra de las emisiones es menor. Lo anterior se encuentra estrechamente relacionado a los bajos niveles de producción que tiene en relación a las emisiones generadas, por lo que en este caso específico se debe aplicar la penalización estimada mediante el indicador de política pública.¹⁷

La propuesta derivada de esta investigación es que los sectores altamente ineficientes como Coque y refinación de petróleo, Otros minerales no metálicos, Electricidad, gas y suministro de agua y Transporte aéreo paguen conforme al indicador de política pública propuesto, mientras que los sectores eficientes o los menos ineficientes, paguen conforme a su precio sombra. Lo anterior garantiza que el costo por generación de emisiones será adecuado para cada sector, debido a que se asocia al proceso de maximización del que se deriva el cálculo del precio sombra.

¹⁷ El cuadro con el ejercicio completo para los 34 sectores se puede consultar en el Anexo F.

CONCLUSIONES

La formulación y fijación de un costo social al carbono como mecanismo de mercado que permite a los países (en el caso específico de esta investigación a México) cumplir con una reducción costo efectiva de las emisiones, está relacionado con la aplicación de una metodología robusta apegada a la teoría económica que garantiza su efectividad en la aplicación de políticas públicas de mitigación en las emisiones de GEI.

Por tal motivo en el presente trabajo se elaboró una base de datos en congruencia con la información publicada por el INEGI, el INECC y organismos internacionales como el Banco Mundial y World Input-Output Database, parte de su tratamiento incluyó homologación y reclasificación de los sectores; aún cuando sería deseable un nivel más detallado de ciertos sectores tal como el sector de agricultura, caza, pesca y silvicultura, el nivel de desagregación de la información presentada demuestra ser lo suficientemente representativo para diferenciar las actividades económicas del país. Lo anterior, contribuyó a establecer un espacio temporal amplio para lograr suficientes grados de libertad y estimadores consistentes en los modelos de datos panel y de SFA realizados.

La estimación de los precios sombra se llevó a cabo mediante la aplicación del modelo SFA para 34 sectores de la economía mexicana en el que cada uno de estos representa una función de producción específica, por lo que los datos suelen ser heterogéneos. Lo anterior puede ser un problema en la modelación debido a la heterogeneidad entre funciones y los pesos relativos de los sectores en la producción, no obstante, lo anterior no genera problemas de mala especificación en el modelo y brinda resultados confiables gracias a su robustez y a la estimación de los precios sombra mediante el lema dual de Shepard, cuyo resultado permite la obtención de precios sombra normalizados para posteriormente convertirlos en precios sombra absolutos, asumiendo que el precio sombra de un bien comercializable coincide con su precio de mercado. De esta manera se

establecieron inferencias diferenciadas por sector y gas de efecto invernadero en función de su estructura de producción.

La amplia variabilidad entre los precios sombra permite identificar a los sectores que tendrían incentivos para mitigar sus emisiones al poseer un costo marginal de reducción de emisiones menor al costo del carbono estimado, revelándose un patrón de comportamiento a lo largo de los sectores de menor generación de emisiones y mayor producto, así como de aquellos sectores con mayor generación de emisiones y bajo nivel de producción, lo que permitiría a los formuladores de política pública asignar tasas de penalización a las emisiones por tipo de gas de efecto invernadero, cuya aplicación sea costo eficiente.

La estimación de los precios sombra diferenciados por sector de actividad económica permitió generar un indicador de eficiencia para cada uno entre su precio sombra y el coeficiente de intensidad asociado a su función de producción. Dicho indicador no sólo es una herramienta de política pública, sino que representa la eficiencia de cada sector asociada a sus contaminantes. En la medida que este indicador sea más cercano a 1, la frontera eficiente, significará que el costo por reducir sus emisiones es relativamente poco significativo, con respecto al nivel de producto que logrará alcanzar por tonelada de emisiones, en otras palabras, a un sector con estas características, le será relativamente barato mejorar sus emisiones debido a que ya es eficiente.

Mediante el ejercicio de política pública realizado en la presente investigación se busca castigar a los sectores altamente contaminantes debido a su ineficiencia en función del exceso de emisiones generadas por cantidad de producto, con base a un costo por emisiones mayor al valor sombra de los tres principales gases.

Los precios sombra calculados para los 34 sectores de la economía mexicana, de características tan diversas entre sí, constituyen una referencia probada para el mejoramiento de las políticas de Estado relacionadas. Tal como lo ha aplicado Reino Unido desde 2007 en la evaluación de política pública, inversiones y en todas las áreas del gobierno donde se lleven a cabo toma de decisiones. Asimismo,

representan una aportación metodológica para las investigaciones sobre la economía del cambio climático, ya que la mayor parte de los estudios internacionales publicados se refieren a economías con estructura similar o a sectores industriales homogéneos. El valor de los precios sombra estimados en el presente estudio, es consistente con la ubicación de México entre los países con menores emisiones de gases de efecto invernadero.

Lo anterior confirma la gran flexibilidad metodológica de los instrumentos econométricos aplicados en la presente investigación, es decir, la estimación de la frontera estocástica de la función translogarítmica mediante el método de máxima verosimilitud, permite validar la hipótesis principal al poner en evidencia la estimación del precio sombra como mejor medida para conocer el costo social del carbono y de esta manera alcanzar un precio y nivel óptimos de emisiones de GEI.

Con base en los resultados obtenidos, se pueden identificar los sectores económicos que demandan mayor atención en materia ambiental en México debido a la ineficiencia evidenciada en el indicador propuesto, el cual refleja las características de la estructura de la función de producción. Lo anterior valida la hipótesis secundaria propuesta en la presente investigación.

El impacto profundo del cambio tecnológico que, aunque se menciona como escenario futuro, ya está presente en la sociedad contemporánea, constituye un determinante de la eficiencia productiva en todas las industrias, el ahorro de energía y la administración y control inteligente de todos los procesos de negocio. Se puede decir que las plantas industriales modernas, se han convertido en verdaderos activos digitales. En el sector energético de México, no son recientes tecnologías y aplicaciones como SCADA (Sistemas de Control y Adquisición de Datos), ERP (Enterprise Resource Planning) y robustas redes telemáticas, terrestres y satelitales, que desde hace más de cuarenta años se implantaron y desarrollaron en las grandes empresas energéticas y en los principales centros de investigación de México. A la luz de las consideraciones anteriores, estos avances a nivel

internacional, sin duda, adecuadamente aprovechados, permitirán contribuir a lograr las metas climáticas previstas por el IPCC para esta centuria.

La formulación de precios sombra aporta criterios metodológicos para generar unidades de cuenta que permitan incorporar los costos sociales de las emisiones en los proyectos de inversión industriales y de estructura, tal como lo lleva a cabo el Banco Mundial desde 2017 al incluir el valor del costo social del carbono a través de su precio sombra dentro de los análisis económicos para el financiamiento de proyectos de inversión en su documento de Política Operativa y Procedimiento Bancario.

De igual forma, esta metodología es una herramienta valiosa dentro de los mercados de emisiones de carbono, ya que permiten estimular el comercio de certificados de emisiones entre los sectores previamente identificados con precio sombra altos con aquellos sectores que posean precios sombra bajos y promover la disminución eficiente de emisiones de forma general.

Adicionalmente, con base en los resultados obtenidos se podría inferir que la estimación de precios sombra a nivel agregado para una economía representaría una ventaja aparente por la homogeneidad que poseen los datos; sin embargo, también tendería a ocultar las diferencias sectoriales entre los distintos procesos de producción y las diversas tecnologías; asimismo podría enmascarar áreas de oportunidad que permitan mejorar las políticas regulatorias.

La consecuencia principal de los resultados obtenidos es el hecho de que la estimación diferenciada de los precios sombra a nivel sectorial, permite los siguientes beneficios:

- (i) Enfocar a nivel sectorial los diagnósticos y estrategias ambientales, lo que coadyuvaría a lograr mayor precisión, rigor metodológico y objetividad.
- (ii) Jerarquizar la asignación de recursos conforme a prioridades nacionales para la promoción sustentable del desarrollo industrial y las políticas en ciencia y tecnología correspondientes.

- (iii) Identificar áreas de oportunidad para el mejoramiento y desagregación de la estadística sectorial por parte del INECC en los inventarios de gases, con la finalidad de que las clasificaciones sean comparables con las estadísticas publicadas por el INEGI, por ejemplo en el caso de silvicultura cuyo análisis debería hacerse de manera separada del sector agricultura, ganadería, caza y pesca.
- (iv) Incentivar las iniciativas institucionales que correspondan para mejorar y ampliar el presente estudio, en aspectos como el rediseño del proceso de organización, clasificación y prueba de una base de datos ambientales más robusta; y asimismo desarrollar, mejorar y complementar los métodos y tecnologías empleadas en esta experiencia.
- (v) Mejorar la eficacia de las políticas de Estado relacionadas con los puntos anteriores.

Finalmente, la estimación de precios sombra de GEI presupone una etapa posterior al ajuste econométrico, para su interpretación y adecuación a los objetivos y condiciones fácticas de la política pública, la regulación específica así como el desarrollo económico y tecnológico de cada sector o país. Lo anterior, es de particular importancia para el caso que nos ocupa en esta investigación, ya que en la literatura revisada, no se encontraron estudios similares de estimación de precios sombra al nivel desagregado por sectores económicos, tan heterogéneos entre sí.

Bibliografía

Carbon Pricing Leadership Coalition, 2017. *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*. s.l.:World Bank.

Lee, J.-D., Park, J.-B. & Kim, T.-Y., 2002. Estimation of the shadow prices of pollutants with production/environment inefficiency taken into account: a nonparametric directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, Issue 64, p. 365–375.

Lee, M., 2005. The shadow price of substitutable sulfur in the US electric power plant: A distance function approach. *Journal of Environmental Management*, Volume 77, pp. 104-110.

Coase, R. H., 1960. The problem of social cost. *The Journal of Law and Economics*, Volume 3, pp. 1-44.

Coelli, T. & Henningsen, A., 2013. *frontier: Stochastic Frontier Analysis. R package version 1.1.* [Online]
Available at: <http://CRAN.R-Project.org/package=frontier>

Coggins, J. S. & Swinton, J. R., 1996. The Price of Pollution: A Dual Approach to Valuing SO Allowances. *Journal of Environmental Economics and Management*, Jan, 30(1), p. 58]72.

Comisión de Estadística de las Naciones Unidas, 2008. *Sistema de Cuentas Nacionales 2008*, s.l.: OECD, Naciones Unidas, Banco Mundial, FMI, Eurostat.

Conde, C., 2011. *México y el Cambio Climático Global*, México: Semarnat.

Cuesta, R. A., Knox Lovell, C. A. & Zofío, J. L., 2009. Environmental efficiency measurement with translog distance functions: A parametric approach. *Ecological Economics*, Issue 68, pp. 2232-2242.

Baumol, W. J. & Oates, W. E., 1988. *The theory of environmental policy*. 2ª ed. New York: Cambridge University Press.

Behr, A., 2015. *Production and Efficiency Analysis with R*. Switzerland: Springer.

Boyd, G., Molburg, J. & Prince, R., 1996. *Alternative methods of marginal abatement cost estimation: nonparametric distance functions*. s.l., s.n., p. 86–95.

Dang, T. & Mourougane, A., 2014. Estimating Shadow Prices of Pollution in OECD Economies. *OECD Green Growth Papers*.

de la Vega Navarro, A., 2015. Apuntes acerca del lugar del conocimiento económico en los análisis del IPCC. En: *México ante la urgencia climática: ciencia, política y sociedad*. 1ª edición ed. México: Universidad Nacional Autónoma de México - CEIICH, pp. 89-110.

de Bruyn, S. et al., 2010. *Shadow Prices Handbook: Valuation and weighting of emissions and environmental impacts*, s.l.: s.n.

Dreze, J. & Stern, N., 1990. Policy reform, shadow prices, and market prices. *Journal of Public Economics*, Junio, 42(1), pp. 1-45.

ESMAP, 1999. *The Effect of a Shadow Price on Carbon Emission in the Energy Portfolio of the World Bank: A Backcasting Exercise*, WashingtonD, C: s.n.

Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C. A. K. & Yaisawarng, S., 1993. Derivation of shadow prices for undesirable outputs: A distance function approach. *The Review of Economics and Statistics*, Mayo, 75(2), pp. 374-380.

Färe, R., Grosskopf, S. & Knox Lovell, C. A., 1985. *The Measurement of Efficiency of Production*. New York: Springer.

Färe, R., Grosskopf, S., Noh, D.-W. & Weber, W., 2005. Characteristics of a polluting technology: Theory and practice. *Journal of Econometrics*, June, 126(2), p. 469–492.

Fried, H. O., Knox Lovell, C. A. & Schmidt, S. S., 2008. *The Measurement of Productive Efficiency and Productivity Growth*. NewYork: Oxford University.

Gay, C., Estrada, F. & Martínez, B., 2010. Cambio climático y estadística oficial. *Realidad, datos y espacio: Revista Internacional de Estadística y Geografía*, noviembre. Issue 1.

Gobierno de la República, 2014a. *Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018*, México: s.n.

Gobierno de la República, 2014b. *Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático para el periodo 2020-2030*, México: Presidencia de la República.

Grafton, R. Q. et al., 2004. *Economics of the environment and natural resources*. United Kingdom: Blackwell Publishing.

Guan, X., Zhang, J., Wu, X. & Cheng, L., 2018. The Shadow Prices of Carbon Emissions in China's Planting Industry. *Sustainability*, marzo, Volume 10, p. 753.

Gujarati, D. N. & Porter, D. C., 2009. *Econometría*. 5a. ed. s.l.:McGraw-Hill.

Henningsen, A., 2014. *Introduction to Econometric Production Analysis with R*, s.l.: s.n.

Hille, E. & Althammer, W., 2015. *Measuring climate policy stringency: A shadow price approach using energy prices*. s.l., s.n.

Hicks, J. R., 1932. *The theory of wages*. 384 ed. Londres: Macmillan.

INECC, 2018. *Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, México: SEMARNAT.

IPCC, 1990. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ginebra: s.n.

Ishinabe, N., Fujii, H. & Managi, S., 2013. The True Cost of Greenhouse Gas Emissions: Analysis of 1,000 Global Companies. *PLoS ONE*, November.8(11).

Jaffe, A. B., Peterson, S. R. & Portney, P. R., 1995. *Journal of Economic Literature*, Marzo, Volume 33, pp. 132--163.

Khademvatani, A. & Gordon, D., 2013. A marginal measure of energy efficiency: The shadow value. *Energy Economics*, Issue C, pp. 153-159.

McKittrick, R., 2016. A Practical Guide to the Economics of Carbon Pricing. *SPP Research Papers*, 9(28).

Matyas, L. & Sevestre, P., 2008. *The Econometrics of Panel Data*. 3^a ed. s.l.:Springer.

Miller, R. E. & Blair, P. D., 2009. *Input-Output Analysis: Foundations and Extensions*. Inglaterra: Cambridge University Press.

Naciones Unidas, 1992. *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. s.l.:s.n.

Naciones Unidas, 1998. *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.

Nicholson, W., 1997. *Teoría Microeconómica: Principios básicos y aplicaciones*. Madrid: McGraw-Hill.

Oates, W. E. & Cropper, M. L., 1992. Environmental Economics: A Survey. *Journal of Economic Literature*, Jun, 30(2), pp. 675-740.

Pearce, D. W. & Turner, R. K., 1995. *Economía de los recursos naturales y del medio ambiente*. Madrid: Celeste Ediciones.

Pérez Espejo, R., Ávila Foucat, S. & Aguilar Ibarra, A., 2010. *Introducción a las Economías de la Naturaleza*. México: UNAM Instituto de Investigaciones Económicas.

Pindyck, R. S., 2013. Climate change policy: What do the models tell us?. *Journal of Economic Literature*, septiembre, 51(3), pp. 860-872.

Pindyck, R. S., 2017. Coase Lecture—Taxes, Targets and the Social Cost of Carbon. *Economica*, Julio, 84(335), pp. 345-364.

Pindyck, R. S., 2019. The social cost of carbon revisited. *Journal of Environmental Economics and Management*, Marzo, Volume 94, pp. 140-160.

Pindyck, R. S. & Rubinfeld, D. L., 2009. *Microeconomía*. 7ª edición ed. Madrid: Pearson Educación.

Pittman, R. W., 1981. Issue in pollution control: Interplant cost differences and economies of scale. *Land Economics*, February.57(1).

Presidencia de la República, 2012. *Ley General de Cambio Climático*. México: s.n.

Price, R., Thornton, S. & Nelson, S., 2007. *The social cost of carbon and the shadow price of carbon: What They are, and how to use them in economic appraisal in the UK*, London: Department for Environment, Food and Rural Affairs.

Ramirez M., P., 1991. Las funciones homogéneas y su uso en economía. *Lecturas de Economía*, julio-diciembre, Issue 35, pp. 209-224.

Reinhard, S., Knox Lovell, C. & Thijssen, G. J., 2000. Environmental efficiency with multiple environmentally detrimental variables; estimated with SFA and DEA. *European Journal of Operational Research*, Issue 121, p. 287±303.

Rousseau, P. L., 2010. Biased and Unbiased Technological Change. In: *The New Palgrave Economics Collection*. Londres: Palgrave Macmillan.

Semarnat, 2013. *Estrategia Nacional de Cambio Climático*. México: Gobierno de la República.

Shephard, R. W., 1970. *Theory of cost and production functions*. New Jersey: Princeton University Press.

Shephard, R. W., 1970. *Theory of Cost and Production Functions*.

Stern, N., 2006. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press.

Taraska, G. et al., 2016. *Propuestas para una Estrategia Climática de América del Norte*, s.l.: s.n.

Tol, R. S. J., 2011. The social cost of carbon. *Annual Review of Resource Economics*, 3(1), pp. 419-443.

UK Met Office, 2011. *Climate: Observations, projections and impacts. Mexico, United Kingdom*: s.n.

World Bank, 2017. *Guidance note on shadow price of carbon in economic analysis*, Washington, D. C.: World Bank Group.

ANEXO A

Estadísticos principales de las variables empleadas en la estimación del modelo de SFA para el cálculo de los precios sombra de los 34 sectores de la economía mexicana durante el periodo de 1995-2015.

	VAB	SBO	W	EU	CO₂	CH₄	N₂O
Observaciones	714	714	714	714	714	714	714
Mínimo	1543	386.3	3803.5	7668.6	379.9	0.46	1.3
Máximo	353343	419479.2	146608.0	4349042.6	132589.4	59677.33	57326.3
Rango	351799	419092.9	142804.5	4341374	132209.5	59676.88	57325
Sum	43520965	30905234.6	18633460.6	204937094.2	7258162.4	1508855.99	1101339.3
Mediana	38209	23708.4	18817.8	68168.1	3277.9	9.39	27.6
Media	60954	43284.6	26097.3	287026.7	10165.5	2113.24	1542.5
Var	4021072394	3148559443	392308905.2	5.31669E+11	363735328.3	77086509	65692360.2
Desv. Est.	63412	56112	19806.8	729156.4	19071.8	8779.89	8105.1
Coef. Var	1	1.3	0.8	2.5	1.9	4.15	5.3

ANEXO B

Pruebas de verosimilitud para determinar la forma funcional y la existencia de cambio tecnológico

<pre> Likelihood ratio test Model 1: geiTlTimeSfa Model 2: geiTlSfa #Df LogLik Df Chisq Pr(>Chisq) 1 31 -496.63 2 30 -497.90 -1 2.5518 0.1102 </pre>	<p>La prueba de verosimilitud muestra que la variable t correspondiente al cambio tecnológico en el tiempo (myear) no es significativa.</p>
<pre> Likelihood ratio test Model 1: geiTlSfa Model 2: geiCdSfa #Df LogLik Df Chisq Pr(>Chisq) 1 30 -497.90 2 9 -813.46 -21 631.12 < 2.2e-16 *** --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 </pre>	<p>Dado que el p-value (-2.2×10^{-16}) de ambas pruebas es menor a 5%, se rechaza el modelo estimado con la forma funcional Cobb-Douglas.</p>
<pre> Model 1: geiTlTimeSfa Model 2: geiCdTimeSfa #Df LogLik Df Chisq Pr(>Chisq) 1 31 -496.63 2 9 -813.46 -22 633.67 < 2.2e-16 *** --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 </pre>	

Fuente: Elaboración propia con estimaciones hechas por la autora.

Prueba de verosimilitud para definir el tipo de cambio tecnológico y su variabilidad

Cambio tecnológico variable y parcial vs Sin cambio tecnológico	Cambio tecnológico variable y parcial vs Cambio tecnológico constante y neutral
<pre> Likelihood ratio test Model 1: geiTlTimeNnSfa Model 2: geiTlSfa #Df LogLik Df Chisq Pr(>Chisq) 1 38 -389.19 2 30 -497.90 -8 217.43 < 2.2e-16 *** --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 </pre>	<pre> Likelihood ratio test Model 1: geiTlTimeNnSfa Model 2: geiTlTimeSfa #Df LogLik Df Chisq Pr(>Chisq) 1 38 -389.19 2 31 -496.63 -7 214.88 < 2.2e-16 *** --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 </pre>

Fuente: Elaboración propia con estimaciones hechas por la autora.

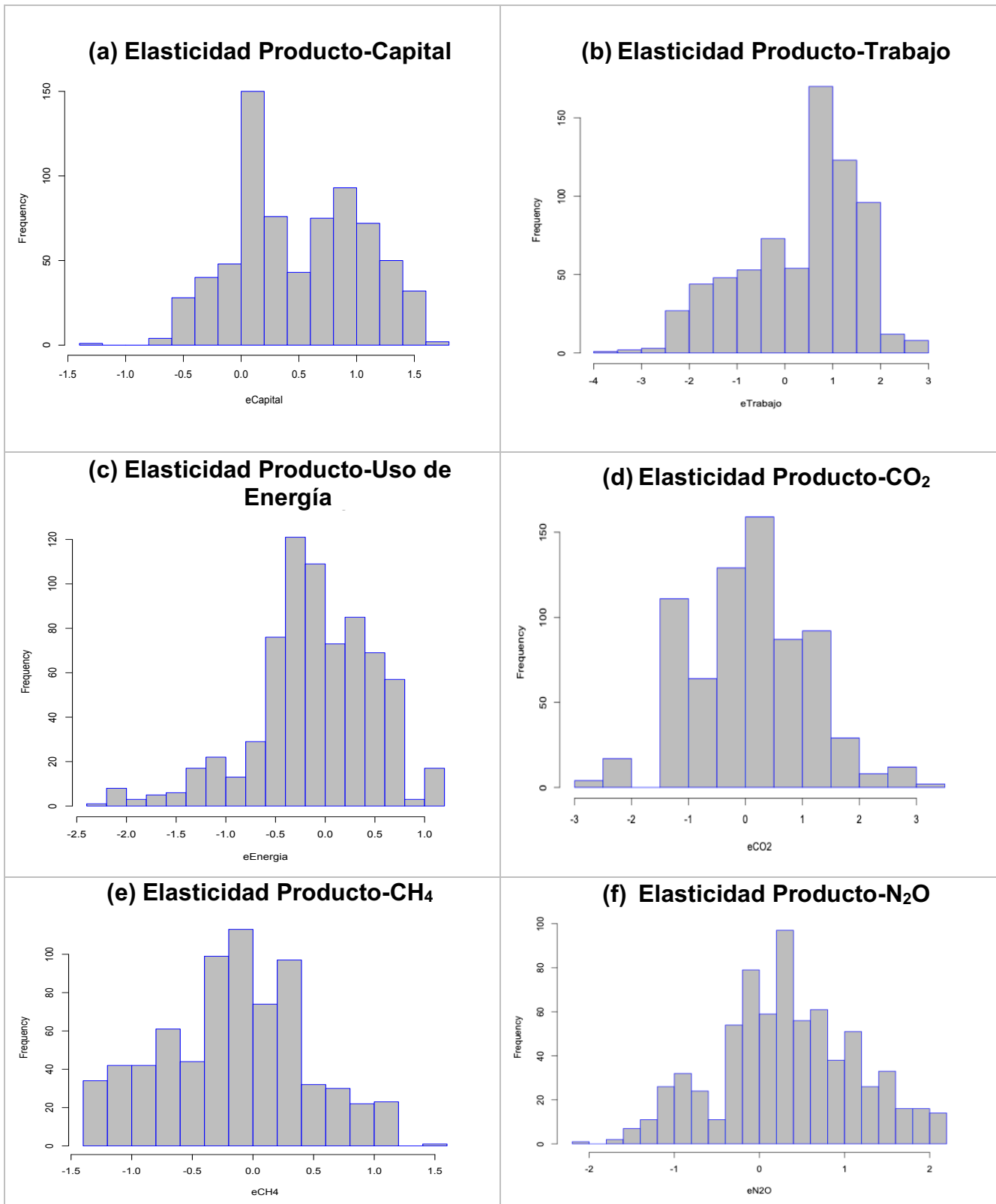
ANEXO C

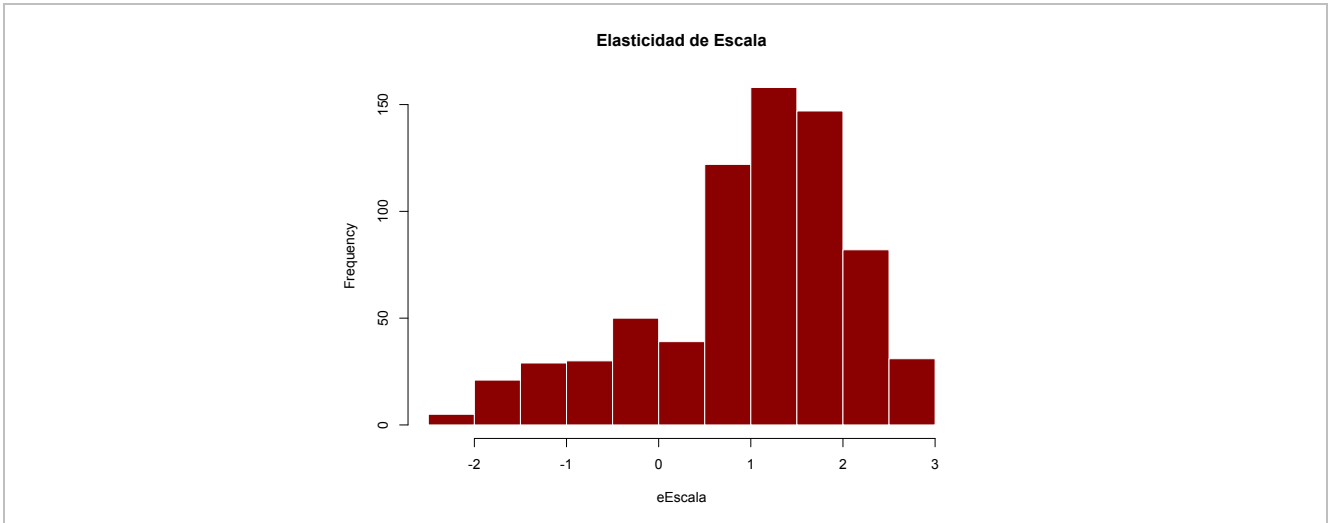
Resultados de la estimación del modelo SFA con función translogarítmica

$$\begin{aligned} \log(\text{vab}) \sim & \log(\text{fbkf}) + \log(w) + \log(\text{eu}) + \log(\text{co2}) + \log(\text{ch4}) + \log(\text{n2o}) + I(0.5 * \\ & \log(\text{fbkf})^2) + I(0.5 * \log(w)^2) + I(0.5 * \log(\text{eu})^2) + I(0.5 * \log(\text{co2})^2) + I(0.5 * \\ & \log(\text{ch4})^2) + I(0.5 * \log(\text{n2o})^2) + I(\log(\text{fbkf}) * \log(w)) + I(\log(\text{fbkf}) * \log(\text{eu})) + \\ & I(\log(\text{fbkf}) * \log(\text{co2})) + I(\log(\text{fbkf}) * \log(\text{ch4})) + I(\log(\text{fbkf}) * \log(\text{n2o})) + I(\log(w) \\ & * \log(\text{eu})) + I(\log(w) * \log(\text{co2})) + I(\log(w) * \log(\text{ch4})) + I(\log(w) * \log(\text{n2o})) + \\ & I(\log(\text{eu}) * \log(\text{co2})) + I(\log(\text{eu}) * \log(\text{ch4})) + I(\log(\text{eu}) * \log(\text{n2o})) + I(\log(\text{co2}) \\ & * \log(\text{ch4})) + I(\log(\text{co2}) * \log(\text{n2o})) + I(\log(\text{ch4}) * \log(\text{n2o})) + \text{myear} \end{aligned}$$

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	0.56	0.06	8.6607	0.000	***
log(sbo)	0.46	0.08	5.7474	0.000	***
log(w)	0.87	0.10	8.5046	0.000	***
log(eu)	-2.14	0.19	-11.3412	0.000	***
log(co2)	1.66	0.27	6.2093	0.000	***
log(ch4)	-0.36	0.05	-7.9626	0.000	***
log(n2o)	0.71	0.06	12.7473	0.000	***
I(0.5 * log(sbo)^2)	0.22	0.01	19.8489	0.000	***
I(0.5 * log(w)^2)	-1.03	0.08	-13.5299	0.000	***
I(0.5 * log(eu)^2)	0.34	0.14	2.4386	0.015	*
I(0.5 * log(co2)^2)	-0.47	0.15	-3.0792	0.002	**
I(0.5 * log(ch4)^2)	0.16	0.02	7.6784	0.000	***
I(0.5 * log(n2o)^2)	0.44	0.05	8.1597	0.000	***
I(log(sbo) * log(w))	0.06	0.02	3.3018	0.001	***
I(log(sbo) * log(eu))	0.07	0.04	1.7597	0.078	.
I(log(sbo) * log(co2))	-0.29	0.04	-6.5446	0.000	***
I(log(sbo) * log(ch4))	-0.33	0.02	-15.8363	0.000	***
I(log(sbo) * log(n2o))	0.38	0.03	12.9732	0.000	***
I(log(w) * log(eu))	-1.15	0.06	-17.9815	0.000	***
I(log(w) * log(co2))	1.58	0.05	29.119	0.000	***
I(log(w) * log(ch4))	0.56	0.04	14.2535	0.000	***
I(log(w) * log(n2o))	-0.64	0.06	-11.3605	0.000	***
I(log(eu) * log(co2))	-0.16	0.13	-1.2604	0.208	.
I(log(eu) * log(ch4))	-0.40	0.06	-6.1791	0.000	***
I(log(eu) * log(n2o))	0.02	0.05	0.4593	0.646	.
I(log(co2) * log(ch4))	0.57	0.08	7.4959	0.000	***
I(log(co2) * log(n2o))	-0.30	0.05	-5.5175	0.000	***
I(log(ch4) * log(n2o))	-0.22	0.03	-7.3211	0.000	***
myear	0.01	0.00	1.827	0.068	.
I(myear * log(sbo))	0.01	0.00	5.4767	0.000	***
I(myear * log(w))	-0.03	0.00	-12.3003	0.000	***
I(myear * log(eu))	-0.07	0.00	-16.1143	0.000	***
I(myear * log(co2))	0.07	0.00	23.9955	0.000	***
I(myear * log(ch4))	0.02	0.00	5.341	0.000	***
I(myear * log(n2o))	-0.01	0.00	-3.6379	0.000	***
I(0.5 * myear^2)	0.00	0.00	0.7228	0.470	.
sigmaSq	0.70	0.02	29.5281	0.000	***
gamma	1.00	0.00	406605.982	0.000	***
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					
log likelihood value: -389.1873					
cross-sectional data					
total number of observations = 714					
mean efficiency: 0.6160027					

ANEXO D
Elasticidades Producto - Isumos





Fuente: Elaboración propia con estimaciones hechas por la autora.

ANEXO E

Indicador de eficiencia por sectores de la economía mexicana

Sectores	Coeficiente de intensidad			Precios sombra			Indicador de eficiencia
	Miles de dólares por ton de CO ₂ eqs			de dólares PPP por ton de CO ₂ eqs			
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Agricultura, caza, pesca y silvicultura	3.49	1.45	1.51	0.42	0.04	0.08	0.20
Minería y extracción de petróleo	8.1	48.6	2,040.7	2.58	3.36	276.13	0.52
Bebidas, alimentos y tabaco	17.6	2,247.8	1,314.5	2.89	80.53	91.96	0.27
Textiles	6.1	1,948.7	1,927.6	0.18	12.36	23.88	0.05
Productos de piel y calzado	9.6	2,426.4	2,831.9	0.07	3.82	8.71	0.01
Madera y corcho	7.2	460.8	312.4	0.05	0.67	0.89	0.01
Papel, imprenta y publicidad	2.8	859.2	623.1	0.04	2.72	3.85	0.02
Coque y refinación de petróleo	0.4	25.9	145.0	0.01	0.12	1.29	0.03
Productos químicos	3.4	110.2	27.2	0.23	1.63	0.79	0.11
Hule y plástico	6.5	1,973.0	2,652.3	0.11	7.14	18.74	0.03
Otros minerales no metálicos	0.4	417.0	197.7	0.01	1.52	1.41	0.03
Metales básicos	2.6	908.3	991.9	0.19	14.08	30.03	0.12
Otra maquinaria	14.4	4,641.9	1,738.3	0.29	20.25	14.81	0.03
Equipo eléctrico y óptico	14.2	5,728.4	3,556.1	1.04	90.93	110.22	0.12
Equipo de transporte	22.1	5,447.7	1,764.9	1.63	87.69	55.47	0.12
Otras manufacturas y reciclaje	4.7	970.5	867.3	0.10	4.61	8.05	0.04
Electricidad, gas y suministro de agua	0.3	58.4	116.6	0.01	0.60	2.34	0.08
Construcción	16.3	4,942.1	1,222.3	4.48	295.98	142.94	0.45
Venta y reparación de equipo de transporte	2.8	320.5	189.4	0.03	0.66	0.76	0.02
Comercio al mayoreo, excepto equipo de transporte	55.6	32,305.5	9,660.2	13.89	1,761.01	1,028.28	0.41
Comercio al menudeo, excepto equipo de transporte; servicios de mantenimiento y reparación a viviendas	22.3	26,042.7	4,817.8	6.95	1,765.27	637.70	0.51
Hoteles y Restaurantes	9.1	10,878.3	2,997.2	0.82	212.40	114.27	0.15
Transporte terrestre	5.1	1,015.2	313.4	0.93	40.69	24.53	0.30
Transporte marítimo	0.7	200.4	54.6	0.00	0.14	0.08	0.01
Transporte aéreo	0.4	4,460.4	75.2	0.00	5.45	0.18	0.01
Otras actividades auxiliares de transporte y agencias de viajes	9.1	2,343.9	1,673.7	0.24	13.75	19.17	0.04
Correo y telecomunicaciones	15.8	22,697.3	4,903.7	0.90	280.96	118.53	0.09
Intermediación financiera	68.1	41,790.0	11,983.6	6.09	814.87	456.29	0.15
Bienes raíces	301.8	93,407.6	58,270.6	111.00	7,491.44	9,125.74	0.60
Renta de maquinaria y equipo	27.0	12,841.4	4,021.5	5.42	561.73	343.51	0.33
Administración pública y defensa, seguridad social	20.4	3,488.2	2,511.2	3.30	123.10	173.05	0.27
Educación	15.6	11,160.9	4,856.9	2.50	390.30	331.66	0.26
Salud y servicio social	22.4	9,790.8	600.5	1.91	181.95	21.79	0.14
Otros servicios comunitarios	19.5	2.6	26.1	1.37	0.04	0.78	0.12

Nota: Las celdas en color rojo presentan los sectores menos eficientes, las amarillas representan los valores medios y las celdas en color verde son los sectores más eficientes.

Fuente: Elaboración propia con estimaciones hechas por la autora.

ANEXO F

Indicador de política pública e impuesto a las emisiones por sectores de la economía mexicana

Sectores	Millones de dólares					Emisiones por incremento (Toneladas CO ₂ eq.)		
	VAB 2015	Incremento de 5% en la producción	Índice política pública %	Costo incremento	Costo del incremento con Precios Sombra	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Agricultura, caza, pesca y silvicultura	63,363	3,168	8.57%	271.6	620.5	907,628	2,182,026	2,103,789
Minería y extracción de petróleo	128,084	6,404	4.07%	260.6	3,345.7	789,779	131,892	3,138
Bebidas, alimentos y tabaco	89,545	4,477	0.94%	42.1	1,209.3	254,410	1,992	3,406
Textiles	11,726	586	0.48%	2.8	28.0	96,643	301	304
Productos de piel y calzado	2,759	138	0.08%	0.1	1.6	14,376	57	49
Madera y corcho	2,994	150	0.09%	0.1	1.6	20,842	325	479
Papel, imprenta y publicidad	7,815	391	0.52%	2.0	9.3	139,987	455	627
Coque y refinación de petróleo	8,075	404	4.96%	20.0	13.8	956,232	15,597	2,785
Productos químicos	30,038	1,502	2.12%	31.8	167.9	441,051	13,632	55,126
Hule y plástico	8,957	448	0.26%	1.1	12.2	68,943	227	169
Otros minerales no metálicos	8,490	425	3.99%	16.9	11.7	1,009,134	1,018	2,147
Metales básicos	32,962	1,648	2.71%	44.7	192.6	627,129	1,814	1,662
Otra maquinaria	12,289	614	0.14%	0.9	20.2	42,572	132	353
Equipo eléctrico y óptico	35,115	1,756	0.51%	9.0	210.1	123,311	306	494
Equipo de transporte	60,637	3,032	0.34%	10.2	367.9	137,096	557	1,718
Otras manufacturas y reciclaje	11,207	560	0.47%	2.6	20.1	119,840	577	646
Electricidad, gas y suministro de agua	32,329	1,616	17.98%	290.7	125.4	6,145,104	27,689	13,868
Construcción	149,129	7,456	1.69%	126.3	3,366.7	456,755	1,509	6,101
Venta y reparación de equipo de transporte	5,147	257	0.33%	0.9	4.0	90,820	803	1,359
Comercio al mayoreo, excepto equipo de transporte	167,554	8,378	0.45%	37.8	3,443.1	150,784	259	867
Comercio al menudeo, excepto equipo de transporte; servicios de mantenimiento y reparación a viviendas	179,317	8,966	1.39%	125.0	4,581.9	401,185	344	1,861
Hoteles y Restaurantes	44,581	2,229	0.98%	21.9	328.1	244,496	205	744
Transporte terrestre	109,055	5,453	3.66%	199.4	1,647.7	1,076,270	5,371	17,397
Transporte marítimo	1,543	77	0.46%	0.4	0.4	107,777	385	1,413
Transporte aéreo	3,483	174	1.44%	2.5	1.6	445,913	39	2,314
Otras actividades auxiliares de transporte y agencias de	15,404	770	0.30%	2.3	34.1	84,862	329	460
Correo y telecomunicaciones	50,430	2,521	0.36%	9.1	235.3	159,325	111	514
Intermediación financiera	94,130	4,706	0.13%	6.2	691.9	69,091	113	393
Bienes raíces	213,972	10,699	0.12%	13.1	6,469.1	35,455	115	184
Renta de maquinaria y equipo	111,227	5,561	0.75%	41.4	1,834.1	205,888	433	1,383
Administración pública y defensa, seguridad social	81,957	4,098	0.80%	32.7	1,090.3	200,921	1,175	1,632
Educación	78,046	3,902	1.03%	40.2	1,028.9	250,180	350	803
Salud y servicio social	42,902	2,145	0.39%	8.3	300.5	95,704	219	3,572
Otros servicios comunitarios	36,235	1,812	1.08%	19.5	209.4	92,968	708,828	69,376

Fuente: Elaboración propia con estimaciones hechas por la autora.